



AGENCE FRANÇAISE  
DE SÉCURITÉ SANITAIRE  
DES ALIMENTS

## **Revue des données récentes relatives à l'ionisation des denrées destinées à l'alimentation humaine**

---

« Cette version du rapport intègre les modifications apportées par l'erratum de juin 2008 rectifiant à la page 3 : la première phrase du troisième paragraphe concernant la situation européenne et le renvoi à la référence 18»

Avril 2007

## Introduction

L'ionisation des aliments a pour principal effet technologique attendu la réduction de la charge microbienne. L'évaluation de la sécurité sanitaire des aliments traités par un procédé d'ionisation doit d'abord identifier les effets qui peuvent être associés à ce traitement, pour évaluer ensuite la possibilité que ces effets présentent un risque pour le consommateur.

Diverses instances d'évaluation nationales et internationales ont expertisé abondamment les risques associés aux denrées alimentaires traitées par ionisation. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a conclu en 1981 que sous les angles toxicologique, microbiologique et nutritionnel les aliments ionisés à une dose de 10 kGy<sup>1</sup> ne posaient pas des problèmes de santé [ 64] . Dans une nouvelle évaluation, l'OMS a rapporté que les niveaux de certaines vitamines dans les aliments, notamment, la thiamine et la vitamine E, pouvaient diminuer à la suite d'un traitement par ionisation (10-20 kGy) [ 65]. L'OMS a conclu cependant que cette réduction ne semblait pas particulière au traitement par ionisation car d'autres traitements technologiques (ex. chaleur, séchage) ont un effet similaire.

Le Comité Scientifique de l'Alimentation Humaine (SCF en anglais) de la Commission européenne a conclu en 2003 qu'en raison du manque de données relatives au traitement par ionisation sur des denrées autres que celles correspondant au régime européen ou occidental, l'extension d'un traitement de 10 kGy à l'ensemble des denrées (incluant des denrées exotiques) n'était pas conseillée [ 51]. Ce Comité a suggéré que les diverses denrées visées par un traitement par ionisation devraient être évaluées individuellement en prenant en compte le besoin technologique et leur sécurité, essentiellement en raison du peu d'études disponibles à l'époque concernant la toxicité des 2-alkylcyclobutanones.

La US Food and Drug Administration (FDA) a réévalué récemment la sécurité d'un procédé d'ionisation des mollusques en considérant de manière plus large les dangers potentiels associés à ce type de procédé (ex. modifications des composants des aliments, formation des produits de radiolyse comme le furane et l'alkylcyclobutanone, études toxicologiques publiées, etc) [ 31]. Cette évaluation a conclu que le traitement par ionisation des mollusques frais et congelés dans les conditions d'emploi définies (doses  $\leq 5.5$  kGy) était sûr.

L'alimentarité des denrées traités par ionisation dépassant 10 kGy a également été évaluée par le SCF [ 51] et l'OMS [ 66], mais dans la mesure où ces doses sont supérieures à celles admises à ce jour en Europe<sup>2</sup> l'existence de ces rapports est mentionnée uniquement à titre informatif.

### Méthodologie de recherche bibliographique

De nombreuses évaluations sur la toxicité potentiellement associée au traitement par ionisation des aliments ont été publiées. L'objectif de ce document n'est pas de revisiter toutes les évaluations antérieures mais de résumer les conclusions les plus importantes auxquelles ont abouti les organismes d'évaluation et cela jusqu'aux dernières conclusions de la US FDA émises en 2005 [ 31].

Une recherche bibliographique sur les travaux scientifiques publiés depuis 2005 dans la littérature spécialisée a par ailleurs été faite. Les stratégies de recherche bibliographique suivantes ont été employées : irradiat\* ET food, radioly\* ET product\*, radioly\* ET compounds, ionized ET food et ionized ET product\* . Après l'élimination des duplicats inter-stratégies, cette recherche bibliographique a abouti à un total de 779 références dont 46 ont été considérées pertinentes par rapport aux domaines traités dans ce document. Seules les publications concernant les aspects en rapport avec les aliments et/ou la toxicologie des produits de radiolyse ou des aliments ionisées et/ou la chimie des produits de radiolyse provenant des aliments et/ou la microbiologie ont été retenues. La base des données bibliographique et les outils de recherche utilisés ont été ceux de SCOPUS<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Unité de dose radioactive absorbée correspondant à l'absorption d'une d'énergie d'un joule par kilo de matière (1 Gray = 1 J/kg)

<sup>2</sup> Voir partie réglementation

<sup>3</sup> <http://info.scopus.com/overview/what/>

## Contexte et réglementation appliquée aux aliments ionisés

### Les recommandations internationales

La FAO/AIEA/OMS a été favorable au développement du traitement par les radiations ionisantes [ 64] [ 66]. Ce traitement physique ne générerait pas de résidus comme certains traitements chimiques utilisés pour détruire insectes ou bactéries. La Commission du *Codex Alimentarius* a recommandé un code international pour la pratique de l'irradiation des aliments dans l'objectif d'atteindre, entre autres, le contrôle des pathogènes dans les aliments, la réduction de la charge microbienne, la désinsectisation, l'induction d'une inhibition de la germination et l'augmentation de la durée de conservation des denrées périssables [ 12]. La norme générale Codex pour les denrées alimentaires irradiées, prescrit que la dose maximale absorbée pour une denrée alimentaire ne doit pas être supérieure à 10 kGy [ 13].

### La situation européenne

La Commission a autorisé ce traitement par la Directive 1999/2/CE qui est entrée en vigueur le 31 décembre 2000 [ 17]. La dose maximale autorisée est de 10 kGy.

Cette Directive portait d'abord sur les herbes aromatiques séchées, épices et condiments végétaux. Il était prévu de compléter cette liste de produits dans un second temps, ce qui n'a pas été fait à ce jour. Les États Membres peuvent maintenir les autorisations nationales antérieures à celles prévues dans la directive suscitée, de même que les restrictions d'importation, s'ils sont défavorables à l'importation de produits ionisés. Il y a actuellement cinq pays qui ont une liste positive autorisant le traitement d'autres produits que ceux mentionnés dans cette directive.

Dans les dix pays européens possédant des irradiateurs en 2004, environ 15 000 tonnes de produits ont été traités. La Belgique avec 6 000 tonnes dont 2 700 tonnes de cuisses de grenouilles et les Pays-Bas avec 5 000 tonnes dont 1 638 tonnes de légumes secs étaient les plus forts utilisateurs de cette technologie [18]<sup>4</sup>. En 2005, 8 pays ont fourni à la Commission européenne des informations sur les quantités des denrées traitées et sur le nombre des contrôles réalisés sur des denrées importées [ 20]. La France, avec six irradiateurs qui servent surtout pour le matériel médical, vient en troisième position avec 1 802 tonnes traitées en 2004, 3111 en 2005 et 3004 en 2006, dont 106 tonnes d'épices, aromates et légumes déshydratés, 1780 tonnes de viande séparée mécaniquement (VSM) de volaille, 149 tonnes de gomme arabique et 965 tonnes de cuisses de grenouille<sup>5</sup>. Dix sept pays effectuent des contrôles sur les produits, les résultats de ces contrôles sont communiqués à la Commission européenne. Ces contrôles concernent les installations et la vérification de l'étiquetage mais également la détection de l'emploi de radiations ionisantes selon des marqueurs identifiés par le comité européen de normalisation (CEN). En effet, une étape importante dans la détection de l'emploi de radiations ionisantes a été la publication de normes CEN pour identifier les aliments ionisés et vérifier l'étiquetage (<http://www.cen.eu/cenorm/homepage.htm>). Apporter la preuve de l'ionisation est le moyen de contrôler les échanges commerciaux des aliments concernés, de lutter contre les fraudes et de valider l'étiquetage des produits traités ; condition nécessaire à l'information tant des industriels que des consommateurs.

### La réglementation en France

Depuis un avis favorable du Conseil d'Hygiène Publique de France en 1980, la liste des produits autorisés en France figure dans l'arrêté du 20 août 2002 relatif aux denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation [ 4]. Il est rappelé dans cet arrêté que ce traitement ne peut être appliqué en remplacement des mesures d'hygiène et de bonnes pratiques. Des études toxicologiques ont été produites à l'époque pour chaque demande [ 15]. Les caractéristiques des rayonnements utilisés, la dose maximale autorisée, la structure des irradiateurs sont précisées dans 13 articles de la réglementation française [ 16].

L'étiquetage des denrées traitées est obligatoire pour les denrées destinées au consommateur final et aux collectivités. Si les denrées sont vendues sous conditionnement individuel, la mention "traité par rayonnements ionisants" ou "traité par ionisation" doit figurer sur l'étiquetage, en complément de la dénomination de vente. Pour les denrées vendues en vrac, ces mêmes mentions figurent avec la dénomination de la denrée sur une affiche ou sur un écriteau placé à côté ou au dessus du récipient qui les contient. Si une denrée est utilisée comme ingrédient, l'une des deux mentions précisées plus haut doit figurer sur l'étiquetage, en complément de la dénomination de vente. Les denrées ionisées importées sont soumises aux mêmes règles.

<sup>4</sup> phrase modifiée par l'erratum de juin 2008, sur la structure du paragraphe et le renvoi à la référence 18.

<sup>5</sup> Source : DGCCRF

La DGCCRF a la charge de vérifier le respect des procédures et la conformité des installations pour traiter les denrées alimentaires (dose délivrée, hygiène du site, respect de la chaîne du froid, etc.), ainsi que l'étiquetage et la mise en œuvre des contrôles dans les produits français et d'importation selon les méthodes validées par le CEN permettant de vérifier qu'un traitement ionisant a été appliqué et d'en déduire la dose utilisée (EN 1784-88, EN 14569, etc.).

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)<sup>6</sup> contrôle les installations sur le plan radio-protection.

### **Dans les autres pays**

Une trentaine de pays utilisent l'ionisation des aliments, au moins pour les épices et les plantes aromatiques.

Aux États-Unis, l'ionisation est autorisée depuis 1992 pour les viandes de poulet et plus récemment pour les viandes rouges (bœuf, agneau, et porc frais ou congelé). A cet égard, ce traitement a connu un essor compte tenu des épidémies de grande envergure au regard du danger présenté par *E. coli* O157:H7. Les États-Unis ont récemment confirmé un niveau maximal acceptable d'ionisation des aliments exprimé en 7,5 MeV<sup>7</sup> [ 32]. Les États-Unis sont favorables à la suppression du seuil des 10 kGy.

La Nouvelle Zélande et l'Australie ont donné une première autorisation effective d'assainissement des herbes, épices et plantes à infusion [ 3].

## **Principe et effet de l'ionisation comme procédé de décontamination**

Il s'agit d'un procédé physique de traitement des aliments qui consiste à exposer des denrées emballées ou en vrac à des rayonnements électromagnétiques (rayons X ou  $\gamma$ ) produits par une source radioactive (<sup>60</sup>cobalt) ou à celle de faisceaux d'électrons (électrons accélérés). Les aliments sont soumis soit à un rayonnement gamma (issu du cobalt 60), soit à des rayons X d'énergie inférieure à 5 méga-électron-volt (MeV), soit à des électrons accélérés de moins de 10 MeV. Le résultat sur le produit est équivalent.

Il convient de rappeler que l'ionisation des aliments, dans les conditions autorisées pour la mise en œuvre de ce procédé, ne rend pas les aliments « radioactifs » et par conséquent l'évaluation de leur sécurité n'a donc pas à considérer les dangers liés à l'exposition directe à une radiation induite (émission des particules alpha, bêta, gamma, rayons X).

Les sources de cobalt nécessitent des mesures de confinement permanent et des autorisations spéciales pour le stockage de la source radioactive et son élimination par un organisme agréé.

Les accélérateurs d'électrons consomment de l'énergie et l'énergie utilisée est inférieure à 10 Mev pour ne pas produire de radioactivité induite. Ce procédé s'accompagne de mesures de confinement et de radio-protection uniquement pendant le fonctionnement.

Le principal effet technologique attendu de l'ionisation des aliments est de réduire la charge microbienne. Le mécanisme d'action de l'effet antimicrobien a été associé à la formation de radicaux libres (en particulier OH<sup>•</sup>) et de peroxyde d'hydrogène dans le cytosol, qui interfèreraient avec les processus biochimiques des bactéries (ex. dommage d'ADN) et dont l'effet létal est connu [ 51].

L'intérêt de l'ionisation en agroalimentaire réside essentiellement dans la pénétration du rayonnement au cœur de la denrée à travers l'emballage (évite toute recontamination liée à des manipulations) et sans élévation de température (applicables aux produits frais ou congelés). Les effets des radiations ionisantes augmentent avec la dose appliquée et sont comparables à ceux de la chaleur, bien qu'il n'y ait pas d'élévation notable de température.

---

<sup>6</sup> <http://www.irsn.fr/>

<sup>7</sup> l'énergie spécifique émise par un rayonnement est exprimée en kilo-électron-volt (keV) ou en méga-électron-volt (MeV) (1 MeV = 1,6 x10<sup>-13</sup> joule).

L'objectif sanitaire recherché est conditionné par la dose délivrée [ 45]:

- Faibles doses (jusqu'à 1 kGy): induit une inhibition de la germination, désinsectisation et déparasitage, ralentissement d'un processus biologique (ex. maturation).
- Moyens doses (1-10 kGy) : prolongation de la conservation (1 à 3 kGy), élimination des agents d'altération et de microorganismes pathogènes (1 à 7 kGy), amélioration des propriétés techniques des aliments (diminution du temps de cuisson) (2 à 7 kGy).
- Fortes doses (10-50 kGy) : stérilisation industrielle (30-50 kGy), décontamination de certains additifs alimentaires (10-50 kGy).

L'efficacité du traitement ionisant dépend de la matrice et de la charge bactérienne initiale. L'ionisation peut être améliorée par exemple par l'utilisation d'atmosphère contrôlée pour appliquer une dose plus faible. En effet, les doses élevées ne peuvent être employées que sur des produits à l'état solide, déshydratés ou congelés pour éviter les modifications de l'aspect et des qualités organoleptiques. Les tendances actuelles sont donc à l'association de plusieurs procédés.

### **Effets ionisants d'une dose inférieure à 10 kGy sur les microorganismes**

Le traitement à des doses inférieures à 10 kGy diminue la charge bactérienne. Cet effet sur les microorganismes proche de celui obtenu par la chaleur ne conduit pas à la stérilisation du produit. Le traitement présente de l'intérêt pour les aliments préemballés sous atmosphère raréfiée, les produits déshydratés et les produits consommés crus.

La dose nécessaire pour diminuer de 1 log la charge bactérienne est dénommée D10 (dose nécessaire en kGy pour réduire la population bactérienne par 10). Toutes les bactéries pathogènes à l'état végétatif sont radiosensibles à des doses très inférieures à 10 kGy. Les D10 des principales bactéries importantes dans la conservation des aliments, sont reportées dans le tableau I. Des résultats différents peuvent cependant être obtenus en fonction de la matrice traitée et de la température du produit lors de l'irradiation. Une étude sur l'efficacité de décontamination des grains de céréales contaminés artificiellement avec des souches des coliformes et de *Clostridium* sp. rapporte l'élimination totale des coliformes et la survie des quelques colonies (10-30 UFC/gram) de *Clostridium* sp. après un traitement à 10 kGy [ 6].

Dans le tableau II sont collectés les résultats et les conclusions de plusieurs études récentes relatifs à l'effet du traitement ionisant sur différentes microorganismes et matrices à des doses variables, inférieures à 10 kGy à l'exception de 6 doses testées.

Les résultats de l'inactivation des parasites dans la viande et dans les poissons et crustacés, à des doses inférieures à 2,5 kGy, sont résumés dans le tableau III.

Les microorganismes les plus radio-résistants semblent être les bactéries sporulées (tableau I) et certains virus (tableau IV).

## **ASPECTS TOXICOLOGIQUES**

### **Effets de l'irradiation sur les aliments**

Les effets de l'ionisation sur la chimie des aliments ont été abondamment examinés depuis les années soixante. En termes généraux, l'effet de l'ionisation consiste initialement à déposer de l'énergie dans le milieu, ce qui produit des radicaux libres (comme le radical OH<sup>•</sup>). Ces radicaux libres réagissent avec les divers composants des aliments. La composition des aliments, la température d'ionisation, les conditions d'ionisation déterminent la nature et les quantités des produits induits par ces réactions chimiques. De même, l'état physique des aliments traités (états congelé, frais, solide, liquide, en poudre) conditionne l'étendue des réactions chimiques induites par l'ionisation ainsi que la nature des produits formés.

La formation des radicaux libres dans les aliments a été impliquée dans la dégradation des composants des aliments [ 11]. Généralement, les réactions chimiques induites aboutissent à des cassures, des oxydations, des agrégations ou des hydrolyses des composants des aliments et à la génération des produits chimiques plus connus comme « produits de radiolyse » .

#### Protéines :

La rupture des liaisons peptidiques ou des liaisons adjacentes et l'agrégation des polypeptides peut avoir lieu après un traitement par ionisation [ 5]. Ces modifications peuvent s'accompagner de la dénaturation des protéines (modification des structures secondaire et tertiaire) et de la formation des

peptides [ 11] [ 51]. Lorsque les protéines sont en phase solide ou en solution gelée (aliments surgelés), les modifications des acides aminés eux-mêmes sont peu importantes. Des modifications protéiniques apparaissent également à la suite d'un traitement par la chaleur [ 31] et elles ne sont donc pas spécifiques du traitement par ionisation.

#### Carbohydrates :

La rupture des liaisons glucidiques aboutissant à la libération des monosaccharides constituant des polysaccharides peut avoir lieu après un traitement par ionisation. Le traitement par ionisation des aliments contenant de l'amidon, par exemple, peut induire la libération de dextrans, maltose, glucose et autres monosaccharides constituant de l'amidon [ 66]. Cependant, ces modifications paraissent également à la suite d'une cuisson des aliments et ne sont donc pas spécifiques du traitement par ionisation.

#### Lipides :

Le mécanisme principal de dégradation des lipides est la peroxydation radio-induite, qui ne se différencie pas de celle induite par d'autres causes. Une variété de ces produits (aldéhydes, esters, cétones, etc.) a été recensée après un traitement par ionisation. Leur concentration peut diminuer lors du stockage [ 29] [ 51]. Le profil lipidique des aliments ne semble pas être modifié après traitement par ionisation bien que des variations dans les contenus en phospholipides, cholestérol et acides gras libres aient été rapportées [ 36]. Ces modifications apparaissent également à la suite de l'application d'autres traitements technologiques sur les aliments comme la chaleur [ 31] et des procédés technologiques à effet oxydant [ 19] et ne sont donc pas spécifiques du traitement par ionisation.

Toutefois, la rupture des liaisons hydrocarbonées (notamment insaturées) aboutit à la production de produits de radiolyse plus spécifiques. La production dans certains aliments d'alkylcyclobutanones (ACBs) à partir de l'acide palmitique ( $C_{16}H_{32}O_2$ ) semble être spécifique d'un traitement par ionisation [ 30] [ 24] [ 52]. Des niveaux de formation de 2-dodecylcyclobutanone (2-DCB) allant de 0,04 à 0,6 µg par gramme de lipides par kGy (µg/g lipide/kGy) ont été rapportés, respectivement, dans de la viande de poulet et de bœuf traitées [ 31]. Ces dérivés semblent être stables dans les aliments jusqu'à une température de 100 °C mais sont détruits à partir de 200 °C [ 44].

#### Vitamines

Certaines vitamines hydrosolubles et liposolubles peuvent être détruites par un traitement d'ionisation. La thiamine, la vitamine E, la vitamine A et dans une moindre mesure la vitamine K semblent être les plus radio-sensibles [ 51]. Ces vitamines peuvent également être détruites à la suite des traitements enzymatiques et chimiques [ 11] ainsi que lors des traitements technologiques communs comme la cuisson et le séchage [ 65] et ces effets ne sont donc pas spécifiques du traitement par ionisation.

#### Furane

Du furane peut être produit lors de l'ionisation des certains aliments [ 21] [ 31]. Cette formation semble être restreinte aux aliments liquides car les aliments solides ionisés présentent des taux de furane plus faibles ou inexistantes [ 22]. Du furane a été trouvé naturellement dans certains aliments (6-8 ng/g) [ 22] et des procédés technologiques classiques, comme le traitement du jus d'orange dans un bain marie pendant 5 min, forment également du furane [ 21]. La formation de furane n'est donc pas spécifique du traitement par ionisation des aliments.

#### Autres composants

Les concentrations de certains composés comme la naringine, la narirutine, le d-limonène et le myrcène dans des fruits diminuent après un traitement par ionisation et stockage [ 59]. D'autres composés comme le lycopène et le carotène ne sont pas affectés par ce même traitement.

### **Toxicité des produits de radiolyse. Données récentes.**

#### **2- alkylcyclobutanones**

Le potentiel toxique des 2-alkylcyclobutanones a été évalué par le SCF en 2003 [ 51]. Les études de cytotoxicité (test avec des cellules cancéreuses de colon), de toxicologie génétique *in vitro* (test de mutation reverse), d'induction des cassures sur l'ADN *in vitro* (test des comètes) et *in vivo* (test d'activité promotrice sur les cellules de la muqueuse du colon chez le rat), disponibles à cette époque n'étaient pas concluantes et le potentiel génotoxique du 2-alkylcyclobutanone n'a pas pu être écarté par ce comité. Toutefois, ces effets survenaient uniquement à des doses de 2-alkylcyclobutanone élevées induisant une cytotoxicité cellulaire, paramètre qui souvent met en question ce type des

résultats. En revanche, d'autres études de toxicologie génétique *in vitro* (test d'Ames) montraient des résultats négatifs. Le rapport du SCF concluait que des études supplémentaires *in vitro* et *in vivo* (tests standard de mutation génique et d'aberrations chromosomiques, test chez les animaux) étaient nécessaires afin de conclure sur un éventuel potentiel génotoxique des 2-alkylcyclobutanones.

Plus récemment le potentiel toxique des alkylcyclobutanones et notamment du 2-docecylcyclobutanone (2-DCB) a été largement réévalué par la US FDA [ 31]. Le réexamen des résultats des études de toxicologie génétique *in vitro* (test d'Ames, test de recombinaison intra-chromosomique chez *S. cerevisiae*, des réversions des mutations dans le gène du tryptophane chez *E. coli*), avec et sans activation métabolique, n'a pas démontré un potentiel génotoxique du 2-DCB. De même, le réexamen des résultats des études réalisées sur des animaux nourris avec de la viande, du poulet et du poisson traités par ionisation, n'a pas montré d'effet adverse. Un éventuel effet sur la promotion du cancer du colon ou sur l'incidence d'apparition des tumeurs chez les animaux nourris avec ces produits n'a pas été identifié dans ce rapport à l'issue de ce réexamen.

La recherche bibliographique effectuée dans le présent rapport montre que depuis la parution de l'avis de la FDA en 2005 plusieurs publications scientifiques ont étudié les éventuels effets adverses associés aux 2-alkylcyclobutanones et à la consommation des denrées ionisées:

### **Etudes *in vitro***

Le 2-DCB a été testé *in vitro* chez *E. coli lacZ SF1* au regard de sa capacité à augmenter l'expression des gènes inductibles par des dommages à l'ADN (*dinD*, *nfo*, *recA* et *umuDC*) [ 55] et à augmenter le nombre des bactéries mutantes résistantes au 5-fluorouracile. L'exposition à des concentrations croissantes de 2-DCB (125, 250, 500 et 1 000 µg/mL)<sup>8</sup>, avec et sans activation métabolique, n'a augmenté ni l'expression des gènes testés ni le nombre des bactéries résistantes au 5-fluorouracile, par comparaison aux témoins.

Le 2-DCB a été testé *in vitro* au regard de sa capacité à induire des effets clastogènes (formation des micronoyaux) dans des cellules des lymphoblastes-TK6 humains [ 56]. L'exposition des cellules à des concentrations de 13,3 et 26,5 µM pendant 24 heures n'a pas montré d'effet clastogène attribuable au 2-DCB, avec ou sans activation métabolique. A la plus forte dose testée (53 µM) une augmentation significative du nombre de micronoyaux a été identifiée. Cependant, cet effet coïncide avec une augmentation relativement importante de la cytotoxicité dans l'essai 52 % ± 5.2 et 61 % ± 4.5, respectivement, en absence et en présence d'activation métabolique et ne peut donc pas être interprété comme démontrant un effet génotoxique.

Des cellules primaires, des cellules préumorales (cellules d'adénomes LT97) et des lignées tumorales (HT29clone2A) du colon humain ont été exposées *in vitro* à des doses croissantes de 2-DCB [ 37]. La génotoxicité du 2-DCB dans ces cellules a été évaluée par la mesure des cassures à l'ADN (test des comètes) aux doses de 150, 300, 600, 1 049 et 2 097 µM (environ 0,5 mg/ml) et par la mesure d'induction des aberrations chromosomiques (technique d'hybridation fluorescente *in situ*), cette dernière aux doses de 30, 75 et 150 µM (environ 0,01 mg/ml), en présence et en absence d'activation métabolique [ 37]. Dans cet essai, le 2-DCBa induit des cassures à l'ADN sur la lignée préumorale mais la lignée tumorale a été résistante et seul un effet marginal est rapporté dans les cellules primaires du colon. Le 2-DCB a induit des aberrations chromosomiques dans la lignée préumorale mais pas sur les cellules primaires ni sur la lignée tumorale. Les auteurs mentionnent que l'induction d'aberrations chromosomiques sur les cellules préumorales, à la suite de l'exposition *in vitro* au 2-DCB, semble suggérer une progression vers un stade tumoral dans cette lignée. Ces effets n'apparaîtraient, cependant, qu'à des doses d'exposition au 2-DCB relativement élevées et de l'avis des auteurs ces doses seraient très supérieures à celles trouvées dans une situation d'exposition normale chez l'homme.

### **Etudes *in vivo***

L'administration par gavage à six rats femelles Sprague-Dawley de 5 mg de 2-DCB par jour dans de l'huile de maïs pendant 5 jours n'a pas été rapportée être à l'origine d'effets indésirables [ 25]. Cette étude a permis d'établir qu'entre 3 et 11 % du 2-DCB administré est excrété dans les fèces des animaux testés alors qu'aucun métabolite n'est trouvé dans l'urine. Le tissu adipeux des animaux testés contenait seulement 0,33 % de la quantité administré de 2-DCB. En général, très peu du 2-DCB administré a été retrouvé dans cette étude et il est suggéré que la majeure partie du 2-DCB administré est convertie en acide palmitique ou en constituants hydrocarbonés, qui sont

<sup>8</sup> Environ : 524, 1 048, 2 097 et 4 194 µM.

complètement métabolisés en CO<sub>2</sub>. Pour les auteurs, ces résultats suggèrent que le 2-DCB est éliminé facilement de l'organisme et qu'il ne s'accumule pas dans le tissu adipeux.

## **Toxicité des denrées ionisées**

### **Etudes *in vitro***

Une étude préliminaire a étudié l'éventuelle induction d'une activité mutagène *in vitro* (test d'Ames) des truffes noires (*Tuber aestivum*) traitées par ionisation [ 23]. Des extractions aqueuses et à l'éthanol des truffes traitées (1,5 kGy) n'ont pas montré d'effet génotoxique dans les conditions de l'essai. Un effet protecteur sur la mutagénicité induite par le nitrofluorène, l'azide de sodium et le 2-aminoanthracène, attribué à des composants inconnus dans la truffe, a été rapporté par les auteurs.

Les éventuels effets génotoxiques des extraits de chou fermenté traités par une forte ionisation (20 kGy) ont été testés *in vitro* (test d'Ames et d'induction d'aberrations chromosomiques) suivant les protocoles d'essai recommandés par l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) [ 69]. L'exposition à des concentrations croissantes d'extraits aqueux et méthanoliques des végétaux ionisés (625, 1 250, 2 500, 5 000 et 10 000 µg/boîte), avec et sans activation métabolique, n'a pas montré d'effet mutagène dans le test d'Ames. De même, l'exposition à des concentrations croissantes des mêmes extraits aqueux et méthanoliques des végétaux ionisés (1 250, 2 500 et 5 000 µg/mL) avec et sans activation métabolique, n'a pas montré d'effet génotoxique dans le test d'induction d'aberrations chromosomiques sur des cellules de poumon d'hamster chinois (CHL).

### **Etudes *in vivo***

Les éventuels effets clastogènes d'extraits de chou fermenté traités avec une forte ionisation (20 kGy) ont été testés *in vivo* chez les souris mâles ICR (test d'induction de micronoyaux dans les cellules de la moelle osseuse), suivant les protocoles recommandés par l'OCDE [ 69]. L'exposition de quatre groupes des 6 souris mâles à une dose 2 000 mg/kg poids corporel des extraits aqueux et méthanoliques de chou ionisé et non-ionisé, n'a pas montré d'effet clastogène *in vivo*.

Une étude de toxicité sub-chronique menée chez des rats femelles Sprague-Dawley nourries pendant 13 semaines avec de la thaumatine (édulcorant de nature protéinique) ionisée (5,0 kGy) a été rapportée [ 28]. L'administration des concentrations croissantes de thaumatine ionisée (0,3 ; 1,0 et 3,0 % dans la nourriture) à des groupes des 10 rats femelles et 10 mâles n'a pas montré d'effets adverses attribuables au traitement. Aucun des paramètres généraux mesurés dans cet essai (taux de survie, poids corporel, alimentation, analyses d'urine, de sang, ophtalmologie) n'a été modifié à la fin de l'étude. L'examen histo-pathologique complet réalisé (plus de 38 tissus et organes) n'a pas montré d'effet adverse attribuable à la consommation de thaumatine ionisée. Une dose sans effet adverse observé (DSEO) d'au moins 3,0 % dans la nourriture (2 502 mg/kg poids corporel/jour pour les rats mâles et 2 889 mg/kg poids corporel/jour pour les femelles) a été identifiée par les auteurs de cet essai.

## **Conclusion**

L'ionisation des aliments avec des doses allant jusqu'à 10 kGy peut induire différents types de réactions chimiques, dont une hydrolyse de certains composants des aliments. Toutefois, les radicaux libres produits à l'issue d'un traitement ionisant ont une durée de vie très courte dans un milieu aqueux et les effets chimiques rapportés ne sont pas spécifiques d'un traitement par ionisation (ex. modification des structures secondaires et tertiaires des protéines, cassures des liaisons glucidiques, etc). Par comparaison à l'hydrolyse provoquée par des traitements technologiques tels que la chaleur, la cuisson ou des procédés à effet oxydant, les produits de radiolyse provenant d'un traitement par ionisation sont de même nature chimique et sont synthétisés dans des proportions semblables. Seules les alkylcyclobutanones (ACBs) semblent être des produits de radiolyse spécifiques d'un traitement par ionisation des aliments.

Les publications scientifiques les plus récentes examinées dans ce rapport, conduites pour étudier l'effet génotoxique du 2-dodecylcyclobutanone (2-DCB), montrent que dans les conditions des essais, le 2-DCB ne présente pas de potentiel génotoxique avéré *in vitro*. Le seul essai *in vivo* identifié, conduit pour étudier le métabolisme du 2-DCB chez le rat, ne rapporte pas d'effets adverses après une exposition des rats pendant 5 jours à 5 mg de 2-DCB par jour. Cette étude suggère que le 2-DCB est facilement métabolisé et éliminé de l'organisme.



Les études scientifiques publiées sur l'effet génotoxique de diverses denrées ionisées, dans des tests *in vitro* ou *in vivo*, n'ont pas montré d'effets adverses, bien que certains aliments aient été exposés à des doses allant jusqu'à 20 kGy.

Sous l'angle technologique, l'ionisation des aliments est utilisée pour réduire la charge microbienne des microorganismes pathogènes dans des aliments présentant un risque potentiel élevé de contamination bactérienne. La recherche bibliographique conduite dans cette évaluation montre que la grande majorité des doses testées sur des aliments restent en-dessous de la dose maximale autorisée en Europe (10 kGy). L'application de ce procédé, comme tout procédé de décontamination, ne doit en aucun cas engendrer un affaiblissement des efforts mis en œuvre pour s'assurer de la qualité microbiologique des matières premières.

En conclusion, l'examen de la littérature scientifique récente n'apporte pas d'éléments nouveaux qui permettraient, sous l'angle toxicologique notamment, de remettre en question les conclusions des évaluations conduites jusqu'à présent concluant à la sécurité des aliments traités par ionisation.

## ANNEXES

Tableau I. Effets de l'irradiation sur des spores de bactéries en suspension dans l'eau ou dans un tampon (dose de stérilisation = 12 D10) [ 66]

Espèces	D10 (kGy)	Milieu d'ionisation
<b>Anaérobies</b>		
<i>Clostridium botulinum</i> type A		
-souches résistantes :		
33	3,4	Tampon
62	2,7	Tampon
-souches résistantes moyennes :		
37	2,0	Tampon
36	1,9	Tampon
-souches sensibles :		
1192y	1,4	Eau
NCTC 7272	1,2	Eau
<i>C. botulinum</i> type B		
-souches résistantes :		
53	3,3	Tampon
41	2,1	Tampon
-souches résistantes moyennes :		
9	1,6	Tampon
-souches sensibles :		
213	1,1	Eau
51	1,2	Tampon
<i>C. botulinum</i> type D		
	2,2	Tampon
<i>C. botulinum</i> type E		
-souches résistantes moyennes :		
Beluga	1,9	Tampon
Alaska	1,7	Tampon
16/63	1,6	Eau
1304	1,7	Eau
-souches sensibles :		
Beluga	0,8	Eau
8	0,8	Tampon
V.H	1,3	Tampon
Minneapolis	0,8	Tampon
<i>C. botulinum</i> type F		
	2,5	Eau
<i>C. perfringens</i>		
Type A	1,2	Eau
Type B	1,7	Eau
Type C	1,8	Eau
Type E	1,2	Eau
<i>C. sporogenes</i>		
PA 3679/S2	2,2	Eau
NCTC 532	1,6	Eau
<b>Aérobies</b>		
<i>Bacillus cereus</i>		
	1,6	Eau
<i>B. subtilis</i>		
	0,6	Solution saline (avec 5% de gélatine)
	2,4	Tampon
<i>B. stearothermophilus</i>		
	1,0	

**Table II. Synthèse des résultats des publications récentes en termes de microorganismes visés, de doses testées, de denrées visées et des conclusions des auteurs.**

Microorganisme(s) visé(s)	Dose(s) (kGy)	Denrée(s) visée(s)	Conclusions	Référence
<i>C. laurenti</i> , <i>B. cereus</i>	0,6 ; 1,7 ; 10, 14	litchis	14 kGy dose optimale	When <i>et al.</i> [ 63]
<i>E. coli</i>	1, 2, 5	jus de cantaloup	pas d'effet sur la population bactérienne sans affecter les propriétés sensorielles	Wang <i>et al.</i> [ 62]
<i>S. aureus</i> , clostridium, coliformes, <i>Salmonella</i> spp., levures, moisissures	1, 2, 4, 3, 7	boulettes de viande crue	basses doses augmentent la qualité sanitaire, plus forte dose efficace	Vural <i>et al.</i> [ 61] Yildirim <i>et al.</i> [ 68]
<i>E. coli</i> O157:H7 933, <i>L. monocytogenes</i> ATCC 51414, <i>S. poona</i> , <i>S. LT2</i> , <i>E. coli</i> K-12 MG 1655, <i>L. innocua</i> Seeliger 1983, <i>E. aerogenes</i>	0,12; 0,36; 0,38; 0,66; 0,72; 0,88; 1,0; 1,09	fruits	souches pathogènes paraissent plus résistantes	Rodriguez <i>et al.</i> [ 48]
<i>S. typhimurium</i> , <i>L. monocytogenes</i>	0,189 ;0,192 ; 0,208 ;0,294 ; 0,303 ;0,344 ; 1,0 ; 2,0	pousses/germes	la plus forte dose serait la plus efficace	Saroj <i>et al.</i> [ 50]
<i>S. montevideo</i> , <i>S. agona</i> , bactéries acide lactiques, levures, moisissures	0,7 ; 0,95	tomates coupées	plus forte dose efficace	Schmidt <i>et al.</i> [ 53]
<i>S. typhimurium</i> , <i>E. coli</i>	0,299 ;0,301 ; 0,441 ;0,445	jus des fruits	traitements efficaces sans affecter propriétés sensorielles	Song <i>et al.</i> [ 54]
<i>Salmonella</i> spp., <i>L. monocytogenes</i> , <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> O157 :H7, <i>Y. enterocolitica</i>	0,15 ; 0,36 ; 0,47 ; 0,54	aliments "prêts à consommer"	traitements efficaces	Sommers et Boyd [ 58]
<i>L. monocytogenes</i>	0,3 ; 0,56 ; 1,2	salades	basses doses efficaces	Mintier et Foley [ 41]
<i>L. monocytogenes</i>	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	rouget fumé	plus forte dose efficace sans affecter propriétés sensorielles	Robertson <i>et al.</i> [ 47]
Non spécifié –durée de vie des produits	0,75; 3,0; 5,0	viande de poulet frais et congelée	combinaison congélation-ionisation plus efficace	Javanmard <i>et al.</i> [ 33]
<i>L. monocytogenes</i>	0,07 – 2,4	carottes pelées	plus efficace sous atmosphère modifiée	Caillet <i>et al.</i> [ 10]

"Total viable bacteria", <i>Brochothrix thermosphacta</i> , bactéries acid lactiques, <i>Pseudomonas sp.</i> , <i>Enterobacteriaceae</i> levures, moisissures	0,5; 1,0; 2,0	viande de poulet emballée	traitements efficaces	Balamatsia <i>et al.</i> [ 8]
<i>Aspergillus flavus</i> , coliformes	3, 5, 8	choufleur, knol-khol	dose médiane efficace	Vibhakara <i>et al.</i> [ 60]
<i>L. monocytogenes</i>	0,27 – 0,65	galettes de maïs emballées (tortilla) avec de la viande de bœuf et fromage	efficacité limitée	Sommers et Boyd [ 57]
<i>Listeria spp.</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>E. coli</i> O157:H7 ATCC 43888	2, 4	graisses de viande et porc utilisées dans saucisses	doses efficaces pour <i>E. coli</i> , moins efficaces pour <i>Listeria</i>	Samelis <i>et al.</i> [ 49]
bactéries mésophylles aérobies	5 - 25	ail, oignons	faible dose efficace	Pezzutti <i>et al.</i> [ 46]
<i>Salmonella spp.</i>	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5	biofilm	doses efficaces	Niemira et Solomon [ 43]
<i>E. coli</i> DSM 498	1	viande de dinde	efficacité affectée par température	Mayer-Miebach <i>et al.</i> [ 40]
<i>S. typhimurium</i> , <i>E.coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>L. ivanovii</i>	0,23 – 0,62; 0,23 – 0,62 ; 0,27 – 0,44 ; 2,0 ; 3,0	produits de la mer et algues séchées	2 kGy dose efficace, suffisante	Jo <i>et al.</i> [ 34]
<i>S. aureus</i> , <i>L. ivanovii</i> , <i>S. typhimurium</i> , <i>E. coli</i>	3; 10	viande de bœuf cuisinée, œufs frits, jambon	dose basse efficace	Jo <i>et al.</i> [ 35]
<i>L. monocytogenes</i>	1	brocolis, chou, tomates, pousses d'haricots	dose efficace	Bari <i>et al.</i> [ 9]
<i>E. coli</i> O157:H7, <i>L. monocytogenes</i>	1, 2, 3	viande de bœuf crue	plus forte dose efficace	Badr [ 7]
Non spécifié –durée de vie des produits	1	céleri coupé	diminution du nombre de bactéries, champignons	Lu <i>et al.</i> [ 39]
<i>Lactobacilli</i> , <i>Lactococci</i> , <i>Micrococcaceae</i> , <i>Clostridia</i> , bactéries mésophyles, <i>Enterobacteriaceae</i> , coliformes, coliformes fécales, <i>Enterococci</i>	1,5 ; 2,0	truffes noires fraîches	plus faible dose diminue dégradation sans affecter synthèse de polyphénols	Nazzaro <i>et al.</i> [ 42]

**Tableau III. Effets de l'irradiation sur des parasites dans certains aliments [ 14] [ 67]**

<b>Espèces</b>	<b>Doses (kGy)</b>	
<b>Dans les poissons, huîtres et crustacés *</b>		
<i>Anisakis spp.</i>	2-10	Réduit l'infectivité des larves
<i>Cryptosporidium parvum</i>	2	Complètement éliminé des huîtres
<b>Dans les viandes</b>		
<i>Toxoplasma gondii</i>	0,7	Dose minimale pour la viande de porc fraîche
<i>Trichinella spiralis</i>	0,3-1	Dose minimale pour la viande de porc fraîche (FDA)
<i>Cysticercus bovis (Tenia saginata)</i>	0,3	Dose minimale

\*Au delà de 2 kGy les qualités organoleptiques du poisson sont dégradées mais celles des huîtres ne sont pas altérées.

**Tableau IV. Effets de l'irradiation sur les virus dans certaines matrices alimentaires. Adapté de [ 2]**

<b>Matrice</b>	<b>Virus</b>	<b>Elimination virale</b>
Poisson	Poliovirus 1 VHA	1,308 kGy 2,02 kGy
Palourdes, huîtres	Poliovirus Rotavirus	2,4 kGy 3,1 kGy
Viande hachée	Coxsachievirus B2	7,0 kGy
Laitue	VHA	2,73 kGy
Fraises	VHA	3,02 kGy

## REFERENCES

- [ 1] Abu JO., Muller K., Doudu KG, Minnaar A. Functional properties of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) flours and pastes as affected by  $\gamma$ -irradiation. *Food Chem.* 93: 103-111, 2005.
- [ 2] AFSSA. Bilan des connaissances relatives aux virus transmissibles à l'homme par voie orale. 2007.
- [ 3] ANZFA. Australian New Zealand Food Authority in Food Engineering and Ingredient, Irradiation of spices in Australia, 11 December 2001.
- [ 4] Arrêté du 20 août 2002 relatif aux denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation. JO le 6 septembre.
- [ 5] Audette-Stuart M., Houee-Levin C., Potier M. Radiation-induced protein fragmentation and inactivation in liquid and solid aqueous solutions. Role of OH and electrons. *Radiat. Phys. Chem.* 72:301-306, 2005.
- [ 6] Aziz,NH., Souzan, RM. and Sahin Azza, A. Effect of gamma-irradiation on the occurrence of pathogenic microorganisms and nutritive value of four principal cereal grains. *Appl. Radiat. Isot.* 64: 1555-1562, 2006.
- [ 7] Badr HM. Elimination of *Escherichia coli* O57:H7 and *Listeria monocytogenes* from raw beef sausage by  $\gamma$ -irradiation. *Mol. Nutr. Food Res.* 49: 343-349, 2005.
- [ 8] Balamatsia CC., Rogga K., Badeka A., Kontominas MG., Savvaidis IN. Effect of low-dose irradiation on microbiological, chemical, and sensory characteristics of chicken meat stored aerobically at 4°C. *J. Food Protection* 69: 1126-1133, 2006.
- [ 9] Bari ML., Nakauma M., Todoriki S., Juneja VK., Isshiki K., Kawamoto S. Effectiveness of irradiation treatments in inactivating *Listeria monocytogenes* on fresh vegetables at refrigeration temperature. *J. Food Protection* 68: 318-323, 2005.
- [ 10] Caillet S., Millette M., Turgis M., Salmieri S., Lacroix M. Influence of antimicrobial compounds and modified atmosphere packaging on radiation sensitivity of *Listeria monocytogenes* present in ready-to-eat carrots (*Daucus carota*). *J. Food Protection* 69: 221-227, 2006.
- [ 11] Choe E., Min DB. Chemistry and reactions of reactive oxygen species in foods. *J. Food. Sci.* 70: R142-R159, 2005.
- [ 12] Codex Alimentarius Commission. Recommended International Code of Practice for Radiation Processing of Food. CAC/RCP 19-1979, Rev. 2-2003.
- [ 13] Codex Alimentarius Commission. Norme générale Codex pour les denrées alimentaires irradiées. CODEX STAN 106-1983, REV. 1-2003.
- [ 14] Collins MV., Flick GJ., Smith SA., Fayer R., Rubendall E., Lindsay DS. The effects of E-beam irradiation and microwave energy on Eastern Oysters (*Crassostrea virginica*) experimentally infected with *Cryptosporidium parvum*. *J. Eukaryot Microbiol* 52:484-488, 2005.
- [ 15] Décret n° 70-392 du 8 mai 1970 modifié, portant application de la loi du 1er août 1905 modifiée sur les fraudes et falsifications en matière de produits ou de services en ce qui concerne le commerce des marchandises ionisées susceptibles de servir à l'alimentation de l'homme et des animaux.
- [ 16] Décret n°2001-1097 du 16 novembre 2001 relatif au traitement par ionisation des denrées destinées à l'alimentation humaine ou animale.
- [ 17] EC 1999. Directive 1999/2/CE du Parlement européen et du Conseil du 22 février 1999 relative au rapprochement des législations des Etats membres sur les denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation. JO L 066 du 13/03/1999 p. 0016-0023.
- [ 18] EC 2006. Rapport de la commission sur le traitement des denrées alimentaires par ionisation pour l'année 2004, 2006/C 230/08.
- [ 19] EFSA. Opinion of the Scientific Panel on food additives, flavourings, processing aids and materials in contact with food (AFC) on a request from the Commission related to Treatment of poultry carcasses with chlorine dioxide, acidified sodium chlorite, trisodium phosphate and peroxyacids. The EFSA Journal 297: 1-27, 2005.
- [ 20] EU Food Law. p. 8. June 8, 2007.

- [ 21] Fan X. Impact of ionizing radiation and thermal treatments on furan levels in fruit juices. *J. Food Sci.* 70: E409-E414, 2005.
- [ 22] Fan X., Sommers CH. Effect of gamma radiation on furan formation in ready-to-eat products and their ingredients. *J. Food Sci.* 71: C407-C412, 2006.
- [ 23] Fratianni F., Di Luccia A., Coppola R., Nazzaro F. Evaluation of mutagenic or antimutagenic properties in water and ethanolic extracts from fresh and irradiated *Tuber aestivum* black truffle. In Innovations in traditional foods. Pedro Filo & Fidel Toldra (Eds). Vol 1, pp. 439-442. London, Elsevier. 2005.
- [ 24] Gadgil P., Smith JS., Hachmeister KA., Kropf DH. Evaluation of 2-dodecylcyclobutanone as an irradiation dose indicator in fresh irradiated ground beef. *J. Agric. Food Chem.* 53:1890-1893, 2005.
- [ 25] Gadgil P., Smith JS. Metabolism by rats of 2-dodecylcyclobutanone, a radiolytic compound present in irradiated beef. *J. Agric. Food Chem.* 54:4896-4900, 2006.
- [ 26] Goldblith S.A. inhibition and destruction of the microbial cell by radiation in/Hugo WB, ed. *Inhibition and destruction of the microbial cell.* London, Academic Press, 1971 pp 285-305.
- [ 27] Grecz N, Rowley DB, Matsuyama A. the action of radiation on bacteria and viruses. In Josephson ES, Peterson MS, eds. *Preservation of food by ionizing radiation*, vol II. Boca Raton, FL, CRC Press, 1983.pp 167-218.
- [ 28] Hagiwara A., Yoshiro H., Sano M., Kawabe M., Tamano S., Sakaue K., Nakamura M., Tada M., Imaida K., Shirai T. Thirteen-week feeding study of thaumatin (a natural proteinaceous sweetener), sterilized by electron beam irradiation, in Sprague Dawley rats. *Food Chem. Toxicol.* 43:1297-1302, 2005.
- [ 29] Houser TA., Sebranek JG., Maisonet WN., Cordray JC., Wiegand BR., Ahn DU., Lee EJ. The effects of irradiation at 1.6 kGy on quality characteristics of commercially produced ham and pork frankfurters over extended storage. *J. Food Sci.* 70: S262-S265, 2005.
- [ 30] Horvatovich P., Miesch M., Hasselmann C., Delincée H., Marchioni E. Determination of monounsaturated alkyl side chain 2-alkylcyclobutanone in irradiated foods. *J. Agric. Food Chem.* 53:5836-5841, 2005.
- [ 31] Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food. Department of Health and Human Services. FDA. 21 CFR Part 119. Federal Register Vol. 70, No. 157. August 16 2005.
- [ 32] Irradiation in the Production, Processing, and Handling of Food. Department of Health and Human Services. FDA. 21 CFR Part 179. Federal Register Vol. 72, No. 67. April 9 2007.
- [ 33] Javanmard M., Rokni N., Bokaie S., Shahhosseini G. Effects of gamma irradiation and frozen storage on microbial, chemical and sensory quality of chicken meat in Iran. *Food Control* 17: 469-473, 2006.
- [ 34] Jo C., Lee N-Y., Kang H-J., Hong S-P., Kim Y-H., Kim J-K., Byun M-W. Inactivation of pathogens inoculated into prepared seafood products for manufacturing kimbab, steamed rice rolled in dried seaweed, by gamma irradiation. *J. Food Protection* 68: 396-402, 2005.
- [ 35] Jo C., Lee N-Y., Kang H., Hong S., Kim Y., Kim H-J., Byun M-W. Radio-sensitivity of pathogens in inoculated prepared foods of animal origin. *Food Microbiol.* 22: 329-336, 2005.
- [ 36] Kanatt SR., Chander R., Sharma A. Effect of radiation processing of lamb meat on its lipids. *Food Chem.* 97: 80-86, 2006.
- [ 37] Knoll N., Weise A., Claussen U., Sendt W., Marian B., Gleis M., Pool-Zobel BL. 2-Dodecylcyclobutanone, a radiolytic product of palmitic acid, is genotoxic in primary human colon cells and in cells from preneoplastic lesions. *Mut. Res. Fundam. Mol. Mech. Mutagen.* 594:10-19, 2006.
- [ 38] Lee JW, Oh SH, Kim JH, YooK HS and Byun MW. Gamma radiation sensitivity of *Enterobacter sakasaki* in dehydrated powder infant formula. *J. Food Protection.* 69: 1434-143, 2006
- [ 39] Lu Z., Yu Z., Gao X., Lu F., Zhang L. Preservation effects of gamma irradiation on fresh-cut celery. *J. Food Eng.* 67: 347-351, 2005.
- [ 40] Mayer-Miebach E., Stahl MR., Eschrig U., Deniaud L., Ehlermann DAE., Schuchmann HP. Inactivation of a non-pathogenic strain of *E. coli* by ionising radiation. *Food Control* 16: 701-705, 2005.



- [ 41] Mintier AM, Foley DM. Electron beam and gamma irradiation effectively reduces *Listeria monocytogenes* populations on chopped romaine lettuce. *J. Food Protection* 69: 570-574, 2006.
- [ 42] Nazzaro F., Fratianni F., Picariello G., Coppola R., Reale A., Di Luccia A. Evaluation of gamma rays influence on some biochemical and microbiological aspects in black truffles. *Sous press. Food Chem.* 2006. doi:10.1016/j.foodchem.2006.07.067
- [ 43] Niemira BA., Solomon EB. Sensitivity of planktonic and biofilm-associated *Salmonella spp.* to ionising radiation. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 2732-2736, 2005.
- [ 44] Obana H., Furuta M., Tanaka Y. Detection of 2-alkylcyclobutanone in irradiated meat, poultry and egg after cooking. *J. Health Sci.* 52: 375-382, 2006.
- [ 45] OMS. Les produits alimentaires ionisés : salubrité et valeur nutritive. Organisation Mondiale de la Santé, Genève. 1995.
- [ 46] Pezzutti A., Marucci PL., Sica MG., Matzkin MR., Croci CA. Gamma-ray sanitization of Argentinean dehydrated garlic (*Allium sativum* L.) and onion (*Allium cepa* L.) products. *Food Res. Int.* 38: 797-802, 2005.
- [ 47] Robertson CB., Andrews LS., Marshall DL., Coggins P., Schilling MW., Martin RE., Collette R. Effect of X-ray irradiation on reducing the risk of listeriosis in ready-to-eat vacuum-packaged smoked mullet. *J. Food Protection* 69: 1561-1564, 2006.
- [ 48] Rodriguez O., Castell-Perez ME., Ekpanyaskun N., Moreira RG., Castillo A. Surrogates for validation of electron beam irradiation of foods. *Int. J. Food Microbiol.* 110: 117-122, 2006.
- [ 49] Samelis J., Kakouri A., Savvaidis IN., Riganokos K., Kontominas MG. Use of ionizing radiation doses of 2 and 4 kGy to control *Listeria spp.* and *Escherichia coli* O157:H7 on frozen meat trimmings used for dry fermented sausage production. *Meat Sci.* 70: 189-195, 2005.
- [ 50] Saroj SD., Shashidhar R., Pandey M., Dhokave V., Hajare S., Sharma A., Bandekar JR. Effectiveness of radiation processing in elimination of *Salmonella thypimurium* and *Listeria monocytogenes* from sprouts. *J. Food Protection* 69: 1858-1864, 2006.
- [ 51] SCF. Revision of the opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of food (expressed on 4 April 2003). SCF/CS/NF/IRR/24 Final. 24 April 2003.
- [ 52] Sin DW-M., Wong Y-C., Yao MW-Y. Application of pentafluorophenyl hydrazine on detecting 2-dodecylcyclobutanone and 2-tetradecylcyclobutanone in irradiated chicken, pork and mangoes by gas chromatography-mass spectrometry. *Eur. Food Res. Technol.* 222: 674-680, 2006.
- [ 53] Schmidt HM., Palekar MP., Maxim JE., Castillo A. Improving the microbiological quality and safety of fresh-cut tomatoes by low-dose electron beam irradiation. *J. Food Protection* 69: 575-581, 2006.
- [ 54] Song H-P., Kim D-H., Jo C., Lee C-H., Kim K-S., Byun M-W. Effect of gamma irradiation on the microbiological quality and antioxidant activity of fresh vegetable juice. *Food Microbiol.* 23: 372-378, 2006.
- [ 55] Sommers CH., Mackay WJ. DNA damage-inducible gene expression and formation of 5-fluorouracil-resistant mutants in *Escherichia coli* exposed to 2-dodecylcyclobutanone. *J. Food Sci.* 70: C254-C257, 2005.
- [ 56] Sommers CH. Induction of micronuclei in human TK6 lymphoblasts by 2-dodecylcyclobutanone, a unique radiolytic product of palmitic acid. *J. Food. Sci.* 71: C281-C284, 2006.
- [ 57] Sommers CH., Boyd G. Elimination of *Listeria monocytogenes* from ready-to-eat turkey and cheese tortilla wraps using ionising radiation. *J. Food Protection* 68: 164-167, 2005.
- [ 58] Sommers CH., Boyd G. Variations in the radiation sensitivity of foodborne pathogens associated with complex ready-to-eat food products. *Radiat. Phys. Chem.* 75: 773-778, 2006.
- [ 59] Vanamata J., Cobb G., Turner ND., Lupton JR., Yoo KS., Pike LM., Patil BS. Bioactive compounds of grapefruit (*Citrus paradisi* cv. rio red) respond differently to postharvest irradiation, storage, and freeze frying. *J. Agric. Food Chem.* 53: 3980-3985, 2005.
- [ 60] Vibhakara HS., Manjunatha SS., Radhika M., Das Gupta DK., Bawa AS. Effect of gamma-irradiation in combination preservation technique for stabilizing high moisture spice based vegetables. *J. Food Sci. Technol.* 42: 434-438, 2005.

- [ 61] Vural A., Aksu H., Erkan ME. Low-dose irradiation as a measure to improve microbiological quality of Turkish raw meat ball (cig kofte). *Int. J. Food Sci. Technol.* 41: 1105-1107, 2006.
- [ 62] Wang Z., Ma Y., Zhao G., Liao X., Chen F., Wu J., Chen J., Hu X. Influence of gamma irradiation on enzyme, microorganism, and flavor of cantaloupe (*Cucumis melo* L.) juice. *J. Food Sci.* 71: M215-M220, 2006.
- [ 63] When H-W., Chung H-P., Chou F-I., Lin I-H., Hsieh P-C. Effect of gamma irradiation on microbial decontamination, and chemical and sensory characteristic of lycium fruit. *Radiat. Phys. Chem.* 75 : 596-603, 2006.
- [ 64] WHO. Wholesomeness of irradiated food. Report of a Joint FAO/AIEA/WHO Expert Committee. Technical Report Series No. 659, Geneva. 1981
- [ 65] WHO. Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food. Geneva, 1994.
- [ 66] WHO. High-dose Irradiation : Wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. WHO Technical Report Series No. 890, Geneva. 1999.
- [ 67] Wilkinson VM, Gould GW. Food irradiation. Reference guide. Oxford , Butterworth-Heinemann, 1996.
- [ 68] Yildirim I, Uzun S., Topuz A. Effect of gamma irradiation on some principle microbiological and chemical quality parameters of raw Turkish meat ball. *Food Control* 16: 363-367, 2005.
- [ 69] Yook H-S., Byun M-W., Song H-P., Lee J-W., Kim K-S., Kim K-H, Lee J-J., Kim D-H. Assurance on the genotoxicological safety of fermented vegetables pasteurised by gamma irradiation. *Food Sci. Biotechnol.* 14:137-142, 2005.

### **Remerciements**

Mlle. Anne Jonquieres pour le travail de recherche bibliographique.