

## FICHE 1

# Innovations technologiques pour réduire le gaspillage alimentaire et augmenter le temps de conservation des produits

Stéphane Salmieri, Agent de recherche

Monique Lacroix, Professeure titulaire

INRS – Centre Armand-Frappier Santé Biotechnologie

Février 2022 (Mise à jour: Août 2023)

## SOMMAIRE

<b>Introduction .....</b>	<b>3</b>
Situation et enjeux liés aux nouvelles technologies .....	3
Modèles d'économie circulaire .....	3
<b>I - Traitements non-thermiques .....</b>	<b>5</b>
Hautes pressions hydrostatiques (HPP) .....	5
Lumière pulsée .....	10
Ozone .....	14
Ultrasons .....	16
Irradiation UV .....	20
Irradiation gamma .....	25
Rayons X .....	32
NOTE 1 : Concept des traitements combinés (Hurdle technology) .....	39

<b>II - Emballages et enrobages bioactifs .....</b>	<b>43</b>
Emballages bioactifs .....	43
NOTE 2 : Emballages "intelligents" .....	45
NOTE 3 : Emballages biodégradables .....	46
Enrobages comestibles .....	50
<b>III - Antimicrobiens naturels .....</b>	<b>53</b>
Introduction .....	53
Huiles essentielles (HEs) .....	54
Bactériocines .....	58
Autres antimicrobiens naturels .....	60
<b>IV - Valorisation des sous-produits de l'industrie alimentaire .....</b>	<b>62</b>
Introduction .....	62
Composés naturels bioactifs extraits des sous-produits végétaux .....	64
Peptides bioactifs extraits des sous-produits de viande .....	65
Valorisation des déchets alimentaires : opportunités industrielles pour un développement durable .....	66
Bioplastiques et leurs additifs .....	72
<b>Qui sommes-nous – Les membres du groupe INRS-PROX .....</b>	<b>75</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>76</b>

## Introduction

### Situation et enjeux liés aux nouvelles technologies

De nos jours, il est urgent de développer des recherches en technologies alimentaires pour favoriser de nouvelles approches qui répondent aux demandes croissantes des consommateurs et aux tendances de l'industrie. Ces enjeux ont un impact important sur l'environnement, la sécurité alimentaire et la santé humaine car ils constituent une alternative importante aux procédés alimentaires conventionnels, aux matières plastiques et aux additifs alimentaires synthétiques déjà établis sur le marché, tout en valorisant les sous-produits des déchets de l'industrie agroalimentaire. La sécurité sanitaire des aliments est une préoccupation majeure car les systèmes alimentaires peuvent avoir effets néfastes sur la nutrition et la santé à travers les toxi-infections alimentaires, l'utilisation inconsidérée de produits agrochimiques, l'exposition aux pesticides et autres produits chimiques, la résistance aux antimicrobiens, etc. (Aworth, 2020).

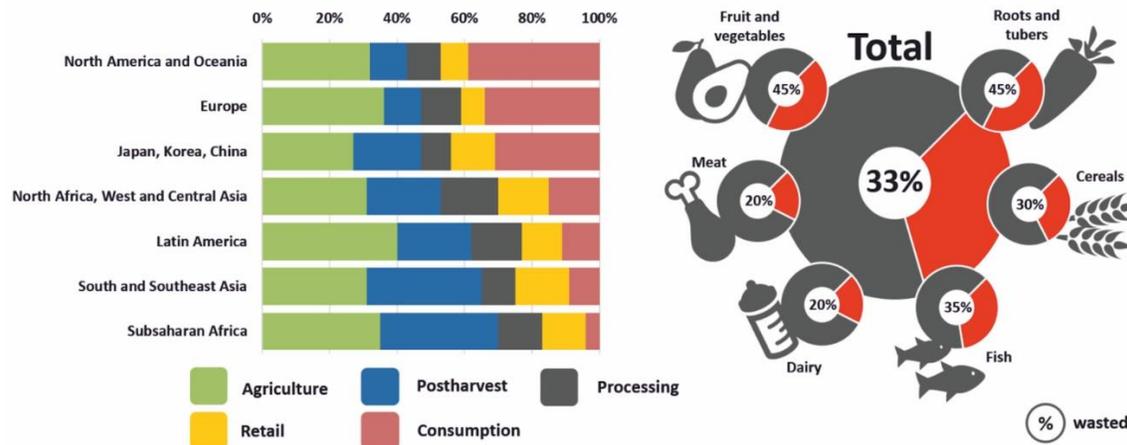
Auparavant, les consommateurs exigeaient des produits alimentaires microbiologiquement sûrs et stables. Aujourd'hui, ils recherchent des produits de meilleure qualité (sensorielle et nutritionnelle), moins d'additifs, à un coût raisonnable. En réponse à cette demande, les technologues en alimentation dans le monde universitaire, l'industrie alimentaire et le gouvernement conjuguent leurs efforts dans la recherche de technologies émergentes. L'objectif principal de l'utilisation de ces technologies est de réduire les dommages thermiques dans les aliments, qui sont générés par des températures élevées et de longs délais de traitement. La pasteurisation et la stérilisation sont les méthodes de conservation traditionnelles utilisées dans l'industrie alimentaire. Cependant, leurs effets peuvent avoir un impact négatif sur la qualité des produits, tels que des changements indésirables de saveur, de couleur, de texture et une diminution de la teneur en éléments nutritifs. En dehors des technologies thermiques (stérilisation, pasteurisation, micro-ondes, radiofréquences, chaleur ohmique), le 2<sup>ème</sup> groupe de technologies émergentes, appelé technologies non thermiques, présente les mêmes avantages que la chaleur, comme l'inactivation de micro-organismes ou d'enzymes tout en préservant la fraîcheur des aliments. Ces technologies impliquent par exemple les hautes pressions, les ultrasons, la lumière pulsée, l'irradiation (UV-C, gamma, rayons X), l'ozone, les emballages et enrobages bioactifs. Cette fiche thématique est une brève introduction aux technologies non thermiques émergentes les plus répandues et en couvre les principaux aspects (Barbosa-Canevas et Bermudez-Aguirre, 2008). Le lecteur pourra parcourir les références bibliographiques pour obtenir davantage de détails et d'exemples d'applications scientifiques et industrielles.

### Modèles d'économie circulaire

La question des pertes et gaspillages alimentaires représente un défi dans le monde entier. Par exemple, près de la moitié des fruits et légumes cultivés se perdent entre la production et la consommation, selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (FAO 2011) (**Fig. 1**). L'origine de ces pertes post-récolte peut être directe (pendant la récolte), une perte de qualité des aliments (ex. eau, sucre, altération physiologique, germination indésirable),

mais aussi au cours de la transformation, du transport et du stockage (contaminations par les moisissures et les bactéries) (Aulakh et Regmi 2013).

## Global food loss



**Figure 1** - Analyse des pertes alimentaires mondiales pour différentes régions et produits, basée sur les données fournies par la FAO (FAO 2011) (d'après Kusstatscher et al., 2020).

L'économie circulaire se définit comme un "système de production, d'échange et de consommation visant à optimiser l'utilisation des ressources à toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service, dans une logique circulaire, tout en réduisant l'empreinte environnementale et en contribuant au bien-être des individus et des collectivités" (source : Pôle québécois de concertation sur l'économie circulaire). L'objectif de l'économie circulaire est donc double et vise à :

1. **Repenser** nos modes de production et de consommation pour consommer moins de ressources et protéger les écosystèmes qui les génèrent;
2. **Optimiser** l'utilisation des ressources qui circulent déjà dans nos sociétés :
  - en utilisant les produits plus fréquemment,
  - en prolongeant la durée de vie des produits et des composants,
  - en donnant une nouvelle vie aux ressources.

L'économie circulaire propose un ensemble de stratégies et de modèles d'affaires qui optimisent l'utilisation des ressources. Dans ce contexte, il faut alors privilégier les boucles les plus courtes et les plus locales. Les bénéfices et retombées de ce modèle sont positives, parmi lesquels la création de richesses, un effet levier de croissance économique, l'innovation et l'apport de solutions durables au niveau environnemental. Au niveau alimentaire, les gouvernements des pays développés s'engagent à atteindre certains objectifs stratégiques de gestion et de

prévention de la production de déchets tels que la réduction du gaspillage alimentaire de 50% d'ici 2025, par rapport à son niveau de 2015 dans les domaines de la distribution alimentaire et de la restauration collective et de 50% d'ici 2030, par rapport à son niveau de 2015 dans les domaines de la production, de la transformation et de la restauration commerciale. En considérant ces objectifs, les nouvelles méthodes de conservation émergentes en production et transformation alimentaire prennent toute leur importance.

## Pour en savoir plus

### Références bibliographiques

Aulakh, J., & Regmi, A. (2013). Post-harvest food losses estimation -Development of consistent methodology. Retrieved from

[http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/meetings\\_and\\_workshops/GS\\_SAC\\_2013/Improving\\_methods\\_for\\_estimating\\_post\\_harvest\\_losses/Final\\_PHLs\\_Estimation\\_6-13-13.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/meetings_and_workshops/GS_SAC_2013/Improving_methods_for_estimating_post_harvest_losses/Final_PHLs_Estimation_6-13-13.pdf)

Aworh, O. C. (2021). Food safety issues in fresh produce supply chain with particular reference to sub-Saharan Africa. *Food Control*, 123. doi:10.1016/j.foodcont.2020.107737

Fassio, F., & Tecco, N. (2019). Circular Economy for Food: A Systemic Interpretation of 40 Case Histories in the Food System in Their Relationships with SDGs. *Systems*, 7(3). doi:10.3390/systems7030043

Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-Lehtonen, J., Korhonen-Kurki, K., Pietikäinen, J., Saikku, L., & Schösler, H. (2016). Transition towards Circular Economy in the Food System. *Sustainability*, 8(1). doi:10.3390/su8010069

Kusstatscher, P., Cernava, T., Abdelfattah, A., Gokul, J., Korsten, L., & Berg, G. (2020). Microbiome approaches provide the key to biologically control postharvest pathogens and storability of fruits and vegetables. *FEMS Microbiol Ecol*, 96(7). doi:10.1093/femsec/fiaa119

Narasimmalu, A., & Ramasamy, R. (2020). Food processing industry waste and circular economy (IOP Conference Series). Paper presented at the 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.

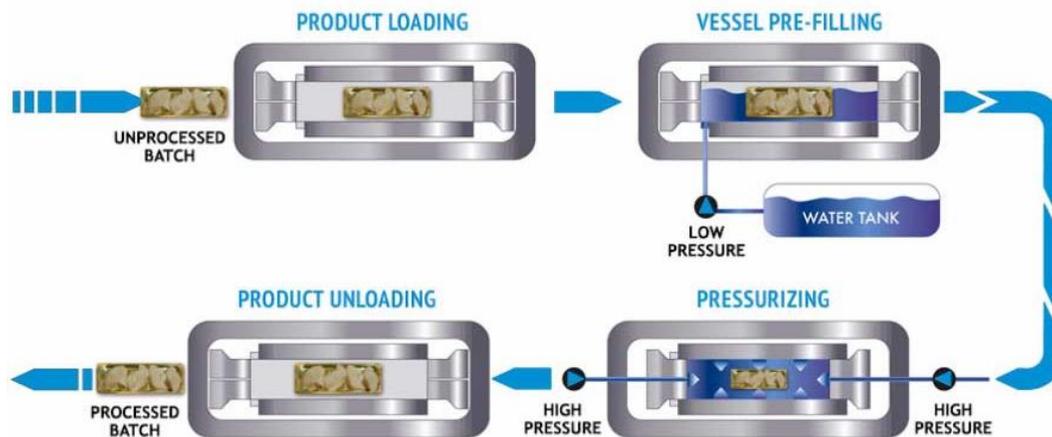
### Liens Internet

- <https://www.cbi.eu/market-information/processed-fruit-vegetables-edible-nuts/trendsfsieri>
- <https://www.youtube.com/watch?v=X6HDcubgxRk>
- <https://www.youtube.com/watch?v=BSNIJBWmdb4>
- [https://www.youtube.com/watch?v=xcARO\\_HfFi4](https://www.youtube.com/watch?v=xcARO_HfFi4)
- <https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/food-design-the-secret-ingredient-of-a-circular-economy>
- <https://greenfoodtech.com/en/programme/>
- <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/citoyens/mieux-consommer/gaspillage-alimentaire>
- <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/mieux-gerer/economie-circulaire>
- <http://www.fao.org/save-food/news-and-multimedia/news/news-details/en/c/1260068/>
- <https://www.rbcgam.com/en/ca/article/the-future-of-emerging-markets-food-production-health-sustainability/detail>

## I - Traitements non thermiques

### Hautes pressions hydrostatiques (HPP)

**Description.** Le traitement par hautes pressions hydrostatiques (High Pressure Processing, HPP; appelé aussi High Hydrostatic Pressure) est un procédé physique ayant pour but de décontaminer, à une température ambiante ou réfrigérée, des aliments (emballés dans un emballage souple et résistant) en y appliquant une très forte pression hydrostatique. La **Fig. 2** présente le principe simplifié du fonctionnement d'un équipement de HPP.



**Figure 2** – Principe simplifié du fonctionnement d'un équipement de HPP (d'après Lavigne, 2019), selon les séquences de chargement, de remplissage d'eau, de pressurisation et de déchargement.

### **Mode d'action**

1. Destruction de la membrane cellulaire entraînant la perte des constituants cellulaires.
2. Dénaturation irréversible des protéines entraînant le changement de la morphologie cellulaire.
3. Mort de la bactérie (Manas and Pagan 2005).

**Littérature scientifique et exemples d'applications.** Selon plusieurs études, le HPP a la capacité d'augmenter la durée de vie des produits marins traités (Hurtado et al. 2000). De plus, Gram et Huss (2000) ont rapporté que les poissons et fruits de mer sont généralement contaminés par les bactéries Gram (-), qui sont sensibles à la pression. Un traitement HPP doit être optimisé de façon à ne pas affecter la présence des microorganismes désirés. Les bactéries lactiques par exemple peuvent ne pas être affectées par le HPP. Cependant selon Hurtado et al. (2001), leur nombre peut être réduit et leur développement peut être retardé (Lopez-Caballero et al., 2000). Deliza et al. (2005) ont rapporté que les produits traités sous pression conservent les mêmes propriétés gustatives que les produits frais, ce qui rassure les consommateurs.

Le traitement par HPP génère plusieurs domaines d'applications, tels que la pascalisation, la stérilisation, le procédé de confisage-salage-imprégnation, la congélation/décongélation des produits. Plusieurs produits alimentaires peuvent être traités tels que les jambons, les rillettes, les

filets de poisson, les boissons. Dans les produits marins, ce procédé est utilisé surtout pour décortiquer les crustacés (surtout le homard) et pour enlever les coquilles des mollusques.

### **Avantages**

- Prolonge la durée de vie des aliments (le nombre de séquences HPP dépend de la composition de la matrice alimentaire).
- Assure l'innocuité des aliments.
- Procédé clean label (ne fait pas partie de la liste d'ingrédients).
- Diminue les pertes et assure un meilleur contrôle de l'inventaire.
- Traite une large gamme de produits.
- Conserve le goût et les vitamines des aliments.
- N'évoque pas d'aspect négatif chez le consommateur.

### **Inconvénients**

- Ne détruit pas les toxines. Les spores bactériennes sont très résistantes aux pressions.
- Coût d'investissement élevé (budget de 1.5 à 3 M\$ à prévoir). Il faut donc prévoir une quantité importante de produits à traiter et éventuellement en diversifier l'utilisation pour amortir les frais fixes.

**Réglementation.** Chaque industriel qui désire commercialiser un produit pasteurisé doit faire une demande auprès de Santé Canada en prouvant que le procédé est capable d'assurer l'innocuité de l'aliment. Ainsi, des analyses microbiologiques et toxicologiques seront nécessaires. L'ACIA exige également une preuve que le matériau d'emballage convient à l'utilisation du procédé.

### **Principaux fournisseurs d'équipements HPP – Accessibilité à des installations**

- American Pasteurization Company (APC) : <https://www.americanpasteurizationcompany.com/>
- Bao Tou KeFa High Pressure Technology Co., Inc. : <http://www.btkf.com/html/ywsy.html>
- Centre de Développement Bioalimentaire du Québec (CDBQ) : <http://www.cdbq.net/incubateur-bioalimentaire/>
- Centre de Recherche en Sciences et Technologies du Lait (STELA) : <https://stela.ulaval.ca/>
- Elmhurst Research : <https://www.facebook.com/Elmhurst-ResearchElmhurst-Systems-401333802783/>
- Hiperbaric Corporation: <https://www.hiperbaric.com/en/>
- Impress Foods S.E.C. : <https://www.alimentsimpress.com/a-propos/>
- JBT-Avure Technologies Inc. : <https://www.jbtc.com/foodtech/products-and-solutions/solutions/high-pressure-processing>
- John Bean Technologies Corporation (JBTC) : <https://www.jbtc.com/foodtech/products-and-solutions/solutions/high-pressure-processing>
- McGill University – Department of Food Science and Agricultural Chemistry : <https://www.mcgill.ca/foodscience/high-pressure-microwave-processing>
- Multivac : <https://ca.multivac.com/fr/solutions/produits/categories/hpp-traitement-haute-pression-des-produits-alimentaires/installations-hpp/#>

- Naturel HPP : <https://www.naturelhpp.com/>
- Universal Pure : <https://universalpure.com/>

## Pour en savoir plus

### *Références bibliographiques*

Agregán, R., Munekata, P. E. S., Zhang, W., Zhang, J., Pérez-Santaescolástica, C., & Lorenzo, J. M. (2021). High-pressure processing in inactivation of Salmonella spp. in food products. *Trends in Food Science & Technology*, 107, 31-37. doi:10.1016/j.tifs.2020.11.025

Archana, A. K., & Geeta Lekshmi, P. R. (2020). High pressure processing of fruits and vegetables: A review. *Agricultural Reviewers*, 41(4), 347-355.

Balakrishna, A. K., Wazed, M. A., & Farid, M. (2020). A Review on the Effect of High Pressure Processing (HPP) on Gelatinization and Infusion of Nutrients. *Molecules*, 25(10). doi:10.3390/molecules25102369

Cacace, F., Bottani, E., Rizzi, A., & Vignali, G. (2020). Evaluation of the economic and environmental sustainability of high pressure processing of foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60. doi:10.1016/j.ifset.2019.102281

Fam, S. N., Khosravi-Darani, K., Massoud, R., & Massoud, A. (2020). High-Pressure Processing in Food. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(4), 11553-11561. doi:10.33263/briac114.1155311561

Govaris, A., & Pexara, A. (2021). Inactivation of Foodborne Viruses by High-Pressure Processing (HPP). *Foods*, 10(2). doi:10.3390/foods10020215

Gram, L., & Huss, H. H. (2000). Fresh and processed fish and shellfish. In B. M. Lund, T. C. Baird-Parker, & G. W. Gould (Eds.), *Microbiological safety and quality of food* (Vol. 1, pp. 472-506). Gaithersburg, Maryland, USA: Aspen Publishers, Inc.

Hu, Y.-H., Wang, C.-Y., & Chen, B.-Y. (2020). Effects of high-pressure processing and thermal pasteurization on quality and microbiological safety of jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) juice during cold storage. *J. Food Sci. Technol.*, 57(9), 3334-3344.

Humaid, S. A. (2020). High pressure processing of sous-vide lobster (*Homarus americanus*) tails. (PhD Electronic theses and Dissertations). University of Maine, Retrieved from <https://digitalcommons.library.umaine.edu/etd> (3266)

Hurtado, J. L., Montero, P., & Borderias, A. J. (2000). Extension of shelf life of chilled hake (*Merluccius capensis*) by high pressure. *Food Sci. Tech. Int.*, 6(3), 243-249.

Hurtado, J. L., Montero, P., & Borderias, J. (2001). Chilled storage of pressurized octopus (*Octopus vulgaris*) muscle. *J. Food Sci.*, 66(3), 400-406.

Kinross, B., & Fielding, M. (2009). HPP: High-Pressure Processing. Retrieved from <https://slidetodoc.com/hpp-highpressure-processing-host-bill-kinross-publisher-meetingplace/>

Lavigne, C. (2019). La conservation des aliments par le procédé à haute pression hydrostatique. *Nutrition Science en évolution: La revue de l'Ordre professionnel des diététistes du Québec*, 16(3). doi:10.7202/1059217ar

Modugno, C., Loupiac, C., Bernard, A., Jossier, A., Neiers, F., Perrier-Cornet, J.-M., & Simonin, H. (2018). Effect of high pressure on the antimicrobial activity and secondary structure of the bacteriocin nisin. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 47, 9-15.

- Núñez, M., Calzada, J., & Olmo, A. d. (2020). High pressure processing of cheese: Lights, shadows and prospects. *International Dairy Journal*, 100. doi:10.1016/j.idairyj.2019.104558
- Paciulli, M., Ganino, T., Medina Mesa, I. G., Rinaldi, M., Rodolfi, M., Morbarigazzi, M., & Chiavaro, E. (2021). High pressure and thermal processing on the quality of zucchini slices. *European Food Research and Technology*, 247, 475-484. doi:10.1007/s00217-020-03640-7
- Petrus, R., Churey, J., & Worobo, R. (2020). High-pressure processing of apple juice: the most effective parameters to inactivate pathogens of reference. *British Food Journal*, 122(12), 3969-3979. doi:10.1108/BFJ-03-2020-0178
- Pou, K. R. J., & Raghavan, V. (2020). Recent Advances in the Application of High Pressure Processing-Based Hurdle Approach for Enhancement of Food Safety and Quality. *Journal of Biosystems Engineering*, 45(3), 175-187. doi:10.1007/s42853-020-00059-6
- Raghubeer, E. V. (2007). The effects of HPP on meat. Retrieved from <https://universalpure.com/wp-content/uploads/2017/08/Avure-HPP-Meat-White-Paper.pdf>
- Santos Inacio, A. R. (2019). Effect of high-pressure as a non-thermal pasteurisation technology for raw ewes' milk and cheese safety and quality: Case study on Serra da Estrela cheese. (PhD). Universidade Catolica Portuguesa, Porto.
- Shinwari, K. J., & Rao, P. S. (2020). Development of a reduced-calorie high pressure processed sapodilla (*Manilkara zapota* L.) jam based on rheological, textural, and sensory properties. *J. Food Sci.*, 85(9), 2699-2710. doi:10.1111/1750-3841.15364
- Wang, C., Yin, H., Zhao, Y., Zheng, Y., Xu, X., & Yue, J. (2021). Optimization of high hydrostatic pressure treatments on soybean protein isolate to improve its functionality and evaluation of its application in yogurt. *Foods*, 10, 667. doi:10.3390/foods10030667
- Zhang, F., Chai, J., Zhao, L., Wang, Y., & Liao, X. (2021). The impact of N<sub>2</sub>-assisted high-pressure processing on the microorganisms and quality indices of fresh-cut bell peppers. *Foods*, 10, 508. doi:10.3390/foods 10030508

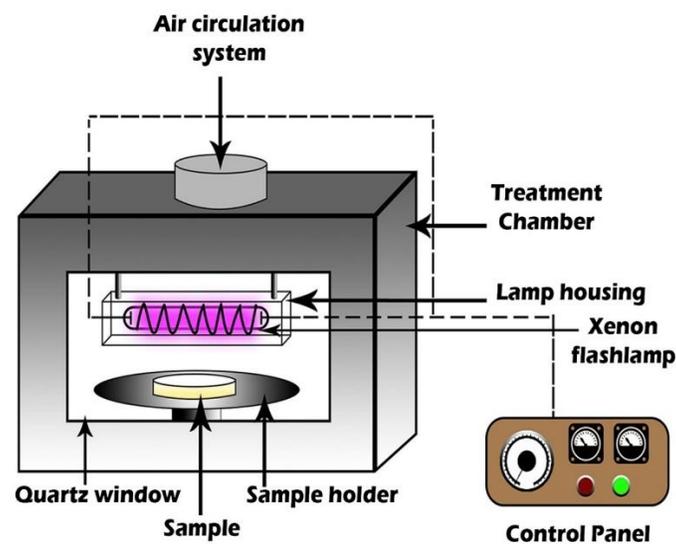
### **Liens Internet**

- <https://www.food-safety.com/articles/1583-advances-in-food-safety-technology-including-high-pressure-processing-hpp-and-pasteurization>
- <https://www.alimentsimpress.com/a-propos/>
- <https://apfoodonline.com/industry/growing-applications-of-hpp-for-dairy-products/>
- <http://www.cdbq.net/publication-procede-hpp/>
- <http://www.naturelhpp.com/portfolio-posts/etude-de-cas-no-3/>
- <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/12/10/2142872/0/en/Global-high-pressure-processing-HPP-food-market-size-to-witness-remunerative-growth-through-2025.html>
- <https://www.dogsnaturallymagazine.com/hpp-dog-food/>
- <https://www.food-safety.com/articles/6127-high-pressure-processing-during-drying-of-fermented-sausages-to-enhance-safety-and-stability?v=preview>
- <https://www.foodengineeringmag.com/articles/96668-high-pressure-processing-helps-keep-products-fresh-without-preservatives>
- [https://plus.lapresse.ca/screens/6ca4db51-bebd-472e-9516-80ae1b7de93c\\_7C\\_0.html](https://plus.lapresse.ca/screens/6ca4db51-bebd-472e-9516-80ae1b7de93c_7C_0.html)
- <https://inspection.canada.ca/controles-preventifs/haute-pression-hydrostatique/fra/1498504011314/1498504256677>
- <https://www.sciencedirect.com/book/9780128164051/present-and-future-of-high-pressure-processing>
- <https://smartagripost.com/an-overview-of-high-pressure-processing/>
- <https://lafoodiescientifique.com/tripler-la-duree-de-conservation-des-aliments-grace-a-la-pression-de-leau/?fbclid=IwAR1OLvhqV7jWI20Opk6PLX9dnkC6Ng3ChCgXOQiRkrrVD4z4r61BXeJ-EVw>
- <https://www.youtube.com/watch?v=lc0n96Uspuc>

- [https://www.youtube.com/watch?v=koa\\_M6e9qKE](https://www.youtube.com/watch?v=koa_M6e9qKE)
- <https://www.hiperbaric.com/en/high-pressure/>

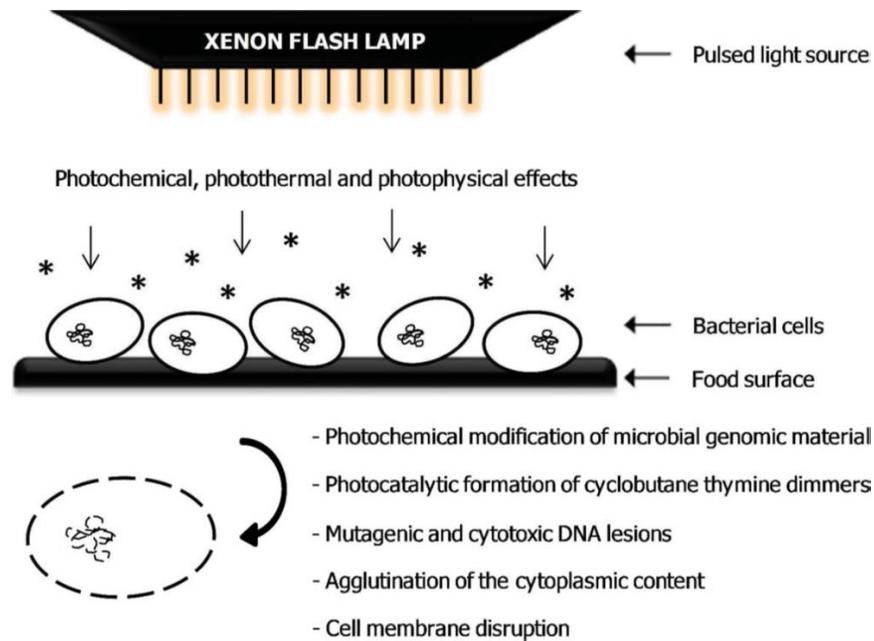
### Lumière pulsée

**Description.** La lumière pulsée est une technologie émergente de décontamination microbiologique utilisant la lumière blanche (180 à 1100 nm) sous impulsions flash (0.3 ms/2 mégawatts). Ce procédé physique permet d'inhiber les bactéries, levures, virus et moisissures à un niveau industriel (40 000 unités/h). L'équipement (**Fig. 3**) est généralement composé d'un châssis électronique (contrôle du flash), d'un refroidisseur (régulation de la température de la lampe) et d'un module optique (clignotement de l'objet). Le temps entre le signal d'entrée et l'émission du flash est inférieur à 1 ms. Selon l'application, le module optique peut contenir une ou plusieurs lampes. Ce mode de fonctionnement pulsé permet d'obtenir instantanément l'énergie de surface germicide requise (quelques mégawatts pour chaque impulsion).



**Figure 3** – Diagramme schématique d'une installation expérimentale de décontamination d'aliments à l'aide d'une source de lumière pulsée (d'après Marangoni Junior et al., 2020).

**Mode d'action.** La lumière pulsée combine 2 effets : i) photo-thermique et ii) photo-chimique (**Fig. 4**). La partie visible du rayonnement affecte la membrane cellulaire par un pic de température et de pression (éruption membranaire) et la partie UV fragmente les liaisons nucléiques AT-GC à partir de l'ADN du micro-organisme (lyse induisant la libération de composants vitaux intracellulaires).



**Figure 4** – Mécanisme d'inactivation microbienne par la lumière pulsée (d'après Pinela et Ferreira, 2017).

**Littérature scientifique et exemples d'applications.** Plusieurs études ont exploré la possibilité d'utiliser le traitement par lumière pulsée comme méthode alternative pour l'inactivation de la croissance microbienne dans les systèmes alimentaires, afin d'optimiser les paramètres de fonctionnement. Gómez-Lopez et al. (2000) ont montré que les aliments riches en glucides tels que les fruits et légumes semblent plus adaptés à la décontamination par des impulsions lumineuses intenses. De nouvelles données relatives à une augmentation du taux de respiration et de la durée de conservation des légumes peu transformés ont été fournies après traitement. Huffman et al. (2000) ont signalé que leur système de lumière pulsée étudié dépassait les exigences énoncées dans la norme et le protocole du guide de l'Environmental Protection Agency (EPA) pour un purificateur d'eau microbiologique en inactivant plus de 7 log de bactéries et 4 log de virus. Kaack et Lyager (2007) ont comparé l'efficacité du lavage conventionnel avec l'effet des impulsions de lumière blanche de haute intensité sur le taux de mortalité de *Saccharomyces cerevisiae* inoculé sur des tranches de carottes en tant qu'organisme modèle à température ambiante en augmentant le temps et les passes d'impulsion. Ils ont observé que la majeure partie des cellules de levure (6 log) était tuée à l'aide de deux impulsions lumineuses de haute intensité ( $0.7 \text{ J/cm}^2$ ). Marquenie et al. (2003a; 2003b) ont étudié l'utilisation de la lumière blanche pulsée pour inactiver les conidies de *Botrytis cinerea* et de *Monilia fructigena* dans les fraises et les cerises douces. La méthode comprenait des impulsions de  $30 \mu\text{s}$  à une fréquence de 15 Hz dans un temps variant de 1 à 250 s. Dans un deuxième temps, des traitements par lumière pulsée ont été combinés avec des procédés UV-C et thermiques. Bien qu'aucune inactivation complète n'ait pu être obtenue avec la lumière pulsée uniquement, une inactivation de 3-4 unités logarithmiques a été observée et le taux de mortalité a augmenté avec l'intensité lumineuse. MacGregor et al.

(1998) ont évalué les effets d'émissions lumineuses de haute intensité produites par une source de lumière pulsée sur la survie de populations bactériennes prédéterminées d'*Escherichia coli* O157:H7 et de *Listeria monocytogenes* répandues sur la surface de Tryptone Soya Agar (TSA). L'ensemble de test utilisé pour les expériences se composait d'un boîtier rectangulaire en PVC, d'un générateur d'impulsions et de circuits de commutation et de commande associés, comme illustré à la **Fig. 3**. En utilisant cette approche, de nombreux mégawatts de puissance électrique de pointe ont été émis en un temps extrêmement court (environ 1  $\mu$ s). Les échantillons ont ensuite été soumis à une série d'impulsions lumineuses (plage spectrale de 200 à 530 nm) avec un temps d'exposition de 1 à 512  $\mu$ s. Les résultats ont montré que seulement 64 impulsions lumineuses d'une durée de 1  $\mu$ s étaient nécessaires pour réduire *E. coli* O157:H7 de 99.9 % (6 log au niveau d'exposition supérieur) et *L. monocytogenes* de 99 % (7 log au niveau d'exposition supérieur) niveau d'exposition), suggérant ainsi qu'*E. coli* était moins résistant aux effets mortels des rayonnements. Il était également intéressant de noter que ces populations bactériennes étaient réduites par les émissions de lumière pulsée avec des temps d'exposition inférieurs de 4 à 6 ordres de grandeur à ceux requis par les sources de lumière UV.

Cette technologie a été utilisée avec succès dans de nombreuses applications telles que la stérilisation des liquides alimentaires, le traitement des solides et des surfaces, des contenants en plastique, des emballages et particulièrement dans la décontamination des aliments à travers leurs emballages (Mandal et al., 2020).

### **Avantages**

- N'émet aucun déchet, aucun produit chimique.
- Ne consomme pas d'eau.
- Coûts énergétiques très faibles par rapport aux méthodes chimiques.
- Traitements effectués par voie sèche sans contact.
- Bonne reproductibilité.
- Système compact pouvant être facilement intégré dans une usine et les coûts de production restent faibles.

### **Principaux fournisseurs d'équipements de lumière pulsée – Accessibilité à des installations**

- Cintech Agroalimentaire : <https://www.cintech.ca/recherche-developpement>
- Claranor : <https://www.claranor.com/>
- LOEHRKE (Jürgen Löhcke GmbH) : <https://www.loehrke.com/en/products/cleaning/pulsed-light-technology/>
- McGill University – Department of Food Science and Agricultural Chemistry : <https://www.mcgill.ca/foodscience/>
- Phoxene : <https://www.phoxene.com/category/applications/pulsed-light-sterilization/>
- Sterixene : <https://www.sterixene.com/>
- Wek-Tec e. K. : <http://www.wek-tec.de/>
- Xenon Corporation : <https://xenoncorp.com/>

## Pour en savoir plus

### *Références bibliographiques*

Andreou, V., Sigala, A., Limnaios, A., Dimopoulos, G., & Taoukis, P. (2021). Effect of pulsed electric field treatment on the kinetics of rehydration, textural properties, and the extraction of intracellular compounds of dried chickpeas. *J Food Sci*, 86(6), 2539-2552. doi:10.1111/1750-3841.15768

Cao, X., Huang, R., & Chen, H. (2019). Evaluation of Food Safety and Quality Parameters for Shelf Life Extension of Pulsed Light Treated Strawberries. *J Food Sci*, 84(6), 1494-1500. doi:10.1111/1750-3841.14613

Cassar, J. R., Bright, L. M., Patterson, P. H., Mills, E. W., & Demirci, A. (2021). The efficacy of pulsed ultraviolet light processing for table and hatching eggs. *Poult Sci*, 100(3), 100923. doi:10.1016/j.psj.2020.12.021

Dunn, J. (1996). Pulsed light and pulsed electric field for foods and eggs. *Poult Sci*, 75(9), 1133-1136. doi:10.3382/ps.0751133

Emanuel, E., Dubrovin, I., Pogreb, R., Pinhasi, G. A., & Cahan, R. (2021). Resuscitation of Pulsed Electric Field-Treated *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas putida* in a Rich Nutrient Medium. *Foods*, 10(3). doi:10.3390/foods10030660

FDA. (2009). Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies - Pulsed electric fields. USA Retrieved from <http://www.wek-tec.de/wt-technologies/FDA-on-PEF-Rev2009.pdf>

Huffman, D. E., Slifco, T. R., Salisbury, K., & Rose, J. B. (2000). Inactivation of bacteria, virus and *Cryptosporidium* by a point-of-use device using pulsed broad spectrum white light. *Wat. Res.*, 34(9), 2491-2498.

John, D., & Ramaswamy, H. S. (2020). Comparison of pulsed light inactivation kinetics and modeling of *Escherichia coli* (ATCC-29055), *Clostridium sporogenes* (ATCC-7955) and *Geobacillus stearothermophilus* (ATCC-10149). *Curr Res Food Sci*, 3, 82-91. doi:10.1016/j.crfs.2020.03.005

Kaack, K., & Lyager, B. (2006). Treatment of slices from carrot (*Daucus carota*) using high intensity white pulsed light. *European Food Research and Technology*, 224(5), 561-566. doi:10.1007/s00217-006-0332-y

MacGregor, S. J., Rowan, N. J., McIlvaney, L., Anderson, J. G., Fouracre, R. A., & Farish, O. (1998). Light inactivation of food-related pathogenic bacteria using a pulsed power source. *Letters in Applied Microbiology*, 27, 67-70.

Mandal, R., Mohammadi, X., Wiktor, A., Singh, A., & Pratap Singh, A. (2020). Applications of Pulsed Light Decontamination Technology in Food Processing: An Overview. *Applied Sciences*, 10(10). doi:10.3390/app10103606

Marangoni Júnior, L., Cristianini, M., & Anjos, C. A. R. (2020). Packaging aspects for processing and quality of foods treated by pulsed light. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(11). doi:10.1111/jfpp.14902

Marquenie, D. (2003). Combinations of pulsed white light and UV-C or mild heat treatment to inactivate conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilia fructigena*. *International Journal of Food Microbiology*, 85(1-2), 185-196. doi:10.1016/s0168-1605(02)00538-x

Marquenie, D., Michiels, C. W., Van Impe, J. F., Schrevels, E., & Nicolaï, B. N. (2003). Pulsed white light in combination with UV-C and heat to reduce storage rot of strawberry. *Postharvest Biology and Technology*, 28(3), 455-461. doi:10.1016/s0925-5214(02)00214-4

Nowosad, K., Sujka, M., Pankiewicz, U., & Kowalski, R. (2021). The application of PEF technology in food processing and human nutrition. *J Food Sci Technol*, 58(2), 397-411. doi:10.1007/s13197-020-04512-4

Sholtes, K., & Linden, K. G. (2019). Pulsed and continuous light UV LED: microbial inactivation, electrical, and time efficiency. *Water Res*, 165, 114965. doi:10.1016/j.watres.2019.114965

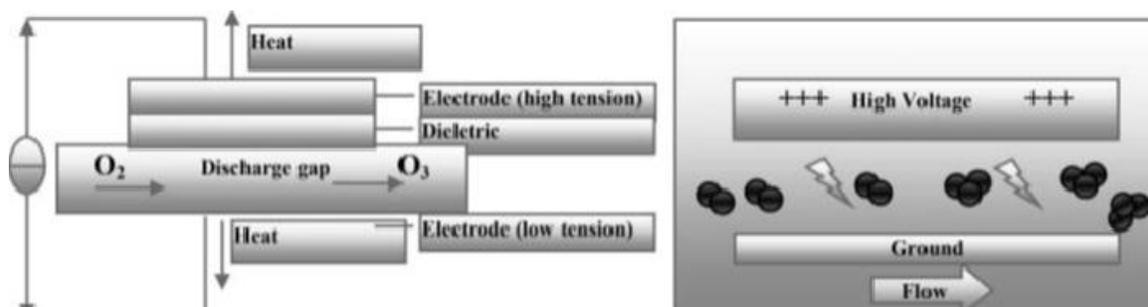
### Liens Internet

- [https://xenoncorp.com/about/pulsed-light/?gclid=EAlalQobChMI8IWt9NO88AIVnPbjBx3QWAspEAYASAAEgLSLfd\\_BwE](https://xenoncorp.com/about/pulsed-light/?gclid=EAlalQobChMI8IWt9NO88AIVnPbjBx3QWAspEAYASAAEgLSLfd_BwE)
- [https://books.google.ca/books?id=WktnDwAAQBAJ&pg=PT289&lpg=PT289&dq=%22Nonthermal+food+processes:+Pulsed+electric+fields,+pulsed+light,+high+hydrostatic+pressure,+and+ionizing+radiation+%22&source=bl&ots=tfHIRAWR0A&sig=ACfU3U2doCzrFkq-7xLb1jNmEXcRDBAv\\_g&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKewiB5e-WlbrwAhWIGFkFHTdsBD0Q6AEwAnoECAIQAw#v=onepage&q=%22Nonthermal%20food%20processes%3A%20Pulsed%20electric%20fields%2C%20pulsed%20light%2C%20high%20hydrostatic%20pressure%2C%20and%20ionizing%20radiation%20%22&f=false](https://books.google.ca/books?id=WktnDwAAQBAJ&pg=PT289&lpg=PT289&dq=%22Nonthermal+food+processes:+Pulsed+electric+fields,+pulsed+light,+high+hydrostatic+pressure,+and+ionizing+radiation+%22&source=bl&ots=tfHIRAWR0A&sig=ACfU3U2doCzrFkq-7xLb1jNmEXcRDBAv_g&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKewiB5e-WlbrwAhWIGFkFHTdsBD0Q6AEwAnoECAIQAw#v=onepage&q=%22Nonthermal%20food%20processes%3A%20Pulsed%20electric%20fields%2C%20pulsed%20light%2C%20high%20hydrostatic%20pressure%2C%20and%20ionizing%20radiation%20%22&f=false)
- <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:oaum4tp44QcJ:https://www.meatingplace.com/Industry/TechnicalArticles/Details/93155%20&cd=7&hl=fr&ct=clnk&gl=ca>
- [https://www.agrireseau.net/documents/Document\\_102104.pdf](https://www.agrireseau.net/documents/Document_102104.pdf)
- <https://www.sterixene.com/actualites/la-decontamination-par-lumiere-pulsee-des-aliments-que-dit-l-anse>

## Ozone

### Description

Le traitement à l'ozone est efficace sur l'inactivation des micro-organismes pathogènes et de détérioration, tout en maintenant les propriétés nutritionnelles et sensorielles pour un large éventail de produits alimentaires. Les générateurs d'ozone sont basés sur la technologie de décharge corona. Le principe de cette méthode consiste à faire passer un gaz exempt de poussière et d'huile contenant de l'oxygène (ou l'oxygène lui-même) à travers l'espace d'un champ électrique à haute énergie, entre deux électrodes séparées par un matériau diélectrique (généralement en verre). Une électrode est mise à la terre tandis que l'autre est diélectrique. L'important est de contrôler la température du gaz traité car l'ozone peut être décomposé par chauffage, suite à une réaction endothermique. D'où la nécessité d'utiliser un système de refroidissement afin de prévenir cette décomposition (**Fig. 5**).



**Figure 5** – Schéma de la technologie de décharge corona permettant la production contrôlée d'ozone (d'après Brodowska et al., 2018).

**Mode d'action.** L'ozone (O<sub>3</sub>) est une forme allotropique de l'oxygène (O<sub>2</sub>), et il est reconnu comme étant l'un des oxydants les plus puissants. C'est un agent antimicrobien efficace qui convient à une large gamme d'applications alimentaires, qu'il soit à l'état gazeux ou aqueux. L'ozone moléculaire et ses produits de décomposition (ex : radicaux hydroxyle) inactivent rapidement les micro-organismes en réagissant avec les enzymes intracellulaires, le matériel nucléaire et les composantes de leur enveloppe cellulaire, les enveloppes de spores ou les capsides virales (Khadre et al., 2001).

**Littérature scientifique et exemples d'applications.** La multifonctionnalité de l'ozone en fait un agent prometteur dans la transformation des aliments (Zhao et al., 2018). Il est efficace contre les bactéries Gram+ et Gram-, les champignons, les levures et les spores (Khadre et al., 2001). Il a été signalé que l'ozone est 1.5 fois plus efficace que le chlore, puisqu'il a permis une réduction mais aussi une inhibition d'un grand nombre de micro-organismes par rapport au chlore. Graham a également signalé que l'efficacité de l'ozone est 3000 fois plus rapide que celle du chlore sans produire de sous-produits dangereux après décomposition. De plus, l'ozone a permis d'inhiber bactéries, moisissures, levures, parasites et virus, par conséquent, montrant un large spectre bactéricide. En effet, l'ozone gazeux n'est pas toxique lorsqu'il est utilisé à faible concentration.

#### **Avantages**

- L'excès d'ozone se décompose automatiquement et rapidement pour produire de l'oxygène et ne laisse ainsi aucun résidu dans les aliments.
- A reçu la désignation GRAS (Generally Recognized As Safe) de la Food and Drug Administration (FDA), qui a approuvé le contact direct de O<sub>3</sub> avec les produits alimentaires.
- Classé comme désinfectant pour l'industrie alimentaire aux USA, en particulier pour les bonnes pratiques de fabrication (BPF; en anglais GMP) associée aux traitements d'eau en bouteille.

#### **Principaux fournisseurs d'équipements d'ozonation – Accessibilité à des installations**

- A2Z Ozone : <https://www.a2zozone.com/>
- CrystalAir : <http://www.ozone.ca/>
- Evoqua Water Technologies LLC : <https://www.evoqua.com/en/evoqua/products--services/disinfection-systems/ozone-systems/>
- Laboratoires RESALA – INRS Centre Armand-Frappier : <http://www.labo-resala.com/>
- McGill University – Department of Food Science and Agricultural Chemistry : <https://www.mcgill.ca/foodscience/>
- Oxidation Technologies, LLC : <https://www.oxidationtech.com/>
- Ozone Innovations Inc. : <http://www.quebecentreprises.com/ozone-innovations-inc-sjby/>
- Ozone Safe Food Technologies Inc : <http://www.ozonesafefood.com/>
- Ozone Solutions : <https://ozonesolutions.com/>
- Solution Ozone : <https://www.solutionozone.com/>

**Pour en savoir plus**

### **Références bibliographiques**

Baggio, A., Marino, M., Innocente, N., Celotto, M., & Maifreni, M. (2020). Antimicrobial effect of oxidative technologies in food processing: an overview. *European Food Research and Technology*, 246(4), 669-692. doi:10.1007/s00217-020-03447-6

Brodowska, A. J., Nowak, A., & Smigielski, K. (2018). Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 58(13), 2176-2201. doi:10.1080/10408398.2017.1308313

Pandiselvam, R., Kaavya, R., Jayanath, Y., Veenuttranon, K., Lueprasitsakul, P., Divya, V., . . . Ramesh, S. V. (2020). Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods—a review. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 38-54. doi:10.1016/j.tifs.2019.12.017

Sarron, E., Gadonna-Widehem, P., & Aussenac, T. (2021). Ozone Treatments for Preserving Fresh Vegetables Quality: A Critical Review. *Foods*, 10(3). doi:10.3390/foods10030605

Sivaranjani, S., Prasath, V. A., Pandiselvam, R., Kothakota, A., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Recent advances in applications of ozone in the cereal industry. *Lwt*, 146. doi:10.1016/j.lwt.2021.111412

Zhang, H., Li, K., Zhang, X., Dong, C., Ji, H., Ke, R., . . . Chen, C. (2020). Effects of ozone treatment on the antioxidant capacity of postharvest strawberry. *RSC Advances*, 10(63), 38142-38157. doi:10.1039/d0ra06448c

Zhao, Y. M., de Alba, M., Sun, D. W., & Tiwari, B. (2019). Principles and recent applications of novel non-thermal processing technologies for the fish industry-a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 59(5), 728-742. doi:10.1080/10408398.2018.1495613

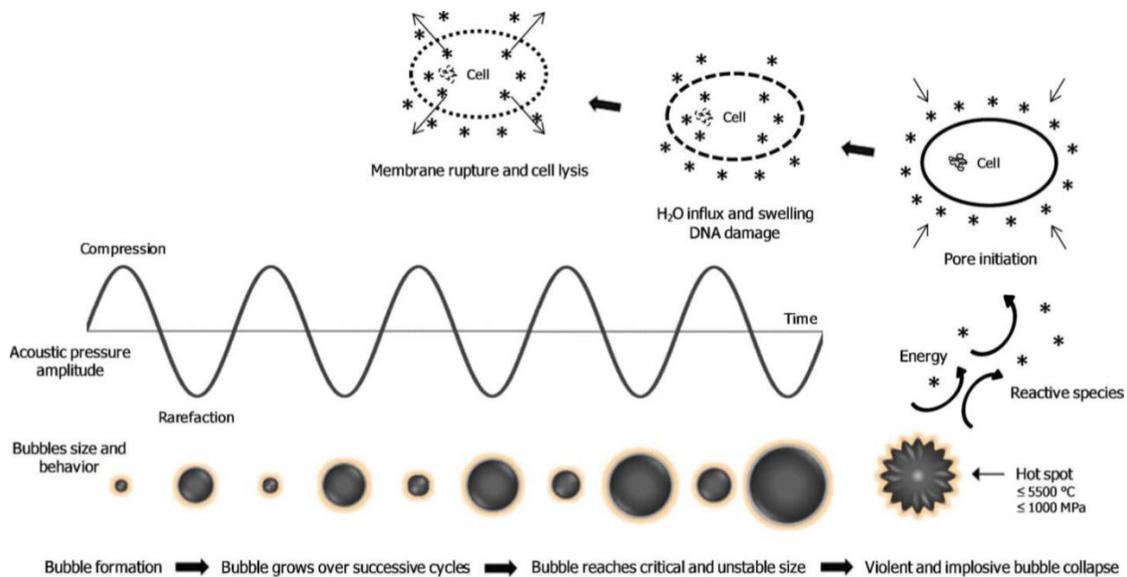
### **Liens Internet**

- <https://resources.ext.vt.edu/searchresults?contentname=ozone>
- <https://www.intechopen.com/chapters/72151>
- <https://foodmicrobiology.academy/2020/07/22/how-to-preserve-food-with-ozone/>
- <https://www.gov.mb.ca/agriculture/food-safety/at-the-food-processor/ozonation.html>
- <https://ozonetraitements.com/secteurs-ozone/1/alimentaire>
- <https://www.food-safety.com/articles/6805-recent-advances-in-food-processing>

### **Ultrasons**

**Description.** La technologie à ultrasons est généralement utilisée dans les systèmes alimentaires liquides et peut être définie comme utilisant des ondes à fréquences élevées. Cette technologie verte est très prometteuse dans l'industrie alimentaire en raison de son potentiel d'inactivation des micro-organismes présents à la surface des fruits et légumes (Chemat et al., 2011). La technologie est basée sur l'énergie générée par des ondes sonores situées à une fréquence au-delà de la limite de l'audition humaine (Awad et al., 2012). Un système à ultrasons se compose d'un groupe électrogène (source d'énergie), d'un transducteur (pour convertir l'énergie électrique en fréquences ultrasons), et d'un coupleur ou émetteur (pour émettre les ondes du transducteur vers le milieu). La bande à ultrasons peut être divisée en basse puissance (hautes fréquences) et haute puissance (basses fréquences) (Chemat et al., 2011).

**Mode d'action.** L'effet létal des ultrasons est attribué au phénomène de cavitation acoustique intracellulaire, dû à la formation de bulles ou cavités dans les liquides (**Fig. 6**). La formation, le grossissement et l'implosion des bulles produit des changements de température et de pression intenses localisés au niveau de la membrane biologique, provoquant une rupture induite par le cisaillement de parois cellulaires, un amincissement des membranes cellulaires, et des dommages à l'ADN via la production de radicaux libres (Pinela et Ferreira, 2017).



**Figure 6** - Mécanisme de cavitation acoustique transitoire et inactivation des cellules microbiennes par les ultrasons (adapté de Pinela et Ferreira, 2017).

**Littérature scientifique et exemples d'applications.** Au cours des dernières années, l'efficacité des ultrasons a été étudiée dans de nombreux aliments comme le lait et le cidre de pomme, montrant un effet significatif contre *E. coli* O157:H7 et *L. monocytogenes*, avec une réduction de 6 et 5 log UFC/mL, respectivement (D'Amico et al., 2006). Selon O'Donnell et al. (2010), le traitement par ultrasons des jus de fruits a un effet minime sur la qualité des jus de fruits tels que le jus d'orange, de goyave et de fraise. Les ultrasons, seuls ou en combinaison avec d'autres techniques, se sont avérés efficaces contre *E. coli* dans des modèles liquides, mais aussi contre *L. monocytogenes* dans le cidre de pomme (Lagnika et al., 2017). Des études récentes ont démontré que l'amplitude des ultrasons, le temps d'exposition, la température de traitement ainsi que le volume et la composition de l'aliment peuvent affecter différemment la fraîcheur propriétés des fruits et légumes. Par exemple, Cao et al. (2010a) ont étudié les effets des ultrasons sur la détérioration des fraises et leur qualité physiologique. Les fruits ont été traités à une fréquence de 0, 25, 28, 40 et 59 kHz (fonctionnant à une puissance de 350 W), à 20°C pendant 10 min, puis conservés à 5°C pendant 8 jours. Il a été observé qu'une fréquence de 40 kHz a réduit significativement le taux de détérioration des fraises et leur population microbienne, a maintenu

leur fermeté et généré des niveaux plus élevés de sucres solubles totaux, d'acidité titrable et de vitamine C (Pinela et Ferreira, 2017). Également, la combinaison des ultrasons avec d'autres procédés de conservation peut être avantageuse en raison de l'effet obstacle (Chemat et al., 2011), notamment si combinés avec la pression (manosonication), la chaleur (thermosonication) ou l'irradiation UV (photosonication). Cependant, peu de données concernant ces combinaisons pour conserver des produits frais ou des fruits et légumes peu transformés sont disponibles (Dinçer et Baysal, 2004).

### **Avantages**

- Technologie peu coûteuse, simple, fiable et respectueuse de l'environnement.
- A été étudiée pour diverses applications, y compris le traitement des jus de fruits.
- Pénétration améliorée pour certains sites inaccessibles dans les aliments. Efficace contre les cellules végétatives, les spores, et les enzymes.

### **Inconvénients**

- Problèmes liés à la mise à l'échelle : l'équipement doit être conçu sur mesure pour chaque application de sorte que, jusqu'à présent, seuls quelques traitements ont atteint niveau industriel (Knorr et al., 2011).
- Défis futurs basés sur l'optimisation des conditions de traitement adéquates pour différents aliments, ce qui demande de nombreuses capacités de recherche et une collaboration étroite entre les chercheurs, les fournisseurs d'équipements et l'industrie alimentaire.
- Efficacité affectée par la taille des aliments et leur composition. Cette efficacité dépend du type, de la forme, et la taille des micro-organismes.
- Possibles changements physiques au niveau de l'aliment. Dommages possibles causés par certaines espèces réactives. Par exemple, les ultrasons de haute intensité peuvent dénaturer les protéines et produire des radicaux libres, qui peuvent à leur tour affecter la saveur des aliments à base de fruits ou riches en matières grasses (Pinela et Ferreira, 2017).

### **Principaux fournisseurs d'équipements à ultrasons – Accessibilité à des installations**

- CREPEC-Polytechnique Montréal : <https://www.polymtl.ca/crepec/equipements>
- Emerson Electric Co. : <https://www.emerson.com/en-us/automation/branson>
- Hielscher Ultrasonics GmbH : <https://www.hielscher.com/industry.htm>
- Laboratoires RESALA – INRS Centre Armand-Frappier : <http://www.labo-resala.com/>
- McGill University – Department of Food Science and Agricultural Chemistry : <https://www.mcgill.ca/foodscience/>
- QSonica LLC : <https://www.sonicator.com/>
- REUS : <https://www.etsreus.com/>
- Sonics and Materials Inc. : <https://www.sonics.com/>
- Sonimat : <https://www.sonimat.com/machine-de-decoupe-alimentaire-ultrason/produits/sonislice-trancheur-ultrason/>

- Tefic Biotech Co.: <https://www.teficbiotech.com/ultrasonic-homogenizer/industrial-sonicator-mixer.html>
- CIP SysTems : <https://www.cip-process.com/2019/09/05/le-nettoyage-et-la-decontamination-par-ultrasons/>

## Pour en savoir plus

### *Références bibliographiques*

Ambadgatti, S. (2020). A Review on Recent Trends of Ultrasound Assisted Processing in Food Segment. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 10(1), 1-4. doi:10.15414/jmbfs.2020.10.1.1-4

Awad, T. S., Moharram, H. A., Shaltout, O. E., Asker, D., & Youssef, M. M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48(2), 410-427. doi:10.1016/j.foodres.2012.05.004

Chemat, F., Zill e, H., & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason Sonochem*, 18(4), 813-835. doi:10.1016/j.ultsonch.2010.11.023

Cichoski, A. J., Silva, M. S., Leaes, Y. S. V., Brasil, C. C. B., de Menezes, C. R., Barin, J. S., . . . Campagnol, P. C. B. (2019). Ultrasound: A promising technology to improve the technological quality of meat emulsions. *Meat Sci*, 148, 150-155. doi:10.1016/j.meatsci.2018.10.009

D'Amico, D. J., Silk, T. M., Wu, J., & Guo, M. (2006). Inactivation of microorganisms in milk and apple cider treated with ultrasound. *J. Food Prot.*, 69(3), 556-563.

Dincer, A. H., & Baysal, T. (2004). Decontamination techniques of pathogen bacteria in meat and poultry. *Crit Rev Microbiol*, 30(3), 197-204. doi:10.1080/10408410490468803

Hoover, D. G. (2000). Ultrasound. *J. Food Sci.*, 93-95.

Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O., & Schoessler, K. (2011). Emerging technologies in food processing. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2, 203-235. doi:10.1146/annurev.food.102308.124129

Lagnika, C., Adjovi, Y. C. S., Lagnika, L., Gogohounga, F. O., Do-Sacramento, O., Koulony, R. K., & Sanni, A. (2017). Effect of Combining Ultrasound and Mild Heat Treatment on Physicochemical, Nutritional Quality and Microbiological Properties of Pineapple Juice. *Food and Nutrition Sciences*, 08(02), 227-241. doi:10.4236/fns.2017.82015

Mumtaz, A., Ibrahim, M. S., Siddiqui, N. R., Safdar, M. N., Munir, M., Qayyum, A., . . . Ibrahim, M. K. (2019). Ultrasounds: A Recent Perspective in Food Industry. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 32(2). doi:10.17582/journal.pjar/2019/32.2.334.342

O'Donnell, C. P., Tiwari, B. K., Bourke, P., & Cullen, P. J. (2010). Effect of ultrasonic processing on food enzymes of industrial importance. *Trends in Food Science & Technology*, 21(7), 358-367. doi:10.1016/j.tifs.2010.04.007

Pinela, J., & Ferreira, I. C. (2017). Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: Trends aiming at quality and safety. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 57(10), 2095-2111. doi:10.1080/10408398.2015.1046547

Utkun, S. (2012). Combined effect of ultrasound and selected essential oil constituents on *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* reduction in orange juice. *African Journal of Microbiology Research*, 6(37). doi:10.5897/ajmr12.942

Yuan, S., Li, C., Zhang, Y., Yu, H., Xie, Y., Guo, Y., & Yao, W. (2021). Ultrasound as an emerging technology for the elimination of chemical contaminants in food: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 374-385. doi:10.1016/j.tifs.2021.01.048

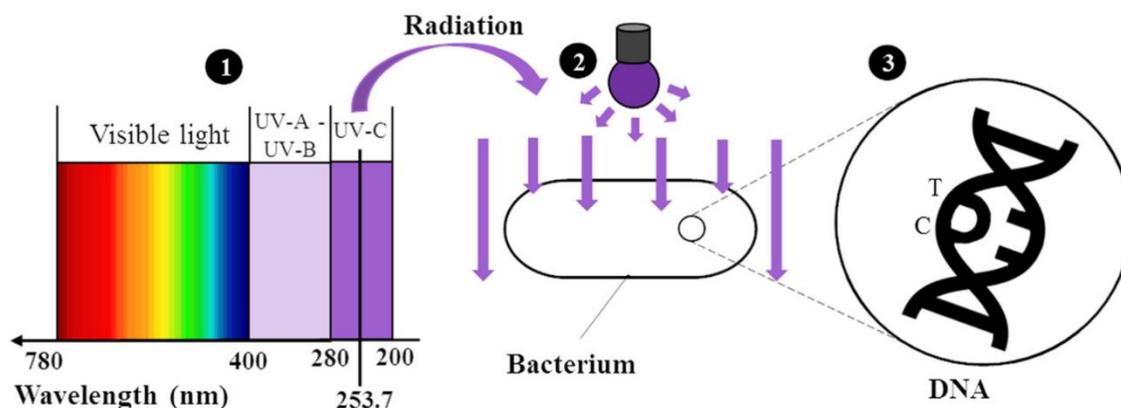
### **Liens Internet**

- <https://nathaliepirioudeslandes.wordpress.com/2012/10/18/les-differents-procedes-d'extraction/>
- <https://www.hielscher.com/fr/ultrasonic-pectin-extraction-from-fruit-and-bio-waste.htm>
- <https://www.processalimentaire.com/procedes/melange-par-ultrasons-pourquoi-pas-en-iaa-7716>
- <https://www.hielscher.com/fr/ultrasonic-homogenization-of-liquid-egg.htm>
- <https://www.processalimentaire.com/procedes/les-ultrasons-une-alternative-verte-pour-l'extraction-23431>
- [https://www.hielscher.com/fr/food\\_01.htm](https://www.hielscher.com/fr/food_01.htm)
- <https://www.processalimentaire.com/procedes/les-ultrasons-pour-decontaminer-les-bandes-de-convoyeurs-en-continu-29680>

### **Irradiation UV**

**Description.** Dans le traitement de la lumière UV, le rayonnement est obtenu à partir de la région UV d'un spectre électromagnétique. Le principe de l'irradiation UV consiste à irradier l'aliment dans une chambre d'irradiation (enceinte fermée), en mode batch ou continu (sur convoyeur), à l'aide de lampes à vapeur de mercure à haute pression. La qualité des lampes (notamment la pression dans les bulbes) influe sur l'émission de rayonnements UV-A (ondes longues), -B (ondes moyennes) ou -C (ondes courtes). À noter que les lampes UV-C basse pression sont identiques aux lampes fluorescentes mais sans revêtement de phosphore, ce qui permet la transmission d'UV-C (254 nm). L'intensité du rayonnement UV est exprimée en radiance ou flux d'intensité ( $W/m^2$ ) tandis que la dose UV est fonction de l'intensité et du temps d'exposition ( $W.s/m^2 = J/m^2$ ) (Bintsis et al., 2000). Une exposition de  $400 J/m^2$  à toutes les parties du produit doit être atteinte pour obtenir une inactivation microbiologique. Les facteurs critiques comprennent la transmittance du produit, la configuration géométrique du réacteur, la puissance, la longueur d'onde et la disposition des sources UV, le profil de flux du produit et le trajet optique du rayonnement UV.

**Mode d'action.** L'irradiation UV-C à 254 nm induit une action germicide maximale. Le mécanisme généralement reconnu d'inactivation microbienne des UV sont principalement attribués aux dommages directs à l'ADN des organismes vivants (**Fig. 7**). Les UV induisent la formation de photo-produits d'ADN, tels que les dimères de cyclobutane pyrimidine et pyrimidine 6-4 pyrimidone, qui inhibent la transcription et la réplication et conduisent finalement à la mutagenèse et la mort cellulaire (Ma et al., 2017).

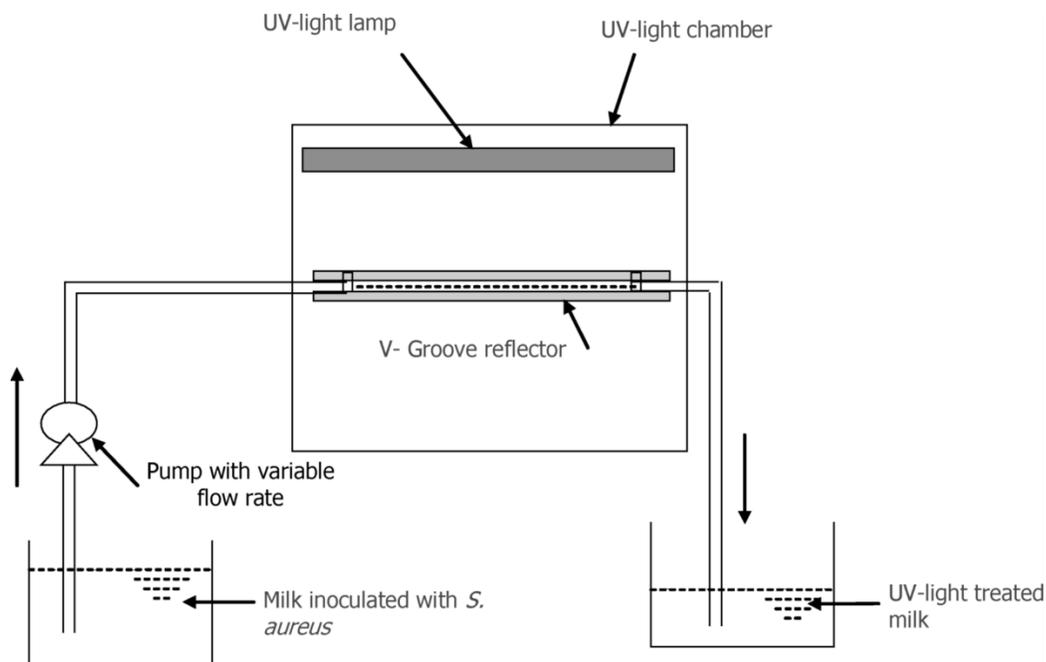


**Figure 7** – Mécanisme d’inactivation microbienne des rayonnements UV-C à 253.7 nm (efficacité maximale). La source d’irradiation formée par une lampe au mercure (1) affecte les micro-organismes (2). L’inactivation et la réduction du taux de la croissance microbienne sont principalement dues à la formation de dimères pyrimidine (thymine-cytosine) (3) (d’après Rosario et al., 2020).

**Littérature scientifique et exemples d’applications.** Les UV sont généralement utilisés pour irradier les surfaces des matériaux d'emballage alimentaire, ostensiblement pour les stériliser ou au moins les désinfecter avant emballage aseptique dans le but d’augmenter la durée de vie du produit. Certains effets microbicides sont attribués à la génération d’ozone au cours de l’irradiation. Dans certaines opérations pour les produits laitiers par exemple, les UV sont appliqués en synergie avec les stérilisants chimiques sur la surface du matériel d'emballage afin d’augmenter l’effet microbicide et de réduire les produits chimiques résiduels (Morris et al., 2017).

L’efficacité des UV dépend de divers facteurs tels que les sources UV, les conditions de fonctionnement, cibler les micro-organismes et les aliments [44]. Différentes doses d’énergie sont nécessaires pour provoquer la mort de divers micro-organismes [82]. La composition des aliments est également cruciale pour l’efficacité de la lumière UV (Pexara and Govaris, 2020). Actuellement, le rayonnement UV-C est largement utilisé dans l’industrie de jus de fruits pour la désinfection des réserves d’eau et les surfaces en contact avec les aliments. Ces utilisations récentes ont démontré un effet bénéfique lorsque de faibles doses ont été appliquées à différents produits alimentaires. Le rayonnement UV-C est également considéré comme un traitement alternatif pour la conservation des produits végétaux. En fait, des doses UV-C ont été rapportées pour réduire la détérioration post-récolte des oignons, patates douces, carottes, tomates, fraises, pommes, pêches, fruits citronnés, raisin de table, et courgettes. La réduction des maladies post-récolte et le retardement de pourriture dans les produits traités par UV-C à faible dose sont liés à une augmentation de la résistance à la détérioration des tissus due à l’accumulation de composés antifongiques (Artés et Alliende, 2005).

Les rayons UV réagissent également de manière synergique avec des agents oxydants tels que l'ozone, et peuvent donc être utilisés pour traiter microbiologiquement les jus de fruits et le cidre. L'effet germicide le plus élevé est observé entre 250 et 270 nm. Plus précisément, la longueur d'onde de 254 nm (UV-C ; lampes au mercure à basse pression) est utilisée pour la désinfection de surfaces, de l'eau et de produits alimentaires (Angeliki, 2014). Krishnamurthy et al. (2007) ont étudié l'efficacité de la lumière UV pulsée pour le traitement du lait, en procédé continu, afin d'inactiver *Staphylococcus aureus*, un agent pathogène du lait (**Fig. 8**). L'effet de la distance de l'échantillon à la fenêtre de quartz de la source de lumière UV, le nombre de passages et le débit ont été évalués. Ils ont observé des réductions logarithmiques variaient de 0.55 à 7.26 log UFC/mL en fonction des paramètres appliqués et une inactivation complète a été obtenue dans certains cas, suggérant que cette technologie pourrait être potentiellement adaptée à un cadre commercial pour la pasteurisation continue du lait.



**Figure 8** – Diagramme schématisé d'un système de traitement du lait en continu (tiré de Krishnamurthy et al., 2007).

**Réglementation.** La législation des aliments traités aux UV pour la sécurité des consommateurs varie selon les pays. Par exemple, Le Canada, l'Union Européenne (UE), la Nouvelle-Zélande et l'Australie ont des approches quasi-similaires, et les aliments traités aux UV sont considérés comme de nouveaux aliments. Aux États-Unis, la lumière UV est considérée par la FDA comme un rayonnement et est définie comme additif alimentaire. La technologie UV étant prometteuse en matière de sécurité alimentaire, la législation devrait être harmonisée dans le monde entier par la mondialisation des réglementations alimentaires UV (Pexara et Govaris, 2020).

### **Avantages**

- Ne génère ni résidus chimiques, ni sous-produits indésirables susceptibles de modifier les propriétés sensorielles (couleur, odeur, saveur) du produit fini.
- Utilisation simple et efficace à faible coût comparé à d'autres méthodes de stérilisation.
- Méthode qui peut être contrôlée facilement en paramétrant le temps d'exposition (longues périodes à faible intensité ou courtes périodes à haute intensité) (Angeliki et al., 2014).
- Bien que la faible pénétration des UV limite leur application dans le domaine alimentaire, les UV-C sont particulièrement adaptés pour décontaminer la surface des fruits et légumes frais coupés, sachant que les altérations microbiennes et enzymatiques se produisent principalement sur la surface coupée (Ma et al., 2017).

### **Inconvénients**

- Le rayonnement UV-C est principalement un traitement de surface car il ne pénètre que de 50 à 300 µm dans le tissu végétal. Par conséquent, la lumière UV-C ne peut être utilisée avec succès que contre les populations microbiennes de surface.
- Le rayonnement UV-C a été recommandé comme étant mieux utilisé en combinaison avec d'autres techniques de conservation pour conserver la qualité sensorielle et la valeur nutritionnelle des produits car ce traitement semble être efficace pour diminuer le nombre de bactéries, mais n'aboutit pas à une stérilisation (Artés et Allende, 2005).
- La dose d'énergie utilisée doit être au moins de 400 J/m<sup>2</sup> et certains facteurs critiques sont : la puissance, la transmissivité du produit, sa géométrie et son profil de flux (Barbosa-Canovas et Bermudez-Aguirre, 2008).
- L'application à forte dose des UV-C est limitée en raison de ses effets négatifs sur les produits frais, y compris les caractéristiques sensorielles et les composantes nutritionnelles (Ma et al., 2017).

### **Principaux fournisseurs d'équipements UV – Accessibilité à des installations**

- Crystal IS, Inc. : <https://cisuvc.com/products/uvc-led-systems>
- Evoqua Water Technologies LLC : <https://www.evoqua.com/en/evoqua/products--services/disinfection-systems/uv-systems/>
- Hanovia : <https://hanovia-uv.com/>
- Heraeus Holding : [https://www.heraeus.com/en/hng/home\\_noblelight.html](https://www.heraeus.com/en/hng/home_noblelight.html)
- Laboratoires RESALA – INRS Centre Armand-Frappier : <http://www.labo-resala.com/>
- McGill University – Department of Food Science and Agricultural Chemistry : <https://www.mcgill.ca/foodscience/>
- Opsytec Dr. Gröbel GmbH : <https://www.opsytec.com/>
- Radiant Industrial Solutions, LLC : <https://radiantuv.gov.com/>
- Reyco Systems, Inc. : <http://www.reycosystems.com/>
- Steril Aire LLC : <https://www.steril-aire.com/industry-solutions/food-processing/>
- Ushio America, Inc. : <https://www.ushio.com/>
- UV Light Technology Ltd : <https://uv-light.co.uk/food/>

- Xenon Corporation : <https://xenoncorp.com/conveyor-sterilization/>

## Pour en savoir plus

### *Références bibliographiques*

Abadias, M., Colas-Meda, P., Vinas, I., Bobo, G., & Aguilo-Aguayo, I. (2021). Application of an innovative water-assisted ultraviolet C light technology for the inactivation of microorganisms in tomato processing industries. *Food Microbiol*, 94, 103631. doi:10.1016/j.fm.2020.103631

Angeliki, B. (2014). Non-thermal technologies for the disinfection of food and risk assessment for public health. (PhD). University of Patras, Greece.

Artés, F., & Allende, A. (2005). Processing lines and alternative preservation techniques to prolong the shelf-life of minimally fresh processed leafy vegetables. *Europ. J. Hort. Sci.*, 70(5), 231-245.

Barbosa-Canovas, G. V., & Bermúdez-Aguirre, D. (2008). Introduction. *Food Science and Technology International*, 14(5), 403-409. doi:10.1177/1082013208102119

Calle, A., Fernandez, M., Montoya, B., Schmidt, M., & Thompson, J. (2021). UV-C LED Irradiation Reduces Salmonella on Chicken and Food Contact Surfaces. *Foods*, 10(7). doi:10.3390/foods10071459

Cossu, M., Ledda, L., & Cossu, A. (2021). Emerging trends in the photodynamic inactivation (PDI) applied to the food decontamination. *Food Res Int*, 144, 110358. doi:10.1016/j.foodres.2021.110358

Delorme, M. M., Guimarães, J. T., Coutinho, N. M., Balthazar, C. F., Rocha, R. S., Silva, R., . . . Cruz, A. G. (2020). Ultraviolet radiation: An interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 146-154. doi:10.1016/j.tifs.2020.06.001

Ferreira, T. V., Mizuta, A. G., Menezes, J. L. d., Dutra, T. V., Bonin, E., Castro, J. C., . . . Abreu Filho, B. A. d. (2020). Effect of ultraviolet treatment (UV-C) combined with nisin on industrialized orange juice in *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores. *Lwt*, 133. doi:10.1016/j.lwt.2020.109911

Hales, B. R., & Bastarrachea, L. J. (2021). Microbial Inactivation on a Processed Cheese Surface by UV-A Light. *ACS Food Science & Technology*, 1(3), 347-353. doi:10.1021/acsfoodscitech.0c00130

Jeon, M.-J., & Ha, J.-W. (2018). Efficacy of UV-A, UV-B, and UV-C irradiation on inactivation of foodborne pathogens in different neutralizing buffer solutions. *Lwt*, 98, 591-597. doi:10.1016/j.lwt.2018.09.030

Kalchayanand, N., Bosilevac, J. M., King, D. A., & Wheeler, T. L. (2020). Evaluation of UVC Radiation and a UVC-Ozone Combination as Fresh Beef Interventions against Shiga Toxin-Producing *Escherichia coli*, *Salmonella*, and *Listeria monocytogenes* and Their Effects on Beef Quality. *J Food Prot*, 83(9), 1520-1529. doi:10.4315/JFP-19-473

Krishnamurthy, K. (2006). Decontamination of milk and water by pulsed UV-light and infrared heating. (PhD). Pennsylvania State University, USA.

Krishnamurthy, K., Demirci, A., & Irudayaraj, J. M. (2007). Inactivation of *Staphylococcus aureus* in milk using flow-through pulsed UV-light treatment system. *J Food Sci*, 72(7), M233-239. doi:10.1111/j.1750-3841.2007.00438.x

Lacroix, M. (2012). Irradiation-UV-C. In S. Da-Wen (Ed.), *Handbook of Food Safety Engineering* (1st ed., pp. 497-523). Hoboken, NJ, USA: Blackwell Publishing Ltd.

Ma, L., Zhang, M., Bhandari, B., & Gao, Z. (2017). Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 64, 23-38. doi:10.1016/j.tifs.2017.03.005

Morris, C., Brody, A. L., & Wicker, L. (2007). Non-thermal food processing/preservation technologies: a review with packaging implications. *Packaging Technology and Science*, 20(4), 275-286. doi:10.1002/pts.789

Ochoa-Velasco, C. E., Ávila-Sosa, R., Hernández-Carranza, P., Ruíz-Espinosa, H., Ruiz-López, I. I., & Guerrero-Beltrán, J. Á. (2020). Mathematical Modeling Used to Evaluate the Effect of UV-C Light Treatment on Microorganisms in Liquid Foods. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 290-308. doi:10.1007/s12393-020-09219-y

Ortiz-Solà, J., Abadias, I., Colàs-Medà, P., Anguera, M., & Viñas, I. (2021). Inactivation of *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes* and murine norovirus (MNV-1) on fresh strawberries by conventional and water-assisted ultraviolet light (UV-C). *Postharvest Biology and Technology*, 174. doi:10.1016/j.postharvbio.2020.111447

Pexara, A., & Govaris, A. (2020). Foodborne Viruses and Innovative Non-Thermal Food-Processing Technologies. *Foods*, 9(11). doi:10.3390/foods9111520

Quevedo-león, R., Bastías-Montes, J., Espinoza-Tellez, T., Ronceros, B., Balic, I., & Muñoz, O. (2020). Inactivation of Coronaviruses in food industry: The use of inorganic and organic disinfectants, ozone, and UV radiation. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 257-266. doi:10.17268/sci.agropecu.2020.02.14

Rosario, D. K. A., Rodrigues, B. L., Bernardes, P. C., & Conte-Junior, C. A. (2021). Principles and applications of non-thermal technologies and alternative chemical compounds in meat and fish. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 61(7), 1163-1183. doi:10.1080/10408398.2020.1754755

Singh, H., Bhardwaj, S. K., Khatri, M., Kim, K.-H., & Bhardwaj, N. (2021). UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. *Chemical Engineering Journal*, 417. doi:10.1016/j.cej.2020.128084

#### **Liens Internet**

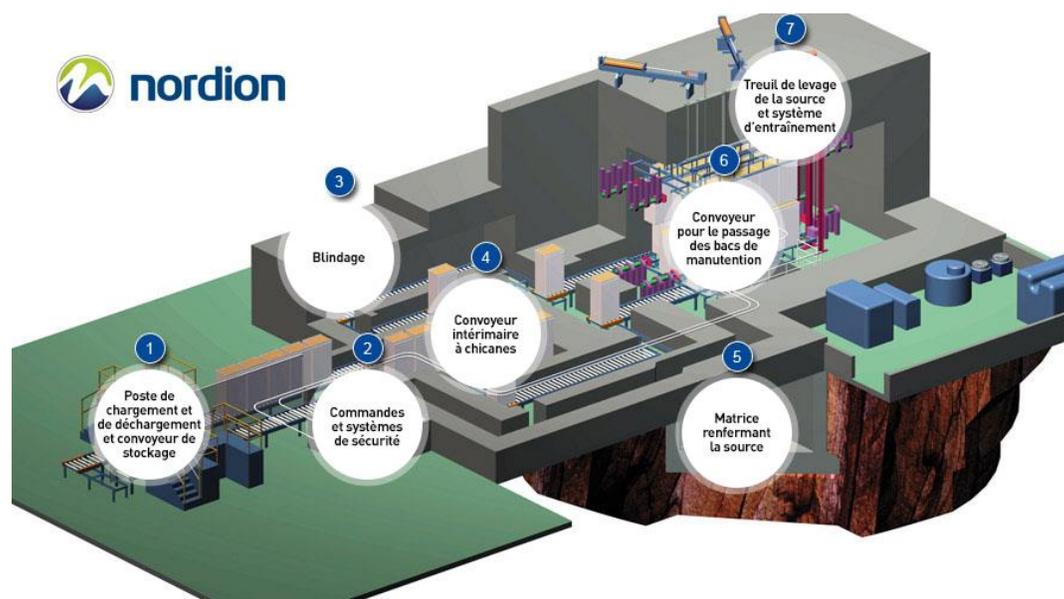
- <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/03/04/2186897/0/en/Global-food-and-beverage-disinfection-market-size-to-expand-at-4-4-CAGR-through-2027.html>
- <https://www.iuva.org/news>
- <https://www.foodnavigator.com/Article/2021/03/29/A-greener-future-for-the-dairy-industry-Lyras-develops-UV-tech-for-safe-and-sustainable-pasteurisation#>
- <https://www.newswise.com/articles/uv-light-shows-promise-in-mitigation-of-costly-swine-virus>
- <https://ultraviolet.com/uv-c-meat-processing/>

#### **Irradiation gamma**

**Description.** L'irradiation est un traitement physique qui consiste à exposer des aliments à l'action directe de rayonnement électromagnétique électronique dans le but d'accroître leur durée de conservation ou d'améliorer leur qualité hygiénique. Les flux d'irradiation tels les rayons X, les accélérateurs d'électron et les irradiateurs gamma (au cobalt 60 ou au césium 137) sont les irradiateurs les plus couramment utilisés (**Fig. 9**). La stérilisation ou pasteurisation gamma consiste à exposer les produits à traiter à des rayons au sein d'une cellule de protection, en adaptant la dose et la durée de l'exposition. Les rayons gamma sont obtenus grâce à la désintégration d'une source radioactive, le cobalt 60, conditionnée dans une double enveloppe étanche en inox. Le panneau portant ces sources dites "scellées" est suspendu au sein d'une cellule blindée (béton de forte épaisseur). Les rayons émis par la source, qui consistent en des photons gamma, ont la particularité de détruire les micro-organismes présents sur les produits par altération de leurs fonctions vitales. Le fait que les photons gamma ne possèdent ni masse ni

charge électrique rend ces rayonnements ionisants particulièrement pénétrants. Ils sont ainsi capables de stériliser des produits à travers leur emballage définitif, par colis ou palettes entières.

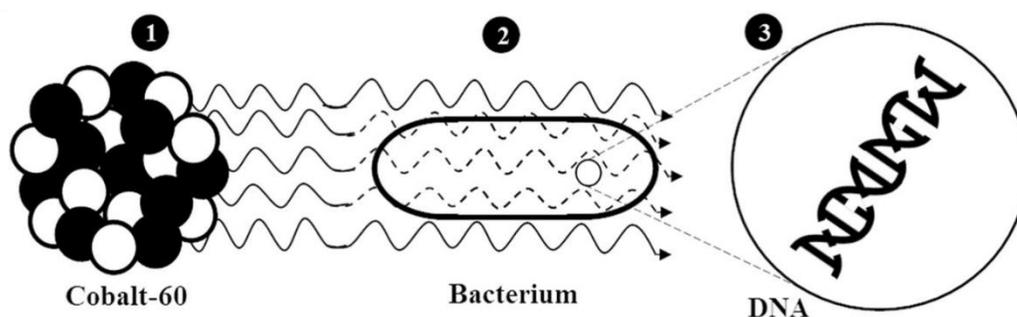
À l'arrivée des produits, le processus se déroule de la manière suivante : une fois les tests de validation de dose effectués, les marchandises sont acheminées au sein de la cellule de traitement par un système de convoyage automatique. Elles défilent devant la source afin de recevoir une certaine quantité de rayonnement, pendant une durée définie, avant de ressortir stériles. Il faut généralement compter quelques minutes à quelques heures de traitement, selon le débit de dose. Des murs en béton d'au moins 2 m d'épaisseur permettent à la cellule de contenir les radiations, et la source de cobalt 60 est plongée dans une piscine d'eau en protection lorsqu'elle est en mode "repos", pour une sécurité optimale. Il est généralement admis que l'efficacité de l'irradiation est directement proportionnelle à la dose d'absorption dose, qui est définie par l'énergie absorbée par unité de masse. L'unité de dose utilisée est généralement le kilogray (kGy). Un gray représente l'énergie d'un rayonnement ionisant apportant une énergie d'un joule à un milieu homogène d'une masse d'un kg. (1 Gy = 1 J/kg).



**Figure 9** – Schéma d'un irradiateur gamma industriel (Nordion Inc.). Un irradiateur industriel conçu pour le traitement de denrées alimentaires est constitué d'une chambre entourée de murs de béton de 2 m d'épaisseur, dans laquelle se situe la source radioactive de cobalt 60. L'entrée et la sortie du produit dans la chambre d'irradiation se fait automatiquement à l'aide d'un système convoyeur. Avant que la personne ne pénètre dans la chambre, on abaisse la source dans une piscine, où l'eau absorbe l'énergie radioactive et assure ainsi la protection des travailleurs.

**Mode d'action.** Le mécanisme d'action de l'irradiation gamma pour l'inactivation microbienne est illustré à la **Fig. 10**. L'efficacité d'inactivation des micro-organismes dépend de plusieurs facteurs tels que l'état physiologique du micro-organisme, la souche microbienne, la composition de

l'aliment, la dose appliquée et la capacité du micro-organisme à réparer les dommages à l'ADN (phénomène de radiosensibilité). Parmi les microorganismes les plus résistants à l'irradiation, *Deinococcus radiodurans* présentent une capacité de réparation élevée de l'ADN (Cox et Battista 2005). De plus, les cellules microbiennes à l'état végétatif sont plus sensibles que les spores (Fellows, 2000), ce qui nécessite des doses élevées des traitements. En règle générale, l'inactivation microbienne par tout type de rayonnement ionisant se produit grâce à 2 mécanismes principaux : i) interaction directe du rayonnement avec des composants cellulaires et ii) action indirecte des produits de la radiolyse de l'eau tels que les radicaux hydroxyyles, ainsi que protons et électrons (Rosario et al., 2009).



**Figure 10** – Mécanisme d'inactivation microbienne de l'irradiation gamma. La source d'irradiation formée par le cobalt 60 émet des rayonnements gamma (1) qui ont la capacité de pénétrer les structures et les microorganismes (2). Les rayons gamma endommagent l'ADN microbien et inactivent la cellule (3) (d'après Rosario et al., 2020).

**Littérature scientifique et exemples d'applications.** Dans le domaine alimentaire, l'irradiation gamma est utilisée pour les traitements de stérilisation et pasteurisation à froid, de décontamination microbienne (élimination de pathogènes), de désinsectisation (élimination de parasites), ou encore de ralentissement du mûrissement des fruits. L'irradiation ne dure que le temps de l'exposition aux rayons et ne rend pas les produits radioactifs. L'application de l'irradiation aux produits végétaux permet à des doses inférieures à 1 kGy, d'inhiber la germination, de retarder le mûrissement des fruits et d'éliminer les insectes. À des doses entre 1 et 3 kGy, il est possible d'éliminer les moisissures. Appliquée aux produits céréaliers, elle permet d'éliminer les insectes (dose < 1 kGy), de réduire ou d'éliminer les bactéries (dose > 2 kGy) et de réduire le temps de cuisson. **Irradiation des fruits et légumes.** La plupart des fruits et des légumes tolèrent l'irradiation à une dose minimale de 0.25 kGy sans que leur qualité soit affectée. Une dose de 2.25 kGy est en général la dose optimale que les fruits et les végétaux peuvent tolérer sans affecter la qualité du produit (perte de fermeté, saveur affectée, bris physiologiques, mûrissement accéléré). Par exemple, les fraises peuvent tolérer des doses aussi élevées que 3 kGy. À ces doses, la contamination des fruits est éliminée et la qualité des fraises peut être maintenue pendant 14 jours à 5°C. L'inhibition de la germination des oignons peut être obtenue

à des doses aussi faibles que 0.04 à 0.74 kGy. Les combinaisons de traitements (faible chaleur avec une faible dose d'irradiation) offrent la possibilité de retarder le mûrissement et de réduire la perte de certains végétaux tels que les tomates et les mangues et d'inactiver les moisissures toxiques tels qu'*Aspergillus flavus* dans les noix. **Irradiation des sources protéiques.** L'application de l'irradiation dans les viandes, les volailles et les poissons permet, à des doses inférieures à 1 kGy, d'éliminer les parasites. À des doses intermédiaires (1-10 kGy), elle permet d'éliminer les bactéries pathogènes et de réduire le nombre de microorganismes. Il a été démontré qu'une dose de 2.5 kGy appliquée sur des crevettes permet de contrôler la prolifération des micro-organismes et de conserver la qualité du produit pendant un mois à 4°C et ce, sans en affecter les qualités sensorielles. Une étude sur l'irradiation à 3-5 kGy du poulet frais et mariné a démontré que le traitement du poulet frais à 5 kGy a permis d'éliminer complètement la *Salmonelle*. Le temps de conservation du poulet mariné et irradié à 3 kGy était de 15 jours comparativement à 10 jours pour le poulet non mariné et irradié et à seulement 2 jours pour le témoin (dans ce cas, l'utilisation de la marinade a eu un effet synergique avec l'irradiation pour réduire la charge microbienne). À noter qu'à des doses intermédiaires (5 kGy), certaines vitamines sont plus sensibles que d'autres. Cependant, la combinaison de traitements avec le froid, l'ajout de marinades ou d'antimicrobiens/antioxydants naturels, et l'emballage sous vide ou sous MAP (absence d'oxygène) permet de mieux conserver le contenu en vitamines. De manière générale, aux doses appliquées aux aliments, l'irradiation ne change pas significativement la valeur nutritive des aliments. **Aspects nutritifs.** Parmi les études réalisées par les Laboratoires RESALA de l'INRS, des traitements d'irradiation appliqués sur des mangues peuvent éliminer les mouches à fruits, mais permettent aussi de stabiliser le contenu en vitamines et d'améliorer la qualité sensorielle de ce type de produit. L'irradiation peut en outre activer la synthèse de certaines vitamines telles que le  $\beta$ -carotène et la vitamine C. Des études sur les mangues, les tangerines, les clémentines et les oranges ont aussi démontré une plus grande concentration de composés phénoliques après irradiation. Ces composés ont eu un effet positif sur le temps de conservation, la saveur et la couleur du produit. Une fois irradiée, les qualités sensorielles étaient significativement améliorées. Également, l'irradiation de champignons blancs à faible débit de dose et entreposés sous atmosphère contrôlée a permis de conserver divers critères de qualité tels que la blancheur et de prolonger de 2 à 8 jours leur temps de conservation.

**Réglementation.** Actuellement, plus d'une cinquantaine de produits alimentaires ont reçu l'autorisation d'être irradiés dans plus d'une quarantaine de pays. La Belgique, la Hollande, l'Afrique du Sud, le Brésil, l'Israël, le Mexique, la Chine, les États-Unis et la Russie font partie des pays où l'on irradie de très grandes quantités d'aliments. On estime que les coûts d'irradiation contre la désinfection et l'amélioration de la durée de conservation des fruits, des légumes, des céréales sont d'environ 2-6 \$/tonne. L'irradiation à des doses de pasteurisation et d'élimination de bactéries pathogènes (2-5 kGy) sont d'environ 40-70 \$/tonne, ce qui équivaut en moyenne à 2.5¢ la livre. Au Canada et aux États-Unis, l'irradiation est autorisée depuis plusieurs décennies (**Fig. 11**) pour les applications suivantes:

- Doses < 1 kGy : aux produits végétaux pour inhiber la germination des pommes de terre et des oignons; aux fruits pour retarder le mûrissement et aux produits céréaliers (farine de blé) pour éliminer les insectes.
- Doses entre 1 et 3 kGy : élimination des moisissures.
- Doses > 2 kGy : aux produits céréaliers pour réduire la charge microbienne des épices moulues et réduire le temps de cuisson.

FOOD CLEARANCES		Status of Food Irradiation Regulations in USA		
				
POTATOES	0.15kGy (1960)	Pork	1 kGy	Since 7-22-85
ONIONS	0.15kGy (1965)	Spices	30 kGy	Since 4-18-86
WHEAT & FLOUR	0.75kGy (1969)	Vegetables-Fruits	1 kGy	Since 4-18-86
SPICES & DEHYDRATED SEASONING PREP.	10.0kGy (1984)	Poultry	1.5 - 3 kGy	Since 9-21-92
		Meat	1.5 - 3 kGy	Since 9-21-92
		Frozen meat	7 kGy	Since 12-2-97

**Figure 11** – Doses d'irradiation gamma autorisées par Santé Canada et la FDA (USA) en fonction du type d'aliment.

### **Avantages**

- Capacité de pénétration dans l'aliment et de tuer les parasites, ce que les pesticides ne peuvent faire. Les rayons gamma sont adaptés pour traiter de gros emballages de nourriture en vrac en raison de leur profondeur de pénétration élevée.
- Traitement effectué à froid, permettant de mieux conserver la valeur nutritive des produits alimentaires. Les paramètres utilisés doivent permettre la conservation de la valeur nutritive et des propriétés physico-chimiques des aliments.
- Permet de supprimer ou de réduire l'utilisation des additifs alimentaires tels que les nitrites et les nitrates.
- Permettrait à terme de remplacer le dibromure d'éthylène utilisé pour le traitement des fruits, des grains et des farines.

### **Inconvénients**

- Coût d'installation très élevés à l'échelle industrielle.
- Nécessité de mesures de sécurité et de personne technique qualifié. Les traitements offerts à l'industrie alimentaire sont généralement des offres de service de centres d'irradiation.
- Les rayonnements gamma ne peuvent pas être éteints. Ainsi, lorsqu'ils ne sont pas utilisés, ils doivent être stockés dans une piscine d'eau pour absorber l'énergie de rayonnement et protéger les travailleurs contre l'exposition s'ils doivent entrer dans la salle d'irradiation.

### **Principaux fournisseurs d'irradiateurs gamma – Accessibilité à des installations**

- Nordion (Canada) Inc. : <https://www.nordion.com/products/irradiation-systems/>
- Nordion Gamma Centre of Excellence (GCE) : <https://www.nordion.com/gce/home.php>
- Steris : <https://www.steris-ast.com/fr/services/irradiation-gamma/>

### **Pour en savoir plus**

#### **Références bibliographiques**

Agbaka, J. I., & Ibrahim, A. N. (2020). Irradiation: Utilization, advances, safety, acceptance, future trends, and a means to enhance food security. *Adv. Appl. Sci. Res.*, 11(3). doi:10.36648/0976-8610.11.3.1

Akhila, P. P., Sunooj, K. V., Aaliya, B., Navaf, M., Sudheesh, C., Sabu, S., . . . Mousavi Khaneghah, A. (2021). Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 399-409. doi:10.1016/j.tifs.2021.06.013

Ashraf, S., Sood, M., Bandral, J. D., Trilokia, M., & Manzoor, M. (2019). Food irradiation: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 7(2), 131-136.

Bisht, B., Bhatnagar, P., Gururani, P., Kumar, V., Tomar, M. S., Sinhmar, R., . . . Kumar, S. (2021). Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables– a review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 372-385. doi:10.1016/j.tifs.2021.06.002

Cardoso, R. V. C., Carochi, M., Fernandes, A., Barreira, J. C. M., Cabo Verde, S., Santos, P. M. P., . . . Ferreira, I. (2021). Combined effects of irradiation and storage time on the nutritional and chemical parameters of dried *Agaricus bisporus* Portobello mushroom flour. *J Food Sci*, 86(6), 2276-2287. doi:10.1111/1750-3841.15755

Cox, M. M., & Battista, J. R. (2005). *Deinococcus radiodurans* - the consummate survivor. *Nat Rev Microbiol*, 3(11), 882-892. doi:10.1038/nrmicro1264

Fellows, P. (2000). *Food processing technology - Principles and Practice* (P. Fellows Ed. 2nd ed.). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.

Huang, M., Zhang, M., & Bhandari, B. (2019). Recent development in the application of alternative sterilization technologies to prepared dishes: A review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 59(7), 1188-1196. doi:10.1080/10408398.2017.1421140

IAEA. (2004). *Gamma irradiators for radiation processing*. In I. A. E. A. I.-D. o. P. a. C. Sciences (Ed.), *Industrial Applications and Chemistry Section*. Vienna, Austria.

IAEA. (2010) *Radiation safety of gamma, electron and X ray irradiation facilities*. In. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Vienna, Austria.

Ic, E., & Cetinkaya, N. (2021). Food safety and irradiation related sanitary and phytosanitary approaches - Chinese perspective. *Radiation Physics and Chemistry*, 181. doi:10.1016/j.radphyschem.2020.109324

Kalyani, B., & Manjula, K. (2014). Food irradiation - Technology and application. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 3(4), 549-555.

Lacroix, M. (2005). Combined industrial processes with irradiation to assure innocuity and preservation of fruits and vegetables. Paper presented at the 2005 International Nuclear Atlantic Conference, Santos, SP, Brazil.

Lacroix, M. (2005). Irradiation of foods. In S. Da-Wen (Ed.), *Emerging technologies for food processing*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Ltd.

Loaharanu, P. (1994). L'irradiation des aliments dans les pays en développement: une solution pratique. Retrieved from Vienna, Austria:

Monique, L., & Peter, F. (2015). Combination irradiation treatments for food safety and phytosanitary uses. *Stewart Postharvest Review*, 11(3), 1-10. doi:10.2212/spr.2015.3.4

Munir, M. T., & Federighi, M. (2020). Control of Foodborne Biological Hazards by Ionizing Radiations. *Foods*, 9(7). doi:10.3390/foods9070878

Nordion. (2014). The food irradiation chronicles: Delivering food to people around the world. In Nordion (Canada) Inc. Ottawa, ON, Canada.

Rosario, D. K. A., Rodrigues, B. L., Bernardes, P. C., & Conte-Junior, C. A. (2021). Principles and applications of non-thermal technologies and alternative chemical compounds in meat and fish. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 61(7), 1163-1183. doi:10.1080/10408398.2020.1754755

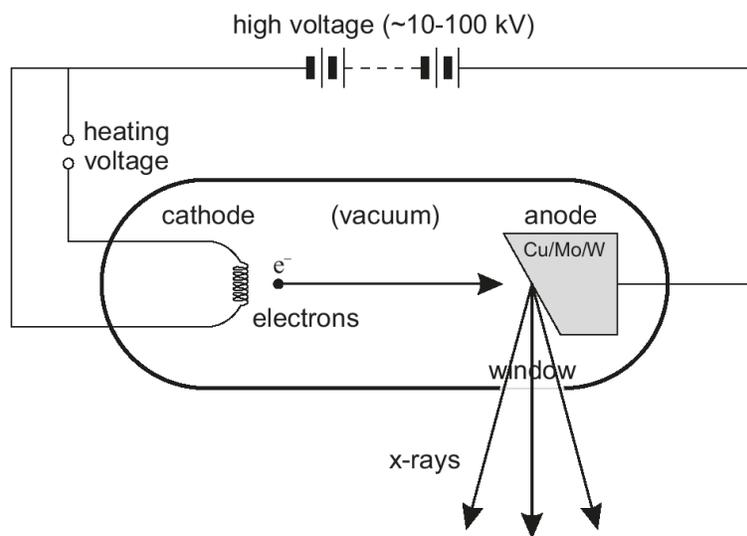
Shahida, S., Macdonald, D. D., Engelhardt, G. R., & Khan, R. A. (2021). A brief review on the food irradiation process: Radiolysis of water by irradiation. *Mod. Concept. Material Sci.*, 3(5), 1-17. doi:10.33552/MCMS.2021.03.000574

### **Liens Internet**

- <https://www.iaea.org/>
- <https://www.ebeam.com/flexible-packaging>
- <https://www.futuremarketinsights.com/reports/food-irradiation-market>
- <https://www.youtube.com/watch?v=Ajujfp56TGo>
- <https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=AsVwdNwZwTUC&oi=fnd&pg=PR7&dq=info:9vtAP4H1m8J:scholar.google.com/&ots=3OrFKnfdS&sig=ZCkFaoyaY2MYc8XrAUZ7RSHLrD4#v=onepage&q&f=false>
- <http://foodirradiation.org/>
- <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/08/21/2082035/0/en/Global-Food-Irradiation-Trends-Industry.html>
- <https://www.businesswire.com/news/home/20200622005260/en/Global-Sterilization-Services-Market-Forecast-to-2025---ETO-Gamma-Steam-Electron-Beam-Radiation-and-Gamma-Sterilization---ResearchAndMarkets.com>
- [https://books.google.ca/books?id=iQDoDwAAQBAJ&pg=PA471&lpg=PA471&dq=%2210.1007/978-3-030-42660-6\\_18%22&source=bl&ots=y558rm8rD2&sig=ACfU3U2S1npASQf9AN9WKRvDLc6OJXq1qQ&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKewjgoYv6wrrwAhWrVTABHYW3Du8Q6AEwDHoECBIAw#v=onepage&q=%2210.1007%2F978-3-030-42660-6\\_18%22&f=false](https://books.google.ca/books?id=iQDoDwAAQBAJ&pg=PA471&lpg=PA471&dq=%2210.1007/978-3-030-42660-6_18%22&source=bl&ots=y558rm8rD2&sig=ACfU3U2S1npASQf9AN9WKRvDLc6OJXq1qQ&hl=fr&sa=X&ved=2ahUKewjgoYv6wrrwAhWrVTABHYW3Du8Q6AEwDHoECBIAw#v=onepage&q=%2210.1007%2F978-3-030-42660-6_18%22&f=false)
- <https://www.ionisos.com/irradiation-gamma/>
- <https://dataintelo.com/report/ionizing-radiation-sterilization-market/>
- <https://www.iaea.org/newscenter/news/irradiation-secures-viet-nams-fruit-exports>
- <https://www.konnexis.com/>
- <https://neighborwebsj.com/uncategorized/6466250/recent-updates-in-food-irradiation-market-research-report-segmented-by-applications-geography-trends-and-projection-2026/>
- <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/aliments-nutrition/salubrite-aliments/irradiation-aliments.html>
- <https://www.steris-ast.com/fr/services/produits-alimentaires-et-recherche/>
- <https://www.iaea.org/services/education-and-training/training-courses>
- [https://iiaglobal.com/wp-content/uploads/2020/11/iaa\\_Uses\\_and\\_Applications\\_Radiation\\_Processing.pdf](https://iiaglobal.com/wp-content/uploads/2020/11/iaa_Uses_and_Applications_Radiation_Processing.pdf)

## Rayons X

**Description.** Les rayons X sont produits par accélération d'électrons (accélération au sens large : freinage, changement de trajectoire) sur une cible dans un tube à rayons X. Les électrons sont extraits par chauffage d'un filament métallique (cathode) et accélérés par un champ électrique dans un tube sous vide (**Fig. 12**). Ce faisceau est focalisé de manière à bombarder une cible métallique en tungstène ou en molybdène (anode). Le ralentissement des électrons par les atomes de la cible provoque un rayonnement continu de freinage appelé "*Bremsstrahlung*". Les rayons X pulsés impliquent une haute tension, qui est pulsée à travers les aliments à température ambiante ou réfrigérée. La source de rayonnement est entraînée électriquement, ce qui facilite l'intégration dans une opération existante (**Fig. 13**). L'efficacité des émissions augmente avec l'énergie cinétique des électrons incidents et le numéro atomique du matériau cible. Le tantalum, le tungstène et l'or sont des matériaux pratiques utilisés comme cibles à rayons X à haute puissance. Avec des énergies d'électrons supérieures à 2 MeV, l'intensité maximale des rayons X est dans la direction du faisceau d'électrons, et la dispersion angulaire diminue à mesure que l'énergie des électrons augmente.

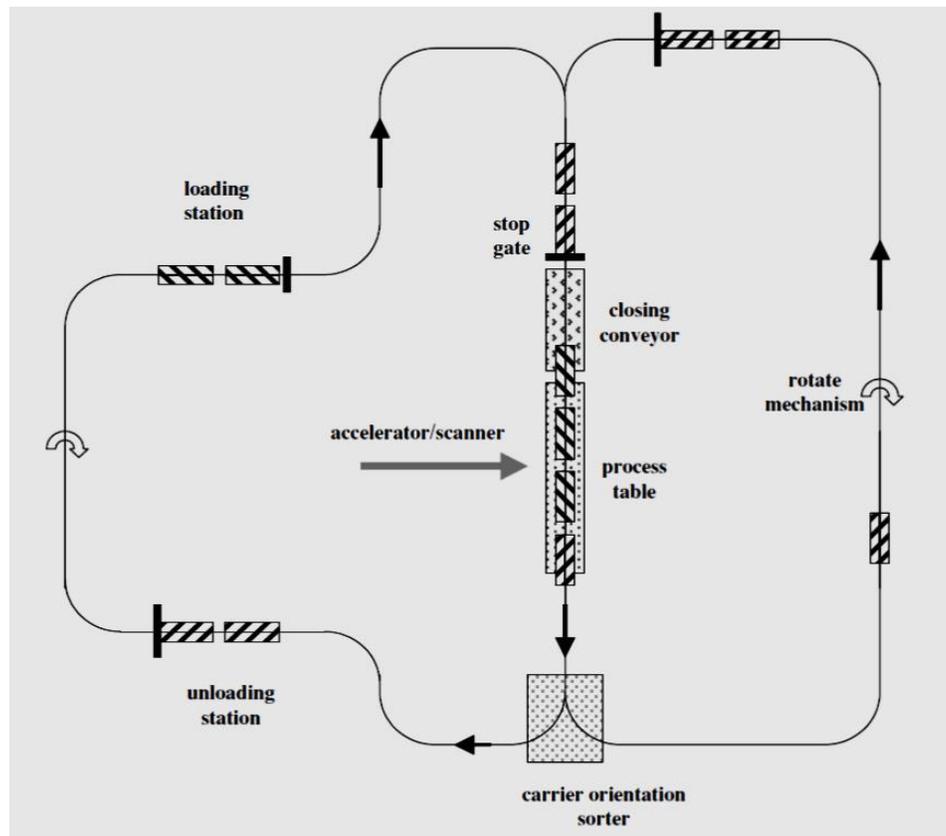


**Figure 12** – Schéma d'un tube à rayons X montrant l'émission de photons à rayons X par un convertisseur en or (d'après Salditt et al., 2017). Des électrons sont émis par la cathode chauffée et accélérés par une haute tension vers l'anode, constituée d'un métal à haute conductivité thermique (ex : cuivre, tungstène, molybdène). Les valeurs typiques sont de l'ordre de quelques kW de puissance du faisceau d'électrons, dont seule une infime fraction est convertie en rayons X par décélération (*bremstrahlung*) dans l'anode.

Contrairement aux irradiateurs gamma, les irradiateurs à rayons X ne nécessitent pas un blindage massif permanent du fait de l'absence de radionucléides. Dans ce contexte, un commutateur est

utilisé pour générer des impulsions de rayons X à haute intensité (Morris et al., 2017). Une installation de traitement aux rayons X typique comprend les principaux composants suivants:

- Bouclier biologique (également appelé bouclier radiologique).
- Zones de manutention et de mise en scène des produits.
- Mécanisme de transport du produit.
- Accélérateur d'électrons de haute puissance (généralement de l'ordre de 80 kW ou plus).
- Système de transport de faisceau d'électrons, y compris un balayage en cône et des aimants.
- Plaque (ou cible) de conversion électron-rayon X incluant un système de refroidissement.
- Systèmes de contrôle de processus et de sécurité.
- Équipements auxiliaires (par exemple, alimentation haute tension, générateur de radiofréquences, systèmes de vide, système de refroidissement) (GIPA-IAA, 2017).



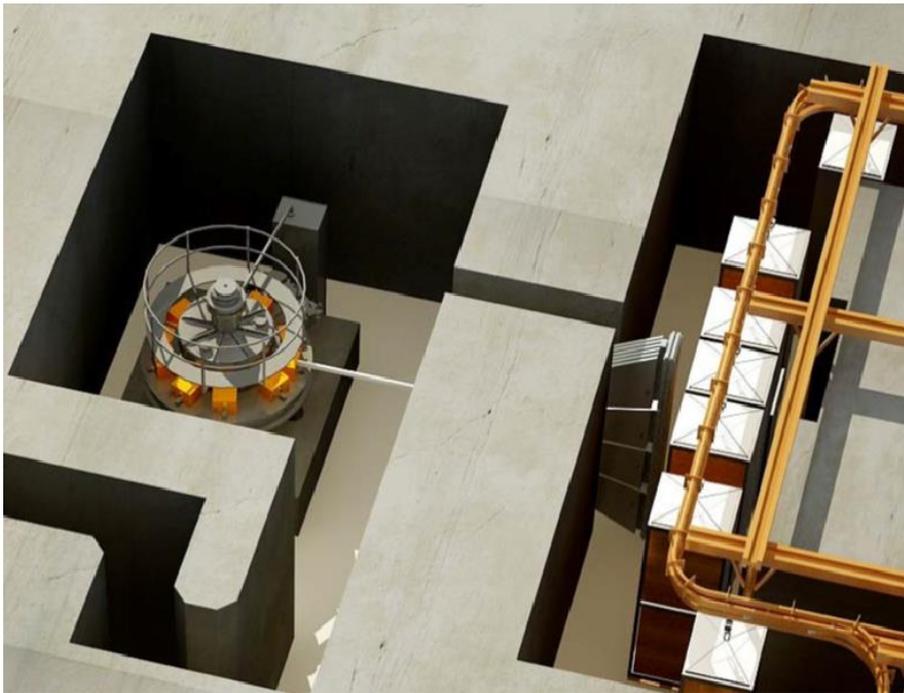
**Figure 13** - Diagramme schématisé d'un système de convoyeur aérien sans alimentation électrique et sans support utilisé pour transporter des produits alimentaires dans une installation d'irradiation aux rayons X (d'après Miller, 2005).

**Mode d'action.** Similairement à l'irradiation gamma, les rayons X (comme tous les rayonnements ionisants) inactivent les micro-organismes en endommageant les éléments critiques dans la

cellule, le plus souvent le matériel génétique. Ces dommages surviennent à la suite de l'effet direct ou indirect de l'énergie de rayonnement, empêchant ainsi la multiplication et la plupart des fonctions cellulaires (Liberty et al., 2013). Ainsi, les rayons X inactivent les micro-organismes principalement par rupture de l'ADN double brin dans les cellules selon un mécanisme qui peut se produire directement ou indirectement par photons de haute énergie, électrons secondaires et radicaux libres générés dans la nourriture (Moosekian et al., 2014).

### ***Littérature scientifique et exemples d'applications***

***Système de palettes rotatives.*** Un concept unique pour irradier de grandes charges de palettes de matériaux denses, tels que les fruits frais et les viandes, est appelé le Palletron™ (Fig. 14). La palette est placée sur un plateau tournant devant une longue cible de rayons X et elle est irradiée de côté tout au long de la rotation. Pour des hautes densités de marchandises (> 0.40 g/cm<sup>3</sup>), des collimateurs en acier épais sont placés de chaque côté du faisceau de rayons X pour limiter la divergence du faisceau. Des mesures expérimentales ont confirmé la validité de ce concept. L'augmentation de l'énergie des rayons X de 5 MeV à 7.5 MeV réduit considérablement le temps de traitement et augmente le débit pour la même puissance du faisceau d'électrons (Cleland et Stichelbaut, 2007).



**Figure 14** – Illustration d'un Rhodotron TT10000 (photo tirée de GIPA-IAA, 2017).

Parmi les techniques de stérilisation à froid, l'utilisation de rayons X pour la désinfection des aliments a récemment attiré plus d'intérêts du fait que les rayonnements sont de faible énergie,

dans la gamme de dizaines à centaines de kilo-électronvolts (keV) (Ha et al., 2017). De nombreuses études ont comparé les effets de faisceau d'électrons, de rayons gamma et de rayons X, mais la comparaison entre ces technologies n'est pas concluante en raison des différences dans les doses appliquées. Les électrons ont une pénétration limitée avec une profondeur d'environ 5 cm dans la nourriture, tandis que les rayons X ont une profondeur de pénétration considérablement plus élevée (60-400 cm) en fonction de l'énergie utilisée. Le traitement aux rayons X réduit ou élimine les sérovars de *Salmonelle* qui se sont avérés être les plus sensibles aux rayonnements parmi tous les organismes pathogènes dans les aliments. Les rayons X pulsés sont une technologie alternative qui utilise un commutateur d'ouverture à semi-conducteurs afin de générer des impulsions de faisceau d'électrons à haute intensité. Dinçer et Baysal (2004) ont rapporté une étude utilisant des rayons X pulsés pour produire jusqu'à 3 log réduction d'*E. coli* O157:H7 dans le bœuf haché. Les études actuelles de décontamination des aliments par irradiation aux rayons X à basse énergie ont principalement porté sur les propriétés physiques, chimiques, texturales post-irradiation et les propriétés sensorielles des aliments tels que les dattes, les amandes et les noix (Aleid et al., 2013), les épinards, la laitue, le poisson cru, les fruits de mer, les légumes transformés, certains produits laitiers et fromages frais (Lacivita et al., 2019), les céréales pour des traitements de désinfestation contre les insectes ravageurs (ex : charançons du riz) (Hossain et al., 2021), avec des taux d'inhibition satisfaisants contre les agents pathogènes *E. coli* O157:H7, *Cronobacter sakazakii*, *Salmonella enterica* ou *Listeria monocytogenes* mais aussi contre les moisissures. Au niveau des traitements de quarantaine, l'irradiation aux rayons X comme traitement appliqué sur les dattes et autres fruits secs présente des effets indésirables minimes sur le plan sensoriel et physico-chimique des produits, ce qui devrait considérablement améliorer leur commercialisation sur le marché international. Moy et Wong (2002) ont signalé que de faibles doses d'irradiation (< 1 KGy) sont efficaces pour la désinfestation d'insectes et l'inhibition de la germination des tubercules de fruits tropicaux. Des doses plus élevées (1-6 kGy) sont nécessaires pour réduire la détérioration et tuer les micro-organismes pathogènes (Aleid et al., 2013).

De nombreuses études restent à réaliser. Par exemple, 2 groupes de recherche différents ont étudié l'inactivation d'*E. coli* O157:H7 sur les feuilles d'épinards. Ils ont rapporté des valeurs de  $D_{10}$  (réduction de 90 % de la population bactérienne initiale) de 21 Gy et 1.1 kGy pour une irradiation aux rayons X de basse énergie provenant de différents sources et fonctionnant à différents niveaux d'énergie de tube de 70 kV et 150 kV respectivement. D'autres études rendent encore plus difficile les comparaisons par l'utilisation de filtres d'aluminium ou de béryllium. Il devient donc important qu'une étude entre différentes qualités de faisceau de rayons X à partir de la même source soient réalisées. Ceci est particulièrement pertinent lors de la conception des protocoles de stérilisation pour différents produits utilisant la même source de rayons X (Ha et al., 2017). L'utilisation de rayons X à basse énergie est de plus en plus demandé. Avec les progrès technologiques récents d'installations industrielles, les traitements combinés impliquant la combinaison de rayons X et d'extraits naturels antimicrobiens permettraient le développement de nouvelles technologies vertes commerciales (élimination de produits chimiques insecticides, désinfectants, additifs). De manière analogue avec les autres méthodes d'irradiation, ce type de

traitement combiné est une approche innovante en raison de son potentiel en économie d'énergie et de réduction des déchets, de la réduction de la durée du procédé. Au final, de tels procédés combinés permettraient de réduire la dose nécessaire pour assurer la salubrité alimentaire et une meilleure protection de la qualité des aliments.

### **Réglementation**

La FDA a récemment augmenté les limites énergétiques acceptables en rayons X de 5.0 MeV à 7.5 MeV pour l'irradiation aux rayons X des aliments, en réponse à une pétition soumise par la compagnie IBA (Cleland et Stichelbaut, 2007). Selon les bonnes pratiques, l'application aux rayons X ne doit jamais dépasser la dose recommandée de 10 kGy (Roberts, 2016). Les lois sur la réglementation des aliments irradiés varient d'un pays à l'autre, car chacun a une approche différente de l'irradiation des aliments et de l'étiquetage. Très peu de pays ont une autoréglementation (Brésil et Singapour), mais en général les règlements sont conformes à la Norme générale Codex pour les denrées alimentaires irradiées. La législation se limite souvent aux assaisonnements, épices, herbes, certains fruits et légumes frais ou secs, fruits de mer, produits carnés, volaille et ovoproduits (Lacivita et al., 2019).

### **Avantages**

- Technologie en plein essor : l'augmentation récente du prix du Cobalt 60 et l'augmentation de la capacité de puissance des faisceaux de l'industrie des accélérateurs d'électrons ont grandement amélioré les perspectives d'utilisation des rayons X (Cleland et Stichelbaut, 2007).
- Contrairement à l'irradiation gamma, aucune substance radioactive n'est impliquée dans le système. Similairement à l'irradiation gamma, les rayons X ne produisent pas de déchets radioactifs et peuvent traverser des matériaux épais (environ 30 à 40 cm). Cette caractéristique rend cette technologie appropriée pour traiter les aliments déjà emballés, évitant la recontamination du produit (Lacivita et al., 2019).
- Faibles exigences de blindage et encombrement relativement faible de l'irradiateur : cela minimise les problèmes de radioprotection, contrairement à l'utilisation du rayonnements gamma, et met ainsi en évidence son potentiel de faisabilité industrielle dans les usines de transformation des aliments (Ha et al., 2017, Jeong et al., 2010).
- Facilités en conjonction avec des équipements de transformation existants : i) possibilité de contrôler la direction du rayonnement produit électriquement, ii) possibilité de façonner la géométrie du champ de rayonnement pour l'adapter à différentes tailles de marchandises, iii) grande reproductibilité et sa versatilité.
- Aspect technique intéressant : avec des énergies d'électrons > 2 MeV, l'intensité maximale des rayons X est dans la direction du faisceau d'électrons, et la dispersion angulaire diminue à mesure que l'énergie des électrons augmente.

### **Inconvénients**

- Les rayons X avec des niveaux d'énergies > 3 MeV sont encore plus pénétrants que les rayons gamma du cobalt 60, mais auparavant leur utilisation a été entravée par des coûts plus élevés.
- Contrairement à l'émission isotrope des rayons gamma provenant de sources radioactives, les rayons X à haute énergie sont concentrés dans la direction de l'électron incident faisceau, et la dispersion diminue à mesure que le maximum l'énergie augmente (Cleland et Stichelbaut, 2007).
- Très peu de produits sont irradiés en utilisant les rayons X de nos jours (Follett, 2004). Les progrès de cette technologie diversifieront son utilisation dans futur. Mais il semble que l'irradiation gamma commerciale des aliments sera en compétition pendant une longue période (Ashraf et al., 2019).

### ***Principaux fournisseurs d'irradiateurs à rayons X – Accessibilité à des installations***

- Aerial CRT / Centre d'Excellence pour le Traitement par Rayonnement : <https://www.aerial-crt.com/centre-dexcellence-pour-le-traitement-par-rayonnement/>
- Comet Technologies USA Inc. : <https://www.comet-xray.com/en>
- European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) : <https://www.esrf.fr/>
- Hologic, Inc/Faxitron : <https://www.faxitron.com/>
- IBA Industrial : <https://www.iba-industrial.com/>
- Mevex Corporation : <https://www.mevex.com/>
- Precision X-Ray : <https://precisionxray.com/>
- Rad Source Technologies/Quastar : <https://www.radsources.com/>
- RadiaBeam Technologies, LLC : <https://radiabeam.com/>
- Rayfresh Foods Inc. : <https://rayfreshfoods.com/>
- Stellaray, Inc. : <https://stellar-micro.com/>
- Steris : <https://www.steris-ast.com/fr/services/rayons-x/>
- SureBeam Middle East Co. : <http://www.smebeam.com/food.html>

### **Pour en savoir plus**

#### ***Références bibliographiques***

Afrough, B., Eakins, J., Durley-White, S., Dowall, S., Findlay-Wilson, S., Graham, V., . . . Hewson, R. (2020). X-ray inactivation of RNA viruses without loss of biological characteristics. *Sci Rep*, 10(1), 21431. doi:10.1038/s41598-020-77972-5

Aleid, S. M., Dolan, K., Siddiq, M., Jeong, S., & Marks, B. (2013). Effect of low-energy X-ray irradiation on physical, chemical, textural and sensory properties of Dates. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(7), 1453-1459. doi:10.1111/ijfs.12112

Ashraf, S., Sood, M., Bandral, J. D., Trilokia, M., & Manzoor, M. (2019). Food irradiation: A review. *International Journal of Chemical Studies (IJCS)*, 7(2), 131-136.

Barbosa-Canovas, G. V., Schaffner, D. W., Pierson, M. D., & Zhang, Q. H. (2000). Pulsed X-rays. *J. Food Sci.*, 96-97.

- Cho, G.-L., & Ha, J.-W. (2019). Application of X-ray for inactivation of foodborne pathogens in ready-to-eat sliced ham and mechanism of the bactericidal action. *Food Control*, 96, 343-350. doi:10.1016/j.foodcont.2018.09.034
- Cleland, M. R., & Stichelbaut, F. (2007, July 29-August 2, 2007). Physical aspects of X-ray processing. Paper presented at the AccApp'07, Pocatello, Idaho, USA.
- De Araujo Rodrigues Junior, A. (Ed.) (2018). *Industrial irradiators and their radioprotection* (1st ed.). Maringa, PR, Brazil.
- Follett, P. A. (2004). Irradiation to control insects in fruits and vegetables for export from Hawaii. *Radiation Physics and Chemistry*, 71(1-2), 163-166. doi:10.1016/j.radphyschem.2004.03.074
- GIPA-IAA. (2017). A comparison of gamma, e-beam, X-ray and ethylene oxide technologies for the industrial sterilization of medical devices and healthcare products. In Gamma Industry Processing Alliance (GIPA) and International Irradiation Association (iia).
- Ha, T. M. H., Yong, D., Lee, E. M. Y., Kumar, P., Lee, Y. K., & Zhou, W. (2017). Activation and inactivation of *Bacillus pumilus* spores by kiloelectron volt X-ray irradiation. *PLoS One*, 12(5), e0177571. doi:10.1371/journal.pone.0177571
- Hossain, F., Follett, P., Shankar, S., Begum, T., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2021). Radiosensitization of rice weevil *Sitophilus oryzae* using combined treatments of essential oils and ionizing radiation with gamma-ray and X-Ray at different dose rates. *Radiation Physics and Chemistry*, 180. doi:10.1016/j.radphyschem.2020.109286
- Jeong, S., Marks, B. P., Ryser, E. T., & Moosekian, S. R. (2010). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on lettuce, using low-energy X-ray irradiation. *J. Food Prot.*, 73(3), 547-551.
- Kim, T.-K., Hwang, K.-E., Ham, Y.-K., Kim, H.-W., Paik, H.-D., Kim, Y.-B., & Choi, Y.-S. (2020). Interactions between raw meat irradiated by various kinds of ionizing radiation and transglutaminase treatment in meat emulsion systems. *Radiation Physics and Chemistry*, 166. doi:10.1016/j.radphyschem.2019.108452
- Lacivita, V., Mentana, A., Centonze, D., Chiaravalle, E., Zambrini, V. A., Conte, A., & Del Nobile, M. A. (2019). Study of X-Ray irradiation applied to fresh dairy cheese. *Lwt*, 103, 186-191. doi:10.1016/j.lwt.2018.12.073
- Liberty, J. T., Dickinson, D. I., Achebe, A. E., & Salihu, M. B. (2013). Overview of the principles and effects of irradiation on food processing & preservation. *Int. J. of Multidisciplinary and Current Research*, Nov/Dec, 236-243.
- Miller, R. B. (2005). *Electronic irradiation of foods - An introduction to the technology* (M. B. Miller Ed.). New York, NY, USA: Springer Science + Business Media, Inc.
- Moosekian, S. R., Jeong, S., & Ryser, E. T. (2014). Inactivation of sanitizer-injured *Escherichia coli* O157:H7 on baby spinach using X-ray irradiation. *Food Control*, 36(1), 243-247. doi:10.1016/j.foodcont.2013.08.024
- Morris, C., Brody, A. L., & Wicker, L. (2007). Non-thermal food processing/preservation technologies: a review with packaging implications. *Packaging Technology and Science*, 20(4), 275-286. doi:10.1002/pts.789
- Moy, J. H., & Wong, L. (2002). The efficacy and progress in using radiation as a quarantine treatment of tropical fruits - a case study in Hawaii. *Rad. Phys. Chem.*, 63, 397-401.
- Park, J. S., & Ha, J. W. (2019). X-ray irradiation inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* on sliced cheese and its bactericidal mechanisms. *Int J Food Microbiol*, 289, 127-133. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.09.011
- Roberts, P. B. (2016). Food irradiation: Standards, regulations and world-wide trade. *Radiation Physics and Chemistry*, 129, 30-34. doi:10.1016/j.radphyschem.2016.06.005
- Salditt, T., Aspelmeyer, T., Aeffner, S. (2017). *Biomedical imaging: Principles of radiography, tomography and medical physics*. Ed: Walter De Gruyter Inc. (Germany). ISBN-10: 3110426684

Yim, D. G., Jo, C., Mahabbat, A., Park, J. Y., Lee, S. Y., & Nam, K. C. (2019). Combined Effect of Aging and Irradiation on Physicochemical Quality of Pork Shoulder. *Food Sci Anim Resour*, 39(3), 510-519. doi:10.5851/kosfa.2019.e46

Zehi, Z. B., Afshari, A., Noori, S. M. A., Jannat, B., & Hashemi, M. (2020). The Effects of X-Ray Irradiation on Safety and Nutritional Value of Food: A Systematic Review Article. *Curr Pharm Biotechnol*, 21(10), 919-926. doi:10.2174/1389201021666200219093834

### **Liens Internet**

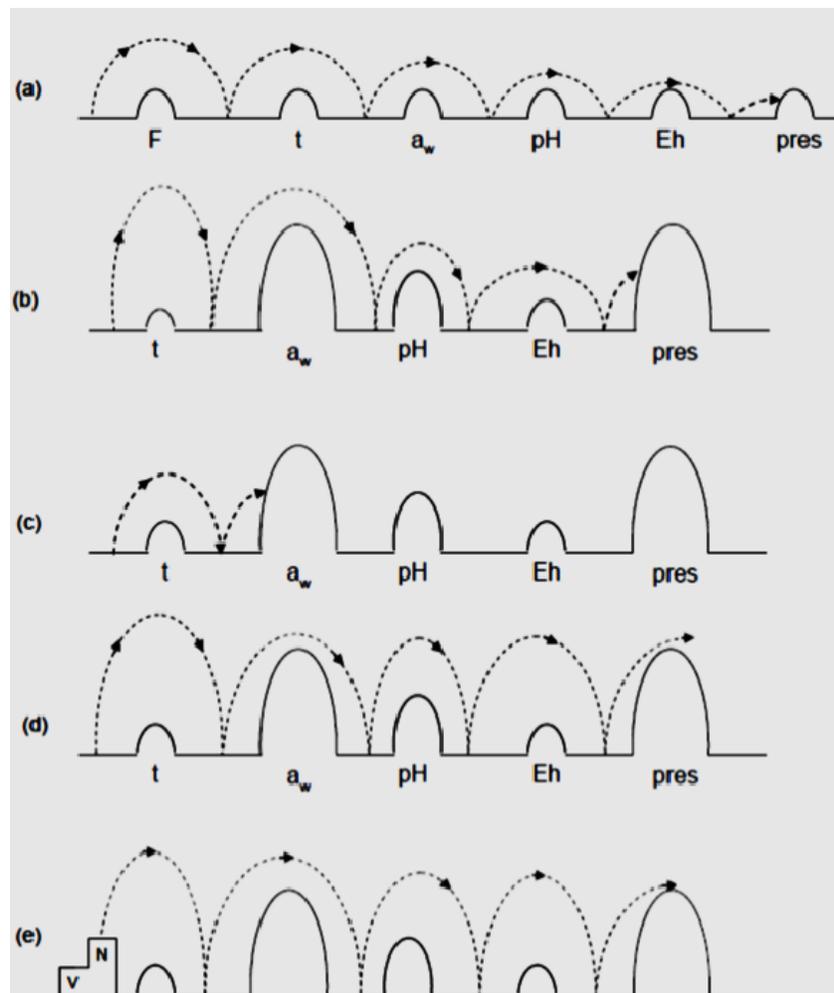
- <https://www.iaea.org/>
- <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/aliments-nutrition/salubrite-aliments/irradiation-aliments.html>
- <https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/food-irradiation-what-you-need-know>
- <https://www.britannica.com/topic/food-preservation/Packaging>
- <https://ccr.ucdavis.edu/food-irradiation/how-does-food-irradiation-work>
- <https://www.fda.gov/food/irradiation-food-packaging/overview-irradiation-food-and-packaging>
- <https://www.arpana.gov.au/our-services/testing-and-calibration/calibration/psdl/low-energy-x-rays>
- <https://phys.org/news/2017-11-low-energy-x-rays-surprisingly-effective-bacterial.html>
- <https://ebeam-tamu.org/>
- <https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2019/september/columns/processing-food-irradiation>
- <https://www.ifst.org/resources/information-statements/food-irradiation>
- <https://www.slideshare.net/SasithNuwantha/x-ray-infrared-food-preservation-technology>

### **NOTE 1 : Concept des traitements combinés (Hurdle technology)**

Toutes les méthodes ci-dessus appliquées pour la conservation des produits alimentaires présentent certains avantages mais aussi des inconvénients lorsqu'utilisées seules. Cependant, la limitation d'une technique peut être surmontée en utilisant des traitements combinés. Le concept de technologies d'obstacle (encore appelé "méthodes mixtes" ou "effets barrières") permet de combiner – simultanément ou séquentiellement – plus d'une méthode de conservation (chacune à des intensités/doses moins élevées) afin d'atteindre un niveau accru de sécurité et une plus grande stabilité du produit (effet synergique). Les facteurs d'obstacles (physiques, chimiques ou biologiques) doivent être sélectifs et "suffisamment élevés" pour que les micro-organismes ne puissent les surmonter et répondre aux préférences des consommateurs d'une manière économiquement raisonnable. Ce concept a gagné en popularité en ce qui concerne la R&D et les applications industrielles ces dernières années mais il nécessite encore des études plus approfondies en présence des technologies émergentes (Rostami et al., 2016 ; Singh, 2020). Selon Saubusse (2007) et Leistner (2002), la technologie de barrière est une stratégie qui permet d'assurer la sécurité sanitaire des aliments tout en conservant leurs qualités organoleptiques. Elle consiste en l'utilisation de différents facteurs qui combinés permettent une meilleure maîtrise du développement microbien (**Fig. 15**).

Parmi les études récentes, les Laboratoires RESALA de l'INRS ont développé diverses formulations antimicrobiennes à base d'extraits végétaux naturels aussi bien intégrées dans les aliments que dans des emballages/enrobages bioactifs, contre un large éventail de bactéries, de champignons

et d'insectes. Dans cette perspective, ils ont développé des traitements combinés impliquant les techniques d'irradiation gamma, de rayons X, de rayons UV-C, d'ozone, d'emballages sous atmosphère modifiée (MAP), d'emballages/enrobages bioactifs pour l'inactivation de micro-organismes et pour augmenter la durée de conservation de divers types d'aliments. Par exemple, les extraits de thym et de romarin sont reconnus comme des agents antimicrobiens. Les composés phénoliques issus des extraits végétaux ont également des propriétés antioxydantes très puissantes qui permettent ainsi de préserver la qualité organoleptique des aliments traités. En réalisant des traitements combinés utilisant des technologies émergentes (ex : irradiation, ozone) en présence d'extraits bioactifs, il a été possible d'augmenter de 2 à 10 fois la radiosensibilité des bactéries, ce qui a permis de réduire le temps d'exposition aux traitements et de mieux préserver les propriétés sensorielles des aliments.



**Figure 15** - Cinq (5) exemples de technologies de barrières (ou effets combinés) utilisés pour la conservation des aliments. Chaque effet barrière peut être utilisé simultanément ou séquentiellement, selon le type de barrière et le procédé de fabrication. Les symboles ont les

significations suivantes : F = chauffage, t = réfrigération, Aw = activité de l'eau, pH, Eh = potentiel redox, pres = conservateur, V = vitamines, N = nutriments (d'après Saubusse, 2007).

## **Pour en savoir plus**

### **Références bibliographiques**

Abdullahi, N., & Dandago, M. A. (2021). Hurdle Technology: Principles and Recent Applications in Foods. *Indonesian Food and Nutrition Progress*, 17(1). doi:10.22146/ifnp.52552

Aditya, P., & Murtaza, N. (2015). Hurdle technology - An approach towards food preservation. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 4(7), 802-809.

Albert, T., Braun, P. G., Saffaf, J., & Wiacek, C. (2021). Physical Methods for the Decontamination of Meat Surfaces. *Current Clinical Microbiology Reports*, 8(2), 9-20. doi:10.1007/s40588-021-00156-w

Aworh, O. C. (2021). Food safety issues in fresh produce supply chain with particular reference to sub-Saharan Africa. *Food Control*, 123. doi:10.1016/j.foodcont.2020.107737

Chen, J. H., Ren, Y., Seow, J., Liu, T., Bang, W. S., & Yuk, H. G. (2012). Intervention Technologies for Ensuring Microbiological Safety of Meat: Current and Future Trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11(2), 119-132. doi:10.1111/j.1541-4337.2011.00177.x

Kaavya, R., Pandiselvam, R., Abdullah, S., Sruthi, N. U., Jayanath, Y., Ashokkumar, C., . . . Ramesh, S. V. (2021). Emerging non-thermal technologies for decontamination of Salmonella in food. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 400-418. doi:10.1016/j.tifs.2021.04.011

Khouryieh, H. A. (2021). Novel and emerging technologies used by the U.S. food processing industry. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67. doi:10.1016/j.ifset.2020.102559

Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O., & Schoessler, K. (2011). Emerging technologies in food processing. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2, 203-235. doi:10.1146/annurev.food.102308.124129

Kontominas, M. G., Badeka, A. V., Kosma, I. S., & Nathanailides, C. I. (2021). Innovative Seafood Preservation Technologies: Recent Developments. *Animals (Basel)*, 11(1). doi:10.3390/ani11010092

Lacroix, M. (2005, August 28-September 2, 2005). Combined industrial processes with irradiation to assure innocuity and preservation of fruits and vegetables. Paper presented at the 2005 International Nuclear Atlantic Conference, Santos, SP, Brazil.

Lee, J. Y., Yang, S. Y., & Yoon, K. S. (2021). Control Measures of Pathogenic Microorganisms and Shelf-Life Extension of Fresh-Cut Vegetables. *Foods*, 10(3). doi:10.3390/foods10030655

Leistner, L. (2002). Hurdle technology. In *Food Engineering (Vol. 3)*. Paris, France: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).

Marçal, S., Sousa, A. S., Taofiq, O., Antunes, F., Morais, A. M. M. B., Freitas, A. C., . . . Pintado, M. (2021). Impact of postharvest preservation methods on nutritional value and bioactive properties of mushrooms. *Trends in Food Science & Technology*, 110, 418-431. doi:10.1016/j.tifs.2021.02.007

Mir, S. A., Dar, B. N., Shah, M. A., Sofi, S. A., Hamdani, A. M., Oliveira, C. A. F., . . . Sant'Ana, A. S. (2021). Application of new technologies in decontamination of mycotoxins in cereal grains: Challenges, and perspectives. *Food Chem Toxicol*, 148, 111976. doi:10.1016/j.fct.2021.111976

Miranda, R. (2019). Understanding and managing risk of norovirus contamination on frozen berries from farm to fork. (PhD). Rutgers, The State University of New Jersey, USA.

Monique, L., & Peter, F. (2015). Combination irradiation treatments for food safety and phytosanitary uses. *Stewart Postharvest Review*, 11(3), 1-10. doi:10.2212/spr.2015.3.4

Nunes, V. M. R., Moosavi, M., Mousavi Khaneghah, A., & Oliveira, C. A. F. (2021). Innovative modifications in food processing to reduce the levels of mycotoxins. *Current Opinion in Food Science*, 38, 155-161. doi:10.1016/j.cofs.2020.11.010

Pal, M., Shimelis, A., Mamo, W., Barot, A. M., Pinto, S. V., & Prajapati, J. P. (2017). Hurdle technology: A novel approach for food preservation. *Beverage and Food World*, 44(1), 20-26.

Pexara, A., & Govaris, A. (2020). Foodborne Viruses and Innovative Non-Thermal Food-Processing Technologies. *Foods*, 9(11). doi:10.3390/foods9111520

Pundhir, A., & Murtaza, N. (2015). Hurdle technology - An approach towards food preservation. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 4(7), 802-809.

Rifna, E. J., Singh, S. K., Chakraborty, S., & Dwivedi, M. (2019). Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances. *Food Res Int*, 126, 108654. doi:10.1016/j.foodres.2019.108654

Rosario, D. K. A., Rodrigues, B. L., Bernardes, P. C., & Conte-Junior, C. A. (2021). Principles and applications of non-thermal technologies and alternative chemical compounds in meat and fish. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 61(7), 1163-1183. doi:10.1080/10408398.2020.1754755

Rostami, Z., Ayaz, M., Khan, M., Mishra, A., Rashidzadeh, S., & Shariati, M. (2016). Food Preservation by Hurdle Technology: A Review of Different Hurdle and Interaction with Focus on Foodstuffs. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 10(4), 2633-2639. doi:10.22207/jpam.10.4.20

Saubusse, M. (2007). Effet de barrière des populations microbiennes des laits crus vis-à-vis de *Listeria monocytogenes* dans un fromage à pâte pressée non cuite. (PhD). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II; Université d'Auvergne - Clermont-Ferrand I, France. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00717826>

Shabbir, M. A., Ahmed, H., Maan, A. A., Rehman, A., Afraz, M. T., Iqbal, M. W., . . . Aadil, R. M. (2021). Effect of non-thermal processing techniques on pathogenic and spoilage microorganisms of milk and milk products. *Food Science and Technology*, 41(2), 279-294. doi:10.1590/fst.05820

Singh, D. Hurdle technology- Multitarget preservation approach in pandemic. *Food and Agriculture Spectrum Journal (FASJ)*, FASJ010409, 1-5.

Thakur, B. R., & Singh, R. K. (1995). Combination processes in food irradiation. *Trends in Food Science & Technology*, 6, 7-11.

Vivek, K. (2019). A Review on Postharvest Management and Advances in the Minimal Processing of Fresh-Cut Fruits and Vegetables. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 8(5), 1178-1187. doi:10.15414/jmbfs.2019.8.5.1178-1187

Zhao, Y. M., de Alba, M., Sun, D. W., & Tiwari, B. (2019). Principles and recent applications of novel non-thermal processing technologies for the fish industry-a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 59(5), 728-742. doi:10.1080/10408398.2018.1495613

### **Liens Internet**

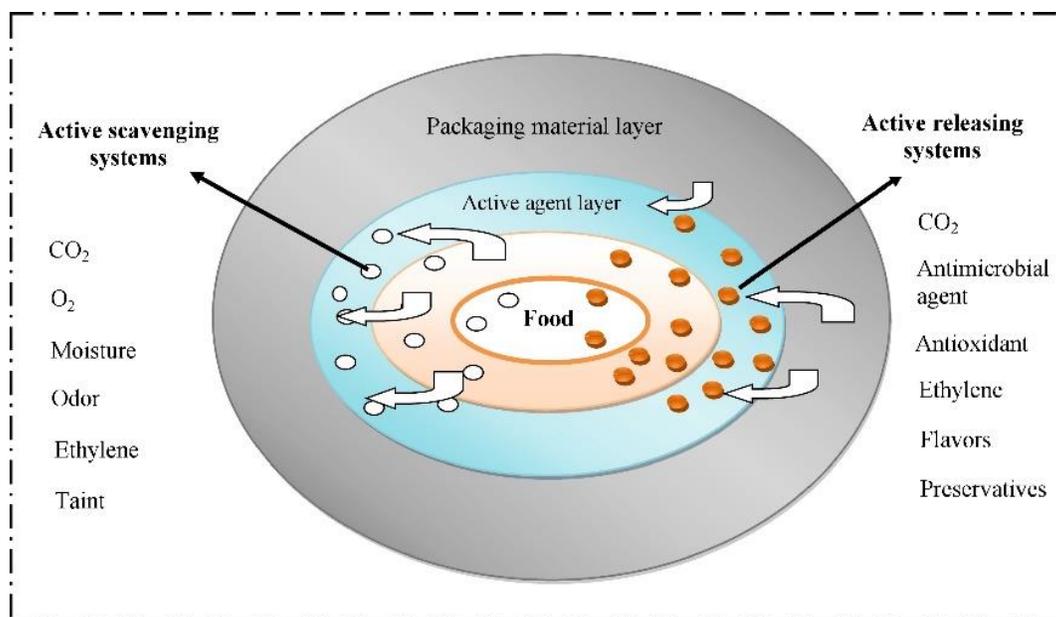
- [https://books.google.ca/books?id=vSDDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs\\_ViewAPI&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ca/books?id=vSDDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1128/9781555819972>

- <https://www.sciencedirect.com/book/9780128171905/food-quality-and-shelf-life>
- <https://www.pmg.engineering/hurdle-technology/>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/food-science/hurdle-technology>
- <https://www.slideshare.net/ammarbabar18/hurdle-technology-27567857>
- <https://www.agri-neo.com/neo-pure/>
- [https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2002/december/columns/products-and-technologies\\_processing](https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2002/december/columns/products-and-technologies_processing)

## II - Emballages et enrobages bioactifs

### Emballages actifs

**Description.** La croissance démographique se traduit par une augmentation importante de la demande alimentaire qui se traduit également par une expansion du marché mondial de l'emballage. Cette tendance a contribué à l'émergence du concept d'emballage alimentaire actif. Le but des emballages alimentaires actifs est de créer à l'intérieur de l'emballage un environnement qui retarde ou empêche la croissance de micro-organismes à la surface du produit, afin de prolonger la durée de conservation et d'améliorer la sécurité des denrées alimentaires (**Fig. 16**). Ces types d'emballages sont conçus de façon à incorporer délibérément des constituants qui libèrent ou absorbent des substances dans les produits emballés ou dans l'environnement des denrées alimentaires. Des additifs tels que des agents antimicrobiens (extraits naturels, nanoparticules), antioxydants, des piègeurs d'oxygène, des agents anti-brunissement, des nutraceutiques, des exhausteurs de goût et des absorbeurs peuvent également être ajoutés dans la formulation du film, mais aussi des technologies permettant d'obtenir des films à perméabilité sélective (contrôlée) ou des emballages sous atmosphère modifiée (MAP), tel que présenté au **Tableau 1**. Ces emballages permettent de mieux répondre aux évolutions du marché et aux exigences des consommateurs et des industriels tout en ralentissant considérablement le processus de dégradation et en améliorant le contrôle de la fraîcheur.



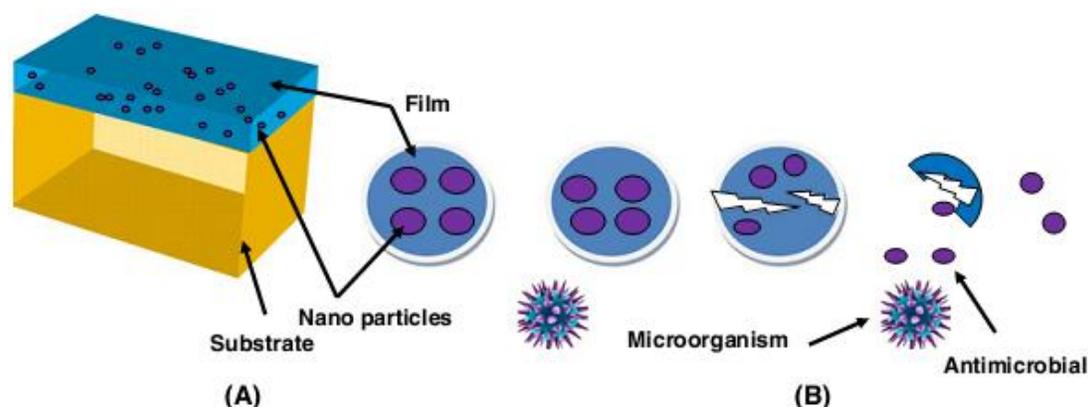
**Figure 16** – Concept d'emballage actif associant le rôle conservateur des antimicrobiens et autres composants avec l'emballage préexistant (d'après Salmieri et al., 2022).

**Tableau 1** – Principales applications des emballages actifs au-delà de l'effet barrière (Source : Yeza, 2012).

Type d'emballage actif	Description
Absorbants d'oxygène	Composés à base de fer (ou de poudres de fer) commercialisés sous forme de sachets. Leur fonctionnement repose sur l'oxydation du fer en milieu hydraté.
Émetteurs d'éthanol	Incorporation d'éthanol dans les bouchons, emballages et contenants.
Agents antimicrobiens	Films renfermant des produits antimicrobiens qui réduisent, empêchent ou freinent la prolifération des micro-organismes (levures, moisissures, bactéries).
Nanomatériaux antimicrobiens	Recours à des nanoparticules synthétiques d'argent, de silice, d'oxyde de zinc ou d'oxyde de titane dans les films ou barquettes alimentaires, pour réduire la formation de germes en surface.
Films à perméabilité sélective (contrôlée)	Très recherchés pour le conditionnement sous atmosphère modifiée (MAP) de végétaux frais ou faiblement transformés.
Emballage sous atmosphère modifiée (MAP)	Procédé qui repose sur l'altération de la composition de gaz en contact avec la nourriture (remplacement de l'air par un seul gaz ou un mélange de gaz). Le ratio oxygène, azote, monoxyde et dioxyde de carbone est modifié en fonction du produit alimentaire.

**Littérature scientifique et exemples d'applications.** Les emballages actifs représentent une avancée par rapport aux emballages traditionnels dans la mesure où ils offrent bien plus qu'une simple protection : ils interagissent avec l'aliment, et dans certains cas, répondent à des changements du milieu environnant ou du produit lui-même, pour préserver, le plus longtemps

possible et de façon optimale, ses qualités organoleptiques et nutritionnelles. Disponibles actuellement sur le marché, les contenants "Toujours Frais" absorbent et éliminent l'éthylène libéré au cours du mûrissement des fruits et légumes, et permettent ainsi de les garder plus frais que les contenants de plastique ordinaires. De nombreuses universités et centres de recherche, dont font partie les Laboratoires RESALA de l'INRS, visent la production de biomatériaux (papier et plastique) pour des emballages actifs antibactériens et antioxydants à base de biopolymères ou de polymères biodégradables. La **Fig. 17** représente un modèle éclaté d'un enrobage (coating) antimicrobien avec nanoparticules appliqué sur un emballage et son action sur les micro-organismes.



**Figure 17** – (A) Vue éclatée d'un type de revêtement antimicrobien sur un film d'emballage; (B) Effet inhibiteurs des nanoparticules à base d'amidon hydrolysés et de lysozyme comme agent antimicrobien (d'après Neethirajan et Jayas, 2011).

#### **NOTE 2 : Emballages "intelligents"**

En proposant des dispositifs d'information qui "parlent" directement aux consommateurs, les emballages dits "intelligents" ont pour fonction de recueillir et de donner de l'information sur l'état et la qualité des produits. Les techniques avancées qui sont mises en jeu utilisent des nanomatériaux (nanoparticules ou nanofibres) qui changent de couleur en présence de l'agent en question, des protéines luminescentes qui s'accrochent aux parois des cellules de bactéries pathogènes et émet un rayonnement visible. De tels emballages présentent l'avantage dans la détection rapide des agents déterminés : l'oxygène, l'éthanol (indicateur de la détérioration des aliments), les toxines, les variations de température de conservation ou même la présence de bactéries. Ces nanocapteurs peuvent également fournir en permanence des informations sur l'état du produit, sans liaison filaire. À l'aide des nanocapteurs "indicateurs", les emballages intelligents peuvent fournir aux consommateurs des informations suivantes :

- **Contaminations chimiques et microbiennes** : Les nanocapteurs indiquent la présence des composés chimiques, des bactéries pathogènes (*Salmonella*, *Listeria*), des toxines (mycotoxines) dans l'aliment via un changement de couleur. Ils peuvent être incorporés directement à l'encre d'étiquetage ou aux matériaux de l'emballage où ils réagissent comme

une "langue" ou un "nez" électronique détectant des composés chimiques provenant de la dégradation des aliments.

- **Rupture de la chaîne du froid** : Grâce aux nanoparticules, la rupture de la chaîne du froid – qui engendre souvent des intoxications alimentaires – peut être identifiée via un changement de couleur (ex : indicateurs temps-température ; ITT).
- **Fraîcheur des aliments** : Étiquette contenant un réactif à base de nanoparticules qui change de manière irréversible (information claire et objective sur l'état d'un produit conservé).
- **Fuites de l'emballage et détérioration de l'aliment** : Produits emballés dans sous atmosphère modifiée (MAP). Une encre contenant des nanoparticules d'oxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) sensibles à la lumière, permet de détecter une trop grande quantité d'oxygène dans l'emballage et révélant si un paquet a été ouvert ou endommagé.
- **Assurance-traçabilité** : Des dispositifs utilisant des nanocodes à barres identifiés par radiofréquence (RFID) assurent la traçabilité, la protection de la marque et l'authenticité du produit.
- **Maturité du produit** : Des nanofilms réagissent à des odeurs via un changement de couleur lors du mûrissement des fruits, révélant le stade de maturité du produit.

### NOTE 3 : Emballages biodégradables

La biodégradabilité d'un matériau se définit comme sa capacité intrinsèque à être dégradé par une attaque microbienne, pour simplifier progressivement sa structure et finalement se convertir en CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et/ou CH<sub>4</sub> et une nouvelle biomasse. Les matériaux biodégradables peuvent être produits à partir de différentes sources. Selon l'origine des matières premières et des voies de synthèse, on peut distinguer 2 possibilités de production des matériaux biodégradables :

- **Polymères biodégradables issus de l'industrie pétrochimique** : Ces matériaux sont obtenus en associant des polymères traditionnels d'origine pétrochimique (ex : polyéthylène, polypropylène) avec un composé naturel biodégradable (ex : amidon, cellulose à un ratio 10%).
- **Polymères biodégradables issus de ressources renouvelables** : Polymères naturels ou biopolymères, polymères d'origine bactérienne et polymères synthétiques. Le **Tableau 2** recense certains polymères biodégradables spécifiques, selon l'origine des matières premières et les voies de synthèse (issus de l'industrie pétrochimique ou issus des ressources renouvelables).

**Tableau 2** – Les différents polymères biodégradables selon l'origine des matières premières et les voies de synthèse.

Polymères biodégradables d'origine pétrochimique			Polymères biodégradables à base de ressources renouvelables		
Composition	Nom commercial	Fournisseur	Composition	Nom commercial	Fournisseur
Amidon / Polyéthylène	Ecostar	St Lawrence Starch Company, GB	Amidon granulaire	Ecopolym	Polychim, Italie
Amidon / PVA	Mater-Bi, classe A	Novamont, Italie	Amidon granulaire	Polyclean	Archer Daniels Midland, USA

<b>Amidon / PCL</b>	Mater-Bi, classe 2 et V	Novamont, Italie	<b>Amidon granulaire</b>	Amyplast	Amylum, Italie
<b>Amidon / PCL</b>	Biofilm Biotec	Grande Bretagne	<b>Amidon de pomme de terre</b>	Solanyl	Rodenburg, Pays-Bas
<b>Amidon / PP</b>	Novo	Novon International, Chine	<b>Amidon déstructuré</b>	Ecofram	National Starch, USA
<b>Amidon/copolyester</b>	Fiberplast, Biofilm	Ulice-Limagrain (France)	<b>Amidon thermoplastique</b>	Paragon	Avebe, Pays-Bas
<b>Polycaprolactone</b>	Tone	Union carbide, USA	<b>Acétate de cellulose</b>	Bioceta	Mazzucchelli, Italie
<b>Polycaprolactone</b>	CAPA	Solvay, Belgique	<b>Acétate de cellulose</b>	Tenite	Eastman Chemical, USA
<b>Polycaprolactone</b>	Cal-green	Daicel Chemical, Japon	<b>Acétate de cellulose</b>	Natureflex	UCB, Grande Bretagne
<b>Polybutylène succinate</b>	Bionolle	Showa High Polymer, Japon	<b>Acétate de cellulose</b>	fasal	IFA, Autriche
<b>Polyester amide</b>	BAK	Bayer, Allemagne	<b>Amidon / Acétate de cellulose</b>	Mater-Bi, classe Y	Novamont, Italie
<b>Copolyester</b>	Ecoflex	BASF Allemagne	<b>Amidon / Acétate de cellulose</b>	Bioplast	Biotec, Grande Bretagne
<b>Copolyester</b>	Eastarbio	Eastman Chemical, USA	<b>PHBV</b>	Biopol	Monsanto, USA (abandonné)
<b>Copolyester</b>	Skygreen	Sunnkyong, Corée	<b>PLA</b>	EcoPla devenu Natureworks	Cargill Dow, USA
<b>PET modifié</b>	Biomax	Dupont, USA	<b>PLA</b>	Heplon	Chronopol, USA
<b>Polyvinyl alcool</b>	Vinex	Air Products and Chemical	<b>PLA</b>	Lacea	Mitsui Chemical, Japon
<b>Polyvinyl alcool</b>	Aquafilem	Linpac Plastics, GB	<b>PLA</b>	Lacty	Shimadzu, Japon
			<b>PHA (Polyhydroxyalcanoate)</b>	Biomer	Biomer, Allemagne
			<b>Pellulane</b>	Pullulan	Hashashibana, Japon
			<b>Chitosane</b>	Dorou	Aicela Chemical, Japon
			<b>Chitosane</b>	Kytex	Marine Commodities Inc., USA

Pour répondre aux préoccupations croissantes des consommateurs, la production d'emballages biodégradables est devenue un objectif important chez les producteurs d'emballages mais aussi chez les transformateurs alimentaires. Le développement d'emballages à base de biopolymères semble prometteur. Par exemple, la synthèse de nanofibres de biopolymères (cellulose, collagène) a permis de les utiliser comme agents de renforcement dans la composition de films biodégradables afin de leur conférer des propriétés mécaniques et barrières comparables aux polymères traditionnels existant sur le marché. Combinés à certains nanomatériaux (ex : nanoargile, nanocellulose), ces biopolymères démontrent des propriétés pouvant contribuer à améliorer la qualité des emballages tout en demeurant biodégradables et sécuritaires pour l'environnement.

**Pour en savoir plus**

### **Références bibliographiques**

Abbasi, Z., Aminzare, M., Hassanzad Azar, H., & Rostamizadeh, K. (2021). Effect of corn starch coating incorporated with nanoemulsion of *Zataria multiflora* essential oil fortified with cinnamaldehyde on microbial quality of fresh chicken meat and fate of inoculated *Listeria monocytogenes*. *J Food Sci Technol*, 58(7), 2677-2687. doi:10.1007/s13197-020-04774-y

Ben Slimane, E., & Sadok, S. (2018). Collagen from Cartilaginous Fish By-Products for a Potential Application in Bioactive Film Composite. *Mar Drugs*, 16(6). doi:10.3390/md16060211

Chen, C., Xu, Z., Ma, Y., Liu, J., Zhang, Q., Tang, Z., . . . Xie, J. (2018). Properties, vapour-phase antimicrobial and antioxidant activities of active poly(vinyl alcohol) packaging films incorporated with clove oil. *Food Control*, 88, 105-112. doi:10.1016/j.foodcont.2017.12.039

Espitia, P. J. P., Fuenmayor, C. A., & Otoni, C. G. (2019). Nanoemulsions: Synthesis, Characterization, and Application in Bio-Based Active Food Packaging. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 18(1), 264-285. doi:10.1111/1541-4337.12405

Goddard, J. M., & Herskovitz, J. E. (2020, September 1, 2020). Reducing food waste via active packaging. *Food Technology Magazine*, 74(9). Retrieved from <https://www.ift.org/news-and-publications/food-technology-magazine/issues/2020/september/features/reducing-food-waste-via-active-packaging>

Guo, Y., Chen, X., Yang, F., Wang, T., Ni, M., Chen, Y., . . . Wang, S. (2019). Preparation and Characterization of Chitosan-Based Ternary Blend Edible Films with Efficient Antimicrobial Activities for Food Packaging Applications. *J Food Sci*, 84(6), 1411-1419. doi:10.1111/1750-3841.14650

Hajivand, P., Aryanejad, S., Akbari, I., & Hemmati, A. (2020). Fabrication and characterization of a promising oregano-extract/psyllium-seed mucilage edible film for food packaging. *Journal of Food Science*, 85(8), 2481-2490. doi:10.1111/1750-3841.15331

Hu, Y., Guo, Q., Liu, P., Zhu, R., Lu, F., Ramaswamy, S., . . . Zhang, X. (2020). Fabrication of Novel Cellulose-Based Antibacterial Film Loaded with Poacic Acid against *Staphylococcus Aureus*. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(3), 745-754. doi:10.1007/s10924-020-01915-4

Koshani, R., Zhang, J., van de Ven, T. G. M., Lu, X., & Wang, Y. (2021). Modified Hairy Nanocrystalline Cellulose as Photobactericidal Nanofillers for Food Packaging Application. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(31), 10513-10523. doi:10.1021/acssuschemeng.1c02289

Lapointe, R. (2012). Bioplastiques biodégradables, compostables et biosourcés pour les emballages alimentaires, distinctions subtiles mais significatives. (M.Env.). Université de Sherbrooke, QC, Canada.

Li, G., Zhang, Z., Liu, H., & Hu, L. (2021). Nanoemulsion-based delivery approaches for nutraceuticals: fabrication, application, characterization, biological fate, potential toxicity and future trends. *Food Funct*, 12(5), 1933-1953. doi:10.1039/d0fo02686g

Liu, Y. (2018). Nanocellulose-based materials: from colloidal assembly to functional films. (PhD). Stockholm University, Sweden.

Mendes, J. F., Norcino, L. B., Martins, H. H., Manrich, A., Otoni, C. G., Carvalho, E. E. N., . . . Mattoso, L. H. C. (2021). Development of quaternary nanocomposites made up of cassava starch, cocoa butter, lemongrass essential oil nanoemulsion, and brewery spent grain fibers. *J Food Sci*, 86(5), 1979-1996. doi:10.1111/1750-3841.15689

Mirza Alizadeh, A., Masoomian, M., Shakooie, M., Zabihzadeh Khajavi, M., & Farhoodi, M. (2020). Trends and applications of intelligent packaging in dairy products: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 1-15. doi:10.1080/10408398.2020.1817847

- Mohamad, N., Mazlan, M. M., Tawakkal, I., Talib, R. A., Kian, L. K., Fouad, H., & Jawaid, M. (2020). Development of active agents filled polylactic acid films for food packaging application. *Int J Biol Macromol*, 163, 1451-1457. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.07.209
- Motelica, L., Fikai, D., Fikai, A., Oprea, O. C., Kaya, D. A., & Andronescu, E. (2020). Biodegradable Antimicrobial Food Packaging: Trends and Perspectives. *Foods*, 9(10). doi:10.3390/foods9101438
- Munteanu, B. S., Sacarescu, L., Vasiliu, A. L., Hitruc, G. E., Pricope, G. M., Sivertsvik, M., . . . Vasile, C. (2018). Antioxidant/Antibacterial Electrospun Nanocoatings Applied onto PLA Films. *Materials (Basel)*, 11(10). doi:10.3390/ma11101973
- Oliveira Filho, J. G., Braga, A. R. C., Oliveira, B. R., Gomes, F. P., Moreira, V. L., Pereira, V. A. C., & Egea, M. B. (2021). The potential of anthocyanins in smart, active, and bioactive eco-friendly polymer-based films: A review. *Food Res Int*, 142, 110202. doi:10.1016/j.foodres.2021.110202
- Oliveira, G., Passos, C. P., Ferreira, P., Coimbra, M. A., & Goncalves, I. (2021). Coffee By-Products and Their Suitability for Developing Active Food Packaging Materials. *Foods*, 10(3). doi:10.3390/foods10030683
- Oluwasina, O. O., & Awonyemi, I. O. (2021). Citrus Peel Extract Starch-Based Bioplastic: Effect of Extract Concentration on Packed Fish and Bioplastic Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(6), 1706-1716. doi:10.1007/s10924-020-01990-7
- Omerovic, N., Djisalov, M., Zivojevic, K., Mladenovic, M., Vunduk, J., Milenkovic, I., . . . Vidic, J. (2021). Antimicrobial nanoparticles and biodegradable polymer composites for active food packaging applications. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 20(3), 2428-2454. doi:10.1111/1541-4337.12727
- Rosenbloom, R. A., & Zhao, Y. (2021). Hydroxypropyl methylcellulose or soy protein isolate-based edible, water-soluble, and antioxidant films for safflower oil packaging. *J Food Sci*, 86(1), 129-139. doi:10.1111/1750-3841.15543
- Salmieri, S., Bagheri, L., & Lacroix, M. (2022). The use of ionizing radiation on natural compounds and wastes for the development of advanced polymers and active packaging materials – Applications in food safety. In: *Ionizing radiation technologies: Managing and extracting value from wastes*. Ed: Shayanfar, S., Pillai, S.D., John Wiley and Sons Ltd, New York, NY, USA. ISBN10: 1119488532. ISBN13: 9781119488538.
- Shankar, S., & Rhim, J. W. (2018). Preparation of antibacterial poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite films incorporated with grapefruit seed extract. *Int J Biol Macromol*, 120(Pt A), 846-852. doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.09.004
- Stachithanadam, E., & Ettiarachy, N. S. (2004).
- Stramarkou, M., Oikonomopoulou, V., Missirli, T., Thanassoulia, I., & Krokida, M. (2020). Encapsulation of Rosemary Essential Oil into Biodegradable Polymers for Application in Crop Management. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(8), 2161-2177. doi:10.1007/s10924-020-01760-5
- Suzuki, A. H., Oliveira, L. S., & Franca, A. S. (2021). The Effect of Variations in Fresh-Cut Apple Composition on the Performance of Polyvinyl Chloride Active Films. *Food and Bioprocess Technology*, 14(2), 352-361. doi:10.1007/s11947-020-02578-8
- Vasile, C. (2018). Polymeric Nanocomposites and Nanocoatings for Food Packaging: A Review. *Materials (Basel)*, 11(10). doi:10.3390/ma11101834
- Vilela, C., Kurek, M., Hayouka, Z., Röcker, B., Yildirim, S., Antunes, M. D. C., . . . Freire, C. S. R. (2018). A concise guide to active agents for active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 212-222. doi:10.1016/j.tifs.2018.08.006

Yang, S., Lei, P., Shan, Y., & Zhang, D. (2018). Preparation and characterization of antibacterial electrospun chitosan/poly (vinyl alcohol)/graphene oxide composite nanofibrous membrane. *Applied Surface Science*, 435, 832-840. doi:10.1016/j.apsusc.2017.11.191

Yang, W., Xie, Y., Jin, J., Liu, H., & Zhang, H. (2019). Development and Application of an Active Plastic Multilayer Film by Coating a Plantaricin BM-1 for Chilled Meat Preservation. *J Food Sci*, 84(7), 1864-1870. doi:10.1111/1750-3841.14608

Yeza, I. (2012). Emballage alimentaire : un partenaire actif ! *L'Actualité alimentaire. Procédés & Technologie*. 9 (6), 46-7.

Yeza, I. (2010, November 2010). Can nanotechnology revolutionize food packaging? *BioTrends*, BTD 10-6A, 1-18.

Yildirim, S., Rocker, B., Pettersen, M. K., Nilsen-Nygaard, J., Ayhan, Z., Rutkaite, R., . . . Coma, V. (2018). Active Packaging Applications for Food. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 17(1), 165-199. doi:10.1111/1541-4337.12322

Ylitalo, C. M., Ali, M. B., Walker, C. B. J., Hofmann, G. R. A., Scholz, M. T., Pocius, A. V., & Olson, L. K. M. (2007).

## Enrobages comestibles

**Description.** L'utilisation d'enrobages comestibles dans une large gamme de produits alimentaires, y compris les fruits frais et minimalement transformés, les produits de boulangerie, suscite un grand intérêt de la part de l'industrie alimentaire. Les activités de recherche dans ce domaine ont été motivées par i) la demande des consommateurs pour des aliments sûrs, pratiques et stables, et ii) la sensibilisation aux impacts environnementaux négatifs des déchets d'emballages non biodégradables (Dhall, 2013 ; de Azeredo, 2012). Les films comestibles sont définis comme une fine couche de matériau à base de biopolymère qui peut être consommé et peut contribuer à prolonger la durée de conservation des fruits/légumes frais PAM en réduisant la migration de l'humidité et des solutés, les échanges gazeux, la respiration et les taux de réaction oxydative, ainsi qu'en prévenant les troubles physiologiques (Park, 1999). Le matériau peut être un enrobage alimentaire complet ou encore être disposé en couche continue entre les composants alimentaires (Bourtoom, 2008). Les biopolymères les plus couramment appliqués comprennent les polysaccharides (amidon, dérivés de cellulose, chitosane, alginate, gommes), les protéines (protéines de lait, gélatine, collagène, protéines de soja) et les graisses (cires, acides gras) (Kraśniewska et Gniewosz, 2012). De plus, les enrobages comestibles peuvent contenir des ingrédients actifs tels que des agents anti-brunissement, des colorants, des arômes, des nutriments et des composés antimicrobiens qui peuvent prolonger la durée de conservation du produit, réduire le risque de croissance d'agents pathogènes sur les surfaces des aliments (Pranoto et al., 2005) et même des attributs nutritionnels et sensoriels (Dhall, 2013).

**Propriétés fonctionnelles.** La fonctionnalité et les performances des enrobages comestibles dépendent principalement de leur mouillabilité, de leurs propriétés barrières et mécaniques, du processus de formation et de la méthode d'application sur les produits alimentaires (Cerqueira et al., 2011). Après séchage, le revêtement doit avoir une adhérence, une cohésion et une durabilité adéquates pour fonctionner correctement (Ščetar et al., 2010). Parmi les fonctions recherchées, les enrobages comestibles doivent présenter les caractéristiques suivantes : 1) Résistants à l'eau; 2) Ne pas épuiser l'oxygène (ou ne pas accumuler trop de CO<sub>2</sub>); 3) Réduire la perméabilité à la

vapeur d'eau; 4) Amélioration de l'apparence du produit; 5) transporteur d'agents bioactifs, rétenteur d'arômes volatils; 6) Fusion au-dessus de 40°C sans décomposition; 7) Performances de séchage facilement émulsifiables, non collantes et efficaces ; 8) Ne pas interférer avec la qualité des produits alimentaires; 9) Faible viscosité; 10) Translucide; 11) Adhésivité élevée; 12) Plasticité et cohésion de la structure; 13) Économique (Dhall, 2013 ; Kraśniewska et Gniewosz, 2012). Comme suggéré par de Azeredo et al. (2012), des efforts devraient être faits afin de déterminer la meilleure formulation en termes de compatibilité avec la surface fruits/légumes i) en réduisant la tension superficielle de la solution d'enrobage avec l'utilisation d'émulsifiants, de produits chimiques amphiphiles, etc. (Takala et al., 2011a, 2011b) ou ii) en modifiant de manière hydrophobe le biopolymère (Severino et al., 2014 ; Vu et al., 2011). L'avantage des bonnes propriétés barrières à l'eau des lipides et celles des bonnes barrières aux gaz des polysaccharides/protéines peuvent également être combinés pour former des enrobages composites ou bicouches comestibles afin de tirer profit de chaque couche composant l'enrobage.

**Enrobages antimicrobiens.** Les consommateurs critiquent de plus en plus l'utilisation de produits chimiques pour la conservation des aliments. Pour remédier à cette situation, il existe actuellement un intérêt croissant pour l'utilisation d'enrobages actifs comestibles pour préserver la qualité globale des aliments. En raison de préoccupations pour l'environnement mais aussi la santé humaine, les enrobages comestibles sont généralement utilisés comme supports pour divers antimicrobiens (ex : acides organiques, esters d'acides gras, peptides, huiles essentielles (HEs)) (Aloui et Khwaldia, 2016). Les films bioactifs résultants fournissent des effets plus inhibiteurs contre la détérioration et les bactéries pathogènes en contrôlant les processus de diffusion et en maintenant des concentrations élevées de molécules actives à la surface des aliments. Les HEs se distinguent en tant qu'alternative aux conservateurs chimiques et à leur utilisation dans les aliments répond aux demandes des consommateurs pour les produits naturels, telles que revues par Lacroix (2007) et Burt (2004). Les fruits et légumes frais et transformés susceptibles de bénéficier d'enrobages antimicrobiens sont les dattes, les fraises, les tomates, le raisin, divers fruits et légumes pré-découpés frais et congelés.

## Pour en savoir plus

### Références bibliographiques

- Aloui, H., & Khwaldia, K. (2016). Natural Antimicrobial Edible Coatings for Microbial Safety and Food Quality Enhancement. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 15(6), 1080-1103. doi:10.1111/1541-4337.12226
- Bourtoom, T. (2008). Edible films and coatings: characteristics and properties. *Int. Food. Res. J.*, 15(3), 237-248.
- Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods--a review. *Int J Food Microbiol*, 94(3), 223-253. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022
- Cerqueira, M. A., Bourbon, A. I., Pinheiro, A. C., Martins, J. T., Souza, B. W. S., Teixeira, J. A., & Vicente, A. A. (2011). Galactomannans use in the development of edible films/coatings for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 22(12), 662-671. doi:10.1016/j.tifs.2011.07.002

- Corbo, M., Campaniello, D., Speranza, B., Bevilacqua, A., & Sinigaglia, M. (2015). Non-Conventional Tools to Preserve and Prolong the Quality of Minimally-Processed Fruits and Vegetables. *Coatings*, 5(4), 931-961. doi:10.3390/coatings5040931
- Cordeiro de Azeredo, H. M. (2012). Edible coatings. In S. Rodrigues & F. A. N. Fernandes (Eds.), *Advances in fruit processing technologies* (1st ed., pp. 345-361). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- Dhall, R. K. (2013). Advances in edible coatings for fresh fruits and vegetables: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 53(5), 435-450. doi:10.1080/10408398.2010.541568
- El-Sayed, H. S., El-Sayed, S. M., Mabrouk, A. M. M., Nawwar, G. A., & Youssef, A. M. (2021). Development of Eco-friendly Probiotic Edible Coatings Based on Chitosan, Alginate and Carboxymethyl Cellulose for Improving the Shelf Life of UF Soft Cheese. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(6), 1941-1953. doi:10.1007/s10924-020-02003-3
- Garcia, F., & Davidov-Pardo, G. (2021). Recent advances in the use of edible coatings for preservation of avocados: A review. *J Food Sci*, 86(1), 6-15. doi:10.1111/1750-3841.15540
- Khodaei, D., Hamidi-Esfahani, Z., & Rahmati, E. (2021). Effect of edible coatings on the shelf-life of fresh strawberries: A comparative study using TOPSIS-Shannon entropy method. *NFS Journal*, 23, 17-23. doi:10.1016/j.nfs.2021.02.003
- Kraśniewska, K., & Gniewosz, M. (2012). Substances with Antibacterial Activity in Edible Films – A Review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 62(4), 199-206. doi:10.2478/v10222-12-0059-3
- Lacroix, M. (2007). The use of essential oils and bacteriocins as natural antimicrobial and antioxidant compounds. *Food*, 1(2), 181-192.
- Maringgal, B., Hashim, N., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Muda Mohamed, M. T. (2020). Recent advance in edible coating and its effect on fresh/fresh-cut fruits quality. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 253-267. doi:10.1016/j.tifs.2019.12.024
- Massoud, R., Khodaeii, D., Hamidi-Esfahani, Z., & Khosravi-Darani, K. (2021). The effect of edible probiotic coating on quality of fresh fruits and vegetables: fresh strawberries as a case study. *Biomass Conversion and Biorefinery*. doi:10.1007/s13399-021-01332-0
- Pranoto, Y., Salokhe, V. M., & Rakshit, S. K. (2005). Physical and antibacterial properties of alginate-based edible film incorporated with garlic oil. *Food Research International*, 38(3), 267-272. doi:10.1016/j.foodres.2004.04.009
- Ramos, M., Mellinas, C., Solaberrieta, I., Garrigos, M. C., & Jimenez, A. (2021). Emulsions Incorporated in Polysaccharide-Based Active Coatings for Fresh and Minimally Processed Vegetables. *Foods*, 10(3). doi:10.3390/foods10030665
- Scetar, M., Kurek, M., & Galic, K. (2010). Trends in meat products packaging. *Croat. J. Food Sci. Technol.*, 2(1), 32-48.
- Severino, R., Vu, K. D., Donsi, F., Salmieri, S., Ferrari, G., & Lacroix, M. (2014). Antibacterial and physical effects of modified chitosan based-coating containing nanoemulsion of mandarin essential oil and three non-thermal treatments against *Listeria innocua* in green beans. *Int J Food Microbiol*, 191, 82-88. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2014.09.007
- Shendurse, A. M. (2018). Milk protein based edible films and coatings—preparation, properties and food applications. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8(2). doi:10.15406/jnhfe.2018.08.00273
- Solis-Contreras, G. A., Rodriguez-Guillermo, M. C., de la Luz Reyes-Vega, M., Aguilar, C. N., Reboloso-Padilla, O. N., Corona-Flores, J., . . . Ruelas-Chacon, X. (2021). Extending Shelf-Life and Quality of Minimally Processed Golden Delicious Apples with Three Bioactive Coatings Combined with Cinnamon Essential Oil. *Foods*, 10(3). doi:10.3390/foods10030597
- Takala, P. N., Salmieri, S., Vu, K. D., & Lacroix, M. (2011). Effects of combined treatments of irradiation and antimicrobial coatings on reduction of food pathogens in broccoli florets. *Radiation Physics and Chemistry*, 80(12), 1414-1418. doi:10.1016/j.radphyschem.2011.07.005

Takala, P. N., Vu, K. D., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2011). Effect of antimicrobial coatings on the radiosensitization of *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* in fresh broccoli. *J Food Prot*, 74(7), 1065-1069. doi:10.4315/0362-028X.JFP-10-520

Tokatli, K., & Demirdoven, A. (2021). Influences of chitosan coatings on functional compounds of sweet cherries. *J Food Sci Technol*, 58(5), 1808-1818. doi:10.1007/s13197-020-04692-z

Vivek, K. (2019). A Review on Postharvest Management and Advances in the Minimal Processing of Fresh-Cut Fruits and Vegetables. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 8(5), 1178-1187. doi:10.15414/jmbfs.2019.8.5.1178-1187

Vu, K. D., Hollingsworth, R. G., Leroux, E., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2011). Development of edible bioactive coating based on modified chitosan for increasing the shelf life of strawberries. *Food Research International*, 44(1), 198-203. doi:10.1016/j.foodres.2010.10.037

Yang, X., Zhou, Y., Wang, B., Wang, F., Han, P., & Li, L. (2019). Tartary Buckwheat Extract and Chitosan Coated Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) Fillets Determine Their Shelf Life. *J Food Sci*, 84(6), 1288-1296. doi:10.1111/1750-3841.14649

Zambrano-Zaragoza, M. L., Gonzalez-Reza, R., Mendoza-Munoz, N., Miranda-Linares, V., Bernal-Couoh, T. F., Mendoza-Elvira, S., & Quintanar-Guerrero, D. (2018). Nanosystems in Edible Coatings: A Novel Strategy for Food Preservation. *Int J Mol Sci*, 19(3). doi:10.3390/ijms19030705

### Liens Internet

- <https://www.profoodworld.com/home/article/13278097/a-bump-up-in-food-labels>
- <https://www.youtube.com/watch?v=wt32GgQGTcl>
- <https://fr.scribd.com/presentation/4760403/Emballages-Alimentaires-Etat-des-Lieux-et-Dernieres-Innovations>
- <https://www.sciencepresse.qc.ca/blogue/labo-journalisme-scientifique/2018/02/12/kombucha-probiotiques-service-emballages>
- <https://pvgard.com/>
- <https://www.bakeryandsnacks.com/Trends/Smart-Packaging>
- <https://www.youtube.com/watch?v=gW1ftjfocBA>
- <https://www.campdenbri.co.uk/services/packaging.php>
- <https://www.encapbiotech.com/>
- <https://www.ivv.fraunhofer.de/en/packaging.html>
- <https://www.graphiline.com/article/21261/innovation-un-papier-emballage-bioactif-alimentaire-revolutionnaire>

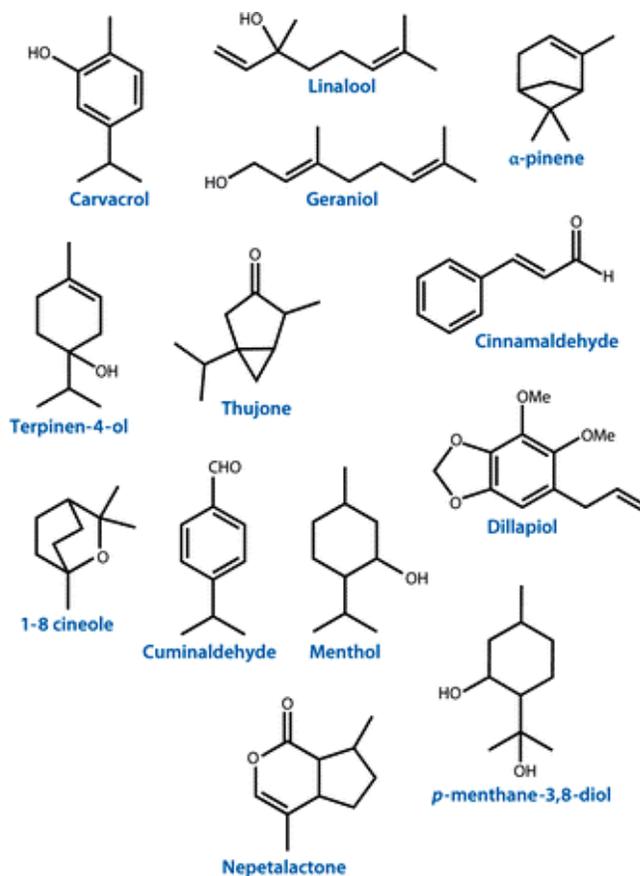
## III - Antimicrobiens naturels

**Introduction.** En dépit des technologies modernes et des concepts de santé et sécurité tels que les normes HACCP, le nombre de maladies et d'intoxications d'origine alimentaires ne cesse d'augmenter (Lacroix et al., 2013 ; Gobeil et al., 2020). Selon l'Organisation des Nations-Unies (ONU), plus de 30% du taux de mortalité mondial serait causé par des maladies d'origine alimentaire. Selon l'USDA, le coût annuel pour traiter ces maladies s'élèverait à environ 18 milliards \$ aux États-Unis (USDA-ERS, 2021). *Campylobacter*, *Listeria*, *Shigella*, *E. coli* and *Salmonella* sont les pathogènes majoritairement responsables de ces maladies au Canada. Ainsi, la volonté de nombreux pays de prévenir la contamination des aliments auprès des

consommateurs nécessite des agents de conservation et des techniques de production mieux adaptés. Dans ce contexte, l'utilisation de composés antimicrobiens naturels se présente comme une alternative prometteuse dans un cadre de développement d'économie circulaire. Les effets antimicrobiens de différentes espèces d'herbes et d'épices, ainsi que ceux des bactéries lactiques, sont connus depuis longtemps et mis à profit pour augmenter la durée de vie des aliments.

### **Huiles essentielles (HEs)**

**Description.** Les HEs sont des substances odorantes concentrées, obtenues à partir de plantes par entraînement à la vapeur d'eau, hydrodistillation ou pression à froid. Elles sont extraites soit des feuilles, des graines, des écorces, des racines ou d'autres structures spécialisées. Une huile essentielle est un mélange complexe de plusieurs composés d'arômes volatils qui appartiennent aux différentes classes de la chimie organique (**Fig. 18**) : phénols (ex : carvacrol), terpènes (ex : limonène), alcools (ex : linalol), aldéhydes (ex : cinnamaldéhyde), cétones (ex : menthone), esters (ex : acétate de linalyle) et éthers. La plupart de ces composés sont dotés de propriétés antimicrobiennes, mais ce sont les composés volatils majeurs qui présentent les propriétés antimicrobiennes les plus importantes, et en particulier les phénols, les alcools et les aldéhydes (voir tableau) : carvacrol (origan, sarriette), eugénol (feuille de cannelle de Ceylan, clou de girofle), linalool (coriandre), cinnamaldéhyde (cannelle de Chine), thymol (thym). Il existe aujourd'hui approximativement 3000 huiles, dont environ 300 sont réellement commercialisées, destinées principalement à l'industrie des arômes et des parfums. Mais la tendance actuelle des consommateurs à rechercher une alimentation plus saine et naturelle a entraîné un regain d'intérêt des scientifiques pour ces substances. Depuis 2 décennies, des études ont été menées sur le développement de nouvelles applications et l'exploitation des propriétés naturelles des HEs comme antimicrobiens dans le domaine alimentaire.



**Figure 18** - Structure chimique de certains constituants majoritaires des HEs (d'après Regnault-Roger et al., 2012).

**Propriétés antimicrobiennes des HEs.** Les HEs ont un spectre d'action très large puisqu'elles inhibent aussi bien la croissance des bactéries que celles des moisissures et des levures. Leur activité antimicrobienne est principalement fonction de leur composition chimique, et en particulier de la nature de leurs composés volatils majeurs. Elles agissent en empêchant la multiplication des bactéries, leur sporulation et la synthèse de leurs toxines. Pour les levures, elles agissent sur la biomasse et la production des *Pseudomycelium* alors qu'elles inhibent la germination des spores, l'élongation du mycélium, la sporulation et la production de toxines chez les moisissures. Les Laboratoires RESALA de l'INRS travaillent depuis 20 ans sur le développement de traitements technologiques permettant de réduire l'incidence des bactéries pathogènes dans les produits alimentaires. Ils ont notamment évalué des traitements physiques non-thermiques combinés avec des antimicrobiens naturels (ex : HEs) pour étudier la cinétique d'inhibition et la survie de nombreuses bactéries pathogènes (*E. coli*, *Salmonella*, *Staphylococcus aureus*, *L. monocytogenes*) et de bactéries d'altération des aliments (*Pseudomonas*, *Serratia liquefaciens*, *Lactobacillus curvatus*, *Lactobacillus sakei*). De récentes études, pratiquées sur plus d'une centaine d'HEs et de composés d'arôme leur ont permis des formulations antimicrobiennes à base

d'HES dirigées spécifiquement contre les bactéries pathogènes et celles de détérioration les plus couramment répandues dans les aliments. Pour choisir des HES comme agents de conservation alimentaires, il convient de connaître leur seuil d'efficacité correspondant à leur concentration minimale inhibitrice (CMI). Selon l'effet recherché et les bactéries ciblées, la concentration ne sera pas la même. À titre d'exemple, une étude de CMI de nombreuses HES contre 4 pathogènes alimentaires a été menée et parmi les huiles sélectionnées, l'origan, la sarriette et la cannelle se sont révélées être les plus efficaces à large spectre (Oussalah et al., 2007). Les résultats obtenus *in vitro* dans des milieux de cultures ont été confirmés *in situ* dans les aliments, mais à des doses un peu plus élevées. Cependant, le seuil d'efficacité des huiles les plus efficaces étant très bas, souvent inférieur à 1000 ppm, leur ajout en très faibles quantités n'altère pas les qualités organoleptiques de l'aliment. En outre, les HES possèdent aussi des propriétés antioxydantes qui améliorent la qualité et la durée de vie de l'aliment et intéressent aussi le consommateur pour leurs valeurs nutraceutiques et les bienfaits sur la santé.

La composition des HES d'une même espèce varie selon la géographie, les conditions climatiques, la période de récolte, la partie de la plante utilisée. Par conséquent, leurs propriétés antimicrobiennes varient également, d'où l'importance de sélectionner une HE standardisée dont les composants actifs sont clairement identifiés et quantifiés. D'autres facteurs influencent les propriétés antimicrobiennes des HES : la température, les conditions de stockage, le pH ou la composition de l'aliment. L'efficacité d'une HE augmente avec une diminution du pH de l'aliment, de la température de stockage ou de la quantité d'oxygène dans l'emballage. Il est également reporté qu'une même HE est plus efficace dans un aliment pauvre en gras ou en protéines. Les fortes teneurs en eau et en sels d'un aliment vont aussi favoriser l'action de l'HE, alors qu'une structure gélifiée va au contraire la limiter.

**Mode d'action des HES.** Les HES présentent plusieurs modes d'action sur les différentes souches de bactéries, mais d'une manière générale leur action se déroule en 3 phases :

- 1) Attaque de la paroi bactérienne provoquant une augmentation de la perméabilité suivie de la perte des constituants cellulaires.
- 2) Acidification de l'intérieur de la cellule, bloquant la production de l'énergie cellulaire et la synthèse des composants de structure.
- 3) Destruction du matériel génétique, conduisant à la mort de la bactérie.

**Littérature scientifique et exemples d'applications.** L'incorporation d'HES directement dans les aliments (viandes hachées, légumes hachés, purées de fruit, yogourts) ou l'application par vaporisation en surface de l'aliment (pièces de viande, charcuteries, poulets, fruits et légumes entiers) contribuent à contrôler la flore microbienne et à préserver l'aliment des phénomènes d'oxydation. Ainsi, les HES d'origan, de thym, de cannelle ou de coriandre sont efficaces pour les viandes, les volailles, les charcuteries et les légumes; l'HE de menthe pour les produits frais (salades, yogourts); les HES à base de carvacrol ou de citral pour les poissons; les HES de thym, de noix de muscade ou de gingembre pour les céréales (plus particulièrement celles riches en carvacrol pour le riz); et les HES à base de carvacrol ou de cinnamaldéhyde pour les fruits. Par ailleurs, des études menées par les Laboratoires RESALA ont montré que l'incorporation d'HES

dans du bœuf haché a contribué au maintien de la qualité microbiologique et à la réduction de l'oxydation des gras au-delà de sa durée normale d'entreposage. Des études de traitements combinés ont aussi démontré que l'utilisation d'HEs pouvait augmenter la sensibilité des bactéries à différents procédés de conservation des aliments (chauffage, pasteurisation, atmosphère modifiée, irradiation). Selon la bactérie et le procédé utilisé, la sensibilisation augmentait de 2 à 10 fois. Par exemple, l'huile essentielle mélangée à des carottes hachées, emballées sous air ou sous atmosphère modifiée (MAP) permettait de multiplier par 3 la sensibilité de *Listeria*, de même que pour de la viande hachée emballée dans les mêmes conditions, une augmentation très significative de la sensibilité de *E. coli* (2.5 fois) et de *Salmonella* (4.5 fois) a été constatée en présence d'HEs. À noter que pour renforcer leur efficacité et préserver leur stabilité, les HEs peuvent être encapsulées dans des enrobages, des microcapsules ou des nanoémulsions, qui permettent leur diffusion vers l'aliment tout au long de l'entreposage. Par exemple, l'application d'enrobages contenant des HEs sur des tranches de viande contaminée, a permis de réduire significativement la croissance de bactéries pathogènes au-delà d'une semaine d'entreposage.

Les HEs et leurs constituants ont également démontré d'excellentes propriétés antiparasitaires, insecticides, antivirales, antifongiques et antioxydantes (Hyldgaard et al., 2012). Certains critères répondent aux exigences de l'agriculture biologique en développant des biopesticides ou des suppléments alimentaires pour animaux, enrichis en substances naturelles efficaces contre les infections.

**Réglementation.** Les HEs sont pour la plupart classées "Generally Recognized As Safe" (GRAS), ou approuvés comme ingrédients par Santé Canada et la FDA. Par conséquent, mais des études préalables sont nécessaires afin de mieux cibler leur activité antimicrobienne.

**Limitations.** Comme agents de conservation dans les aliments, le pouvoir aromatisant des HEs peut limiter leur utilisation. Cependant, des techniques de désaromatisation existent et sont de plus en plus efficaces. Les effets organoleptiques indésirables peuvent être évités en sélectionnant soigneusement l'HE selon le type d'aliment considéré, mais en général, les concentrations utilisées sont si faibles qu'elles n'affectent pas l'odeur et le goût de l'aliment. Autre aspect à prendre en compte : vérifier que l'HE n'a pas d'effet antimicrobien contre les bactéries utiles (ex : ferments d'acidification, d'aromatisation et d'affinage) indispensables à la fabrication de certains produits.

## Pour en savoir plus

### Références bibliographiques

Arya, A., Mendiratta, S. K., Agarwal, R. K., Bharti, S. K., & Umarao, P. (2019). Antimicrobial profile and organoleptic acceptability of some essentials oils and their blends in hurdle treated chicken meat spread. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(09), 2162-2177. doi:10.20546/ijcmas.2019.809.250

Burt, S. (2004). Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods--a review. *Int J Food Microbiol*, 94(3), 223-253. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022

fatima, a., asma, g., & sana, a. (2021). Antibacterial Properties of Ceratonia Siliqua L Ethanolic Extract and Artemisia Herba Alba Essential Oil. *Academia Letters*. doi:10.20935/al1943

Guimaraes, A. C., Meireles, L. M., Lemos, M. F., Guimaraes, M. C. C., Endringer, D. C., Fronza, M., & Scherer, R. (2019). Antibacterial Activity of Terpenes and Terpenoids Present in Essential Oils. *Molecules*, 24(13). doi:10.3390/molecules24132471

Hyltdgaard, M., Mygind, T., & Meyer, R. L. (2012). Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Front Microbiol*, 3, 12. doi:10.3389/fmicb.2012.00012

Leja, K., Szudera-Konczal, K., Switala, E., Juzwa, W., Kowalczewski, P. L., & Czaczyk, K. (2019). The Influence of Selected Plant Essential Oils on Morphological and Physiological Characteristics in *Pseudomonas Orientalis*. *Foods*, 8(7). doi:10.3390/foods8070277

Lu, W. C., Huang, D. W., Wang, C. R., Yeh, C. H., Tsai, J. C., Huang, Y. T., & Li, P. H. (2018). Preparation, characterization, and antimicrobial activity of nanoemulsions incorporating citral essential oil. *J Food Drug Anal*, 26(1), 82-89. doi:10.1016/j.jfda.2016.12.018

Rao, J., Chen, B., & McClements, D. J. (2019). Improving the Efficacy of Essential Oils as Antimicrobials in Foods: Mechanisms of Action. *Annu Rev Food Sci Technol*, 10, 365-387. doi:10.1146/annurev-food-032818-121727

Regnault-Roger, C., Vincent, C., & Arnason, J. T. (2012). Essential oils in insect control: low-risk products in a high-stakes world. *Annu Rev Entomol*, 57, 405-424. doi:10.1146/annurev-ento-120710-100554

Salehi, B., Abu-Darwish, M. S., Tarawneh, A. H., Cabral, C., Gadetskaya, A. V., Salgueiro, L., . . . Contreras, M. d. M. (2019). Thymus spp. plants - Food applications and phytopharmacy properties. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 287-306. doi:10.1016/j.tifs.2019.01.020

Salehi, B., Stojanovic-Radic, Z., Matejic, J., Sharopov, F., Antolak, H., Kregiel, D., . . . Sharifi-Rad, J. (2018). Plants of Genus *Mentha*: From Farm to Food Factory. *Plants (Basel)*, 7(3). doi:10.3390/plants7030070

Tariq, S., Wani, S., Rasool, W., Shafi, K., Bhat, M. A., Prabhakar, A., . . . Rather, M. A. (2019). A comprehensive review of the antibacterial, antifungal and antiviral potential of essential oils and their chemical constituents against drug-resistant microbial pathogens. *Microb Pathog*, 134, 103580. doi:10.1016/j.micpath.2019.103580

Thielmann, J., Muranyi, P., & Kazman, P. (2019). Screening essential oils for their antimicrobial activities against the foodborne pathogenic bacteria *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Heliyon*, 5(6), e01860. doi:10.1016/j.heliyon.2019.e01860

Turkmenoglu, A., & Ozmen, D. (2021). Allergenic components, biocides, and analysis techniques of some essential oils used in food products. *J Food Sci*, 86(6), 2225-2241. doi:10.1111/1750-3841.15753

Vantarakis, A., Birmpa, A., Constantinou, P., Dedes, C., Bellou, M., Sazakli, E., & Leotsinidis, M. (2018). Antibacterial and antiviral effect of essential oils combined with non-thermal disinfection technologies for ready-to-eat Romaine lettuce. *Journal of Nutrition, Food Research and Technology*, 1(1), 24-32. doi:10.30881/jnfrt.00007

Vasconcelos, N. G., Croda, J., & Simionatto, S. (2018). Antibacterial mechanisms of cinnamon and its constituents: A review. *Microb Pathog*, 120, 198-203. doi:10.1016/j.micpath.2018.04.036

## Bactériocines

**Description.** Les bactéries lactiques (BAL) sont utilisées depuis des siècles comme agents de conservation de produits alimentaires issus des procédés de fermentation (O'Sullivan *et al.* 2002). Elles sont également connues pour leur potentiel antimicrobien dans différents types d'aliments

(Chen and Hoover, 2003). Les propriétés antimicrobiennes des BAL ont été démontrées chez de nombreuses espèces et leurs actions antagonistes ont été prouvées vis-à-vis de nombreux pathogènes intestinaux et d'origine alimentaire. Ces propriétés sont attribuées à la production de métabolites secondaires, les bactériocines, qui sont des métabolites peptidiques antimicrobiens, reconnus pour leur potentiel à se substituer aux antibiotiques pour prévenir les infections bactériennes. Ils sont considérablement utilisés dans le domaine des agents de conservation alimentaires. La souche productrice devrait être reconnue comme étant GRAS afin d'utiliser une bactériocine pour des applications alimentaires. La bactériocine doit posséder un large spectre d'inhibition, être résistante à la chaleur et ne pas être associée à des facteurs de risque pour la santé humaine, procurer une grande spécificité et assurer la biopréservation d'un aliment (Cotter *et al.* 2005).

**Propriétés antimicrobiennes des bactériocines.** L'activité antimicrobienne des BAL a été démontrée chez de nombreuses espèces pathogènes telles qu'*E. coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Clostridium difficile* (Mahoney and Henriksson 2003; Millette *et al.* 2007a). La capacité de préservation des BAL est attribuée au fait qu'elles sécrètent des bactériocines mais aussi d'autres métabolites antibactériens tels que des acides organiques, le diacétyle (butane-2,3-dione), du dioxyde de carbone, du peroxyde d'hydrogène, de la reutérine, des dérivés d'acide lactique (acide hydroxylactique) (Millette *et al.* 2007b).

**Exemple de mode d'action d'une bactériocine : la nisine.** La nisine est un peptide antimicrobien ou bactériocine de classe des lantibiotiques, produite par plusieurs souches de *Lactococcus lactis*. Cette bactériocine est approuvée dans plus de 40 pays et est utilisée comme agent de conservation depuis plus de 50 ans (Cleveland *et al.* 2001). La nisine est également certifiée GRAS par la FDA. Il a été démontré qu'elle forme des complexes permettant la perméabilisation de membranes cellulaires cibles via un processus multi-étapes qui comporte l'attachement d'un carbone terminal par interactions électrostatiques. Par la suite, la partie N-terminal s'insère dans la phase lipidique de la bicouche. Une diminution du potentiel membranaire ou du gradient de pH entraîne alors la dégradation des composantes cellulaires. Il s'ensuit un efflux de petits composés cytoplasmiques tels que des acides aminés, potassium, phosphates et ATP qui conduit à la mort cellulaire (Bauer and Dicks 2005). L'efficacité antimicrobienne de la nisine dépend de nombreux facteurs tels que la teneur en sel et en gras, le pH, la présence d'autres agents conservateurs et la taille de particules des aliments (Jung *et al.* 1992). La nisine étant relativement insoluble, elle peut perdre son efficacité à des pH neutres ou basiques (Pol and Smid 1999). En revanche, elle est stable à faibles températures et peut être utilisée pour la conservation des viandes.

## Pour en savoir plus

### Références bibliographiques

Bagenda, D. K., & Yamazaki, K. (2007). Application of bacteriocins in food preservation and safety. *Food*, 1(2), 137-148.

- Bauer, R., & Dicks, L. M. (2005). Mode of action of lipid II-targeting lantibiotics. *Int J Food Microbiol*, 101(2), 201-216. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.007
- Chen, H., & Hoover, D. G. (2003). Bacteriocins and their food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2, 82-100.
- Cleveland, J., Montville, T. J., Nes, I. F., & Chikindas, M. L. (2001). Bacteriocins: safe, natural antimicrobials for food preservation. *Int. J. Food Microbiol.*, 71, 1-20.
- Cotter, P. D., Hill, C., & Ross, R. P. (2005). Bacteriocins: developing innate immunity for food. *Nature Reviews Microbiology*, 3, 777-788. doi:10.1038/nrmicro1240
- Jung, D.-S., Bodyfelt, F. W., & Daeschel, M. A. (1992). Influence of fat and emulsifiers on the efficacy of nisin in inhibiting *Listeria monocytogenes* in fluid milk. *J. Dairy Sci.*, 75, 387-393.
- Mahoney, M., & Henriksson, A. (2003). The effect of processed meat and meat starter cultures on gastrointestinal colonization and virulence of *Listeria monocytogenes* in mice. *International Journal of Food Microbiology*, 84(3), 255-261. doi:10.1016/s0168-1605(02)00400-2
- Millette, M., Dupont, C., Archambault, D., & Lacroix, M. (2007). Partial characterization of bacteriocins produced by human *Lactococcus lactis* and *Pediococcus acidilactici* isolates. *J Appl Microbiol*, 102(1), 274-282. doi:10.1111/j.1365-2672.2006.03044.x
- Millette, M., Luquet, F. M., & Lacroix, M. (2007). In vitro growth control of selected pathogens by *Lactobacillus acidophilus*- and *Lactobacillus casei*-fermented milk. *Lett Appl Microbiol*, 44(3), 314-319. doi:10.1111/j.1472-765X.2006.02060.x
- O'Sullivan, L., Ross, R. P., & Hill, C. (2002). Potential of bacteriocin-producing lactic acid bacteria for improvements in food safety and quality. *Biochimie*, 84, 593-604.
- Pol, I. E., & Smid, E. J. (1999). Combined action of nisin and carvacrol on *Bacillus cereus* and *Listeria monocytogenes*. *Lett. Appl. Microbiol.*, 29, 166-170.
- Settanni, L., & Corsetti, A. (2008). Application of bacteriocins in vegetable food biopreservation. *Int J Food Microbiol*, 121(2), 123-138. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2007.09.001
- Vishakha, S., Rahul, C. R., Neelam, J., & Gajender Kumar, A. (2019). Bacteriocins: Production, different strategies of purification and applications. *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*, 10(3), 1808-1817. doi:10.26452/ijrps.v10i3.1376

### Autres antimicrobiens naturels

**Acides organiques.** Les acides organiques (ex : acide lactique, acide acétique) sont utilisés dans les procédés de transformation de la viande et restent les agents de conservation les plus efficaces contre *Listeria monocytogenes* (Shelef, 1994). Cependant, des recherches sur une utilisation potentielle des acides organiques comme solutions antimicrobiennes "post-processing" ont démontré des effets limités. Par exemple, des concentrations de 2.5-5 g/100 mL dans des solutions de trempage composées d'acide lactique, d'acide acétique, d'acétate de sodium, de diacétate de sodium, de sorbate de potassium et de benzoate de potassium ont permis de prolonger l'inhibition de *L. monocytogenes* dans la bologna réfrigérée (Samelis *et al.*, 2005). Également, une combinaison de 5,000 UI/mL de nisine et d'acide acétique ou de diacétate de

sodium (3-5 g/100 mL) est capable d'inhiber la croissance de *L. monocytogenes* pendant plus de 90 jours.

**Lysozyme.** Le lysozyme est une enzyme composée de 129 acides aminés qui peut être facilement réticulé via la formation de ponts disulfure. Le blanc d'œuf est une bonne source de lysozyme. Cette enzyme, stable à 100°C et à un pH de 5.3, est plus active contre les bactéries Gram+ (Cagri *et al.*, 2004). Une étude a évalué l'efficacité du lysozyme en présence d'oligosaccharides appliqués sur des modèles de viandes. La combinaison de ces composés a généré des effets antimicrobiens synergiques contre *E. coli*, *Pseudomonas fluorescens* et *Bacillus cereus*, et ont ainsi permis d'augmenter la durée de vie des produits de 15 jours.

**Lactoferrine.** La lactoferrine et l'hydrolysate de lactoferrine possèdent des propriétés antimicrobiennes (Chen *et al.*, 2013). La lactoferrine est une glycoprotéine aliphatique qui possède un poids moléculaire de 80 kDa (Baker and Baker, 2005). Elle inhibe les micro-organismes en se liant au fer et en rendant ce composé essentiel non-accessible aux microorganismes (Tomita *et al.*, 2002). L'hydrolysate de lactoferrine, produit par réaction enzymatique utilisant la pepsine, contient un peptide antimicrobien appelé lactoferricine qui possède une activité antimicrobienne et antifongique supérieure à celle de la lactoferrine (Tomita *et al.*, 2002; Andersson *et al.*, 2000).

## Pour en savoir plus

### Références bibliographiques

Andersson, Y., Lindquist, S., Lagerqvist, C., & Hernell, O. (2000). Lactoferrin is responsible for the fungistatic effect of human milk. *Early Human Development*, 59, 95-105.

Anjum, S. I., Ullah, A., Khan, K. A., Attaullah, M., Khan, H., Ali, H., . . . Dash, C. K. (2019). Composition and functional properties of propolis (bee glue): A review. *Saudi J Biol Sci*, 26(7), 1695-1703. doi:10.1016/j.sjbs.2018.08.013

Baker, E. N., & Baker, H. M. (2005). Molecular structure, binding properties and dynamics of lactoferrin. *Cell Mol Life Sci*, 62(22), 2531-2539. doi:10.1007/s00018-005-5368-9

Baptista, R. C., Horita, C. N., & Sant'Ana, A. S. (2020). Natural products with preservative properties for enhancing the microbiological safety and extending the shelf-life of seafood: A review. *Food Res Int*, 127, 108762. doi:10.1016/j.foodres.2019.108762

Cagri, A., Ustunol, Z., & Ryzer, E. T. (2004). Antimicrobial edible films and coatings. *J. Food Prot.*, 67(4), 833-848.

Chen, P. W., Jheng, T. T., Shyu, C. L., & Mao, F. C. (2013). Antimicrobial potential for the combination of bovine lactoferrin or its hydrolysate with lactoferrin-resistant probiotics against foodborne pathogens. *J Dairy Sci*, 96(3), 1438-1446. doi:10.3168/jds.2012-6112

Gobeil, A., Maherani, B., & Lacroix, M. (2020). Norovirus elimination on the surface of fresh foods. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 1-16. doi:10.1080/10408398.2020.1848784

Ho, C.-T., Li, S., & Luo, Y. (2018). Sugarcane rind: applications and health benefits: a review. *Journal of Food Bioactives*, 3, 1-7. doi:10.31665/jfb.2018.3148

Hyltdgaard, M., Mygind, T., & Meyer, R. L. (2012). Essential oils in food preservation: mode of action, synergies, and interactions with food matrix components. *Front Microbiol*, 3, 12. doi:10.3389/fmicb.2012.00012

Katiyar, V., & Jain, A. K. (2018). Biopreservation: novel technique augmenting shelf life. In V. Katiyar & A. Joshi (Eds.), *Microbial Research: An Overview* (pp. 462-491). New Delhi, India: I.K. International Publishing House Pvt. Ltd.

Khezerlou, A., Alizadeh-Sani, M., Azizi-Lalabadi, M., & Ehsani, A. (2018). Nanoparticles and their antimicrobial properties against pathogens including bacteria, fungi, parasites and viruses. *Microb Pathog*, 123, 505-526. doi:10.1016/j.micpath.2018.08.008

Mahmud, J., & Khan, R. A. (2018). Characterization of Natural Antimicrobials in Food System. *Advances in Microbiology*, 08(11), 894-916. doi:10.4236/aim.2018.811060

Manigandan, M., & Saranraj, P. (2018). Antimicrobial activity of secondary metabolites in an Indian spices - A review. *Life Science Archives (LSA)*, 4(1), 1248-1259. doi:10.22192/lisa.2018.4.1.2

Monique, L., Samia, A., Dominic, D., Mélanie, T., Stéphane, S., Takala, P., & Khanh, V. D. (2012). Irradiation in combined treatments and food safety. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296(2), 1065-1069. doi:10.1007/s10967-012-2041-2

Oussalah, M., Caillet, S., Saucier, L., & Lacroix, M. (2007). Inhibitory effects of selected plant essential oils on the growth of four pathogenic bacteria: *E. coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes*. *Food Control*, 18(5), 414-420. doi:10.1016/j.foodcont.2005.11.009

Quinto, E. J., Caro, I., Villalobos-Delgado, L. H., Mateo, J., De-Mateo-Silleras, B., & Redondo-Del-Rio, M. P. (2019). Food Safety through Natural Antimicrobials. *Antibiotics (Basel)*, 8(4). doi:10.3390/antibiotics8040208

Regnault-Roger, C., Vincent, C., & Arnason, J. T. (2012). Essential oils in insect control: low-risk products in a high-stakes world. *Annu Rev Entomol*, 57, 405-424. doi:10.1146/annurev-ento-120710-100554

Samelis, J., Bedie, G. K., Sofos, J. N., Belk, K. E., Scanga, J. A., & Smith, G. C. (2005). Combinations of nisin with organic acids or salts to control *Listeria monocytogenes* on sliced pork bologna stored at 4°C in vacuum packages. *LWT - Food Science and Technology*, 38(1), 21-28. doi:10.1016/j.lwt.2004.04.012

Shelif, L. A. (1994). Antimicrobial effects of lactates: A review. *J. Food Prot.*, 57(5), 445-450.

Tomita, M., Wakabayashi, H., Yamauchi, K., Teraguchi, S., & Hayasawa, H. (2002). Bovine lactoferrin and lactoferricin derived from milk: production and applications. *Biochem Cell Biol*, 80(1), 109-112. doi:10.1139/o01-230

## IV - Valorisation des sous-produits de l'industrie alimentaire

### Introduction

Le gaspillage alimentaire est l'une des faiblesses structurelles du système alimentaire moderne, en concordance avec les attentes de croissance capitaliste et les programmes agricoles internationaux. Notre système alimentaire est notamment inefficace du point de vue des ressources consommées, de la pollution (dont les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de l'insécurité alimentaire. Parfitt et al. (2010) décrivent comment les pertes après récolte, un élément clé de l'histoire des déchets, étaient à l'origine une grande partie du mandat de la FAO. Malgré cette préoccupation initiale, très peu de recherche ont été menées sur la réduction des pertes post-récolte généralisées dans les années 1990. Les déchets alimentaires comprennent essentiellement tout aliment comestible qui n'est pas consommé par les humains et les aliments non comestibles humains qui ne sont pas utilisés comme aliments pour animaux ou dans les processus industriels et le compostage. Ces déchets gaspillent également les ressources utilisées

pour produire, traiter, transporter, stocker et préparer les aliments. La valeur économique directe des aliments gaspillés dans le monde et au Canada représente une perte annuelle de 750 milliards \$/an et 31 milliards \$/an, respectivement (MacRae et al., 2016). De plus, L'étude la plus fréquemment citée, Global Food Losses and Food Waste de la FAO, estime qu'environ 1/3 – soit 1.3 milliard de tonnes/an – des parties comestibles des aliments produits pour la consommation humaine sont gaspillés dans le monde (Gustavsson et al., 2011). À ce jour, les recherches se concentrent principalement sur les déchets alimentaires évitables (ex : fruits meurtris, restes) plutôt que sur les déchets alimentaires inévitables (ex : os, noyaux de fruits).

Abdulla et al. (2013) ont identifié les déchets en tant que pourcentage d'aliments disponibles pour la consommation sur une période de 49 ans, en considérant différentes catégories d'aliments incluant les déchets comestibles et non comestibles (**Tableau 3**). D'après leur analyse, 44% des aliments disponibles à la consommation sont gaspillés/personne/an au Canada, les fruits, les légumes et la volaille étant les plus gaspillés (les légumineuses et les noix étant les moins gaspillées).

**Tableau 3** - Pourcentage moyen de gaspillage alimentaire des aliments disponibles pour la consommation de 1961 à 2009 au Canada (adapté d'Abdulla et al., 2013).

Catégorie d'aliment	% de gaspillage d'aliments accessibles à la consommation
Fruits frais	46.19
Fruits totaux	66.93
Légumes frais	49.91
Légumes totaux	42.66
Produits laitiers	27.57
Œufs	20.94
Viande rouge désossée	39.73
Volaille désossée	42.74
Poisson	31.21
Huiles et gras	29.18
Produits céréaliers	30.00
Légumineuses et noix	15.40
Sucres et sirops	28.80
Gaspillage total/personne/an	44.11

L'industrie alimentaire doit faire face au problème du gaspillage alimentaire tout au long de la chaîne alimentaire, de la production agricole initiale jusqu'à l'achat final du consommateur et la consommation. Le développement durable mondial, la sécurité alimentaire et la protection des ressources naturelles, de l'environnement et de la santé humaine peuvent être accomplis par le choix d'une méthodologie de transformation appropriée tout au long des différentes phases de la chaîne alimentaire (Alexandre et al., 2019). En ce sens, les déchets alimentaires et les sous-produits générés lors de la transformation peuvent être une excellente source de composés à

haute valeur ajoutée qui, de par leurs caractéristiques différentes, peuvent être appliqués comme additifs alimentaires et/ou comme nutraceutiques (Saini et al., 2018). Ainsi, le l'extraction de ces composés intéressants peut être un autre moyen de réduire le gaspillage alimentaire et promouvoir l'économie alimentaire.

### **Composés naturels bioactifs extraits des sous-produits végétaux**

Les composés bioactifs sont récoltés soit à partir de bioproduits frais, soit de déchets. Différentes sources d'agents bioactifs ont été étudiées pour leurs rôles de conservateurs naturels, parmi lesquelles le chitosane – qui provient de déchets animaux tels que sources d'insectes et de crustacés, les huiles essentielles (HEs) et les extraits végétaux de sous-produits agricoles (extraits d'agrumes, de petits fruits, d'épices, etc.), les bactéries lactiques (LAB) et leurs bactériocines (nisine, pédiocine) ou reutéline de sources microbiologiques et les acides organiques provenant de diverses sources, tous avec un grand potentiel pour être utilisés comme antimicrobiens (Baptista et al., 2020; Côté et al., 2011b; Harich et al., 2017). En raison de leur grande disponibilité, les HEs et leurs sous-produits extraits de l'hydrodistillation sont beaucoup étudiés en raison de leur composition polyvalente qui leur confère de fortes propriétés antimicrobiennes/antioxydantes. Les principaux composants actifs des HEs sont les flavonoïdes, les composés phénoliques et les terpénoïdes (Lacroix, 2007). Par ailleurs, les hydrolats de certaines plantes considérées comme un déchet d'hydrodistillation ont également montré des propriétés thérapeutiques importantes complémentaires à celles des HEs. Ce fait explique l'intérêt récent de la communauté scientifique pour étudier les propriétés des HEs extraites de leurs hydrolats correspondants, pour des applications antimicrobiennes (Matulyte et al., 2020 ; Moukhles et al., 2018). Il est généralement observé que les huiles extraites des hydrolats sont riches en molécules oxygénées à caractère hydrophile (e.g. phénols) et ne contiennent que des traces de constituants lipophiles (e.g. hydrocarbures terpéniques) (Moukhles et al., 2018 ; Paolini et al., 2008). Concernant les autres sources de déchets, la transformation des aliments génère également de grandes quantités de sous-produits tels que les marcs de fruits, les graines, les pelures, les pulpes, la chair et les cosses qui sont des sources précieuses de composants bioactifs relativement à leur teneur en polyphénols, tanins et flavonoïdes (Côté et al. , 2011a ; Gyawali et Ibrahim, 2014 ; Harich et al., 2017 ; Taveira et al., 2010). Par conséquent, ces sous-produits pourraient présenter un grand potentiel économique et environnemental en tant que sources de composés bioactifs naturels à faible coût. De plus, ils pourraient être incorporés dans des systèmes d'emballage bioactifs ou des revêtements antimicrobiens comestibles et combinés à une irradiation pour potentialiser leurs propriétés antimicrobiennes (Gyawali et Ibrahim, 2014 ; Maherani et al., 2019 ; Maherani et al., 2016).

Certains procédés alimentaires non-thermiques émergents – considérés comme des procédés "verts" (ex : HPP, ultrasons, champs électriques pulsés, irradiation, etc.) – peuvent être utilisés comme technologies d'extraction pour réduire et valoriser les déchets alimentaires. Par exemple, ces types de procédés peuvent agir sélectivement et perturber la structure des grosses molécules ou même la structure cellulaire (ex : enzymes, protéines et lipides) laissant de petites molécules (ex : vitamines, pigments, ingrédients de parfum, alcaloïdes, saponines ou flavonoïdes) non

affectées, car seules les liaisons non covalentes (telles que les liaisons hydrogène, liaisons ioniques et interactions hydrophobes) seront affectées (Alexandre et al., 2019). Le **Tableau 4** présente quelques exemples d'extraits obtenus par l'intermédiaire de ces procédés, en provenance de sources valorisables.

**Tableau 4** – Exemples d'extraits valorisés à partir de sous-produits alimentaires végétaux en fonction de procédés émergents tels que HPP, ultrasons, lumière pulsée (d'après Alexandre et al., 2019, Chemat et al., 2020 et Gerschenson et al., 2021).

Sources de déchets	Extraits végétaux
Berbéris coréen et deodeok	Phénols, flavonoïdes
Graines de papaye	Phénols, flavonoïdes
Pelures de citron	Phénols, flavonoïdes
Tomates	Lycopène et caroténoïdes
Betterave	Pectine
Pelures de fruits	Pectine
Pelures de manques	Mangiférine et lupéol
Ginseng	Ginsenosides
Rhodiola	Salidroside
Thé vert	Catéchines et caféine
Magnolia berry	Déoxyschisandrine et schisandrine B
Magnolia chinois	Podophyllotoxine et 4'-diméthylpodophyllotoxine
Angélique de Chine	Acide férulique
Macération de fruits (marc de raisin)	Carbohydrates, polyphénols, tannins, anthocyanines, caroténoïdes, polysaccharides
Graines de papaye chilienne	Polyphénols, sulforaphanes, acides gras
Pelures de pomegranate	Composés phénoliques
Marc de bleuets, de canneberges	Polyphénols, anthocyanes

### Peptides bioactifs extraits des sous-produits de viande

La consommation mondiale d'aliments riches en protéines a notoirement augmenté ces dernières années. L'industrie de la viande génère d'importantes quantités de matières premières riches en protéines, qui sont souvent rejetées en tant que sous-produits de faible valeur. Cependant, plusieurs composés bioactifs peuvent être isolés de ces produits en leur donnant une valeur ajoutée. En plus des méthodes d'extraction conventionnelles (ex : procédés enzymatiques), certaines technologies émergentes, comme les micro-ondes, le traitement HPP, les ultrasons, les champs électriques pulsés ou l'irradiation peuvent être utilisées comme prétraitements pour isoler des peptides à partir de sous-produits de viande permettant de maintenir les propriétés fonctionnelles de ces composés. Ainsi, les activités antioxydantes et antimicrobiennes de ces peptides permettent leur introduction comme ingrédient actif et agent conservateur dans les

aliments. Les procédés d'extraction suivent habituellement la séquence prétraitement, extraction, fractionnement et purification. Dû à leur séquences d'acides aminés et leurs propriétés structurales, ces peptides présentent plusieurs activités biologiques telles qu'antioxydants, antimicrobiens, antihypertenseurs, anticancéreux, antiviraux, antithrombogéniques, opiacés, hypocholestérolémiantes et immunomodulatrices. Le **Tableau 5** présente quelques exemples de peptides obtenus par l'intermédiaire de ces procédés, en provenance de sources valorisables. Le poids moléculaire ( $M_w$ ) de ces peptides pouvant varier de quelques centaines à quelques milliers de Dalton (Da).

**Tableau 5** – Exemples de peptides bioactifs valorisés à partir de viandes et de sous-produits alimentaires animaux en fonction après extraction (d'après Borrajo et al., 2019).

Sources de déchets	Procédé d'extraction
Hémoglobine bovine	Hydrolyse (pepsine), lyse (chlorure d'ammonium)
Foie porcin	Hydrolyse (trypsine)
Plasma	Hydrolyse (broméline, papaïne, protéases fongiques)
Foie de volaille	Fermentation, hydrolyse (alcalase)
Collagène	Protéases
Cartilage	Hydrolyse (pepsine)
Carapaces de crevettes	Astaxanthine, chitine, chitosane,

Les hydrolysats extraits de ces déchets ont le potentiel d'être des ingrédients riches en protéines pour une utilisation dans divers produits alimentaires formulés et afin de prévenir leur détérioration oxydative et microbienne, en présentant même de meilleurs résultats que les produits synthétiques.

#### **Valorisation des déchets alimentaires : opportunités industrielles pour un développement durable**

De nombreux défis technologiques sont actuellement relevés par les entreprises désireuses de revaloriser leurs déchets et l'installation d'unités d'extraction/recyclage en aval de leur système de production nécessiterait éventuellement de cibler des applications totalement différentes du domaine alimentaire. Ainsi, la littérature scientifique cite de nombreuses avenues de recyclage et extraction/purification des déchets de l'industrie alimentaire pour des applications aussi diversifiées que les biocarburants, les engrais, les molécules bioactives voire thérapeutiques, les produits cosmétiques, etc. À titre indicatif, le **Tableau 6** mentionne certaines études rapportant des voies de valorisation qui pourraient être appliquées dans les entreprises industrielles fabriquant les produits de viande/charcuteries, les produits végétaux (fruits/légumes/boissons), les levures alimentaires, les aliments fonctionnels (aliments probiotiques, etc.).

**Tableau 6** – Exemples d'études de valorisation de produits alimentaires pour diverses applications industrielles.

Sources de déchets	Valorisation	Référence
Déchets de fermentation de levures (The Baker Company)	Bio-modificateur de béton, de ciment (industrie de la construction)	Bolobova et Kondrashchenko (2000)
Biomasse lignocellulosique incluant résidus agricoles (paille, bagasse, plantes), de l'industrie alimentaire : huile de palme, fruits, légumes)	Production de bioéthanol	Hossain et al. (2017)
Protéines extraites du soja, du lactosérum, du maïs, collagène, gélatine; polysaccharides : amidon de maïs, dérivés celluloseux, alginate, chitosane	Bioplastiques, enrobages alimentaires, matrices d'encapsulation	Korte et al. (2021)
Mélange de déchets alimentaires (Eco-Green Energy Transfer Ltd)	Production d'acide lactique par fermentation	Kwan et al. (2016)
Boyaux de collagène	Hydrolysat de collagène (obtenu par hydrolyse enzymatique) pour la fabrication de films biodégradables, d'hydrogels	Langmaier et al. (2008)
Boyaux de collagène (Viscofan Group)	Fabrication de gélatine par dissociation thermique ou chimique, fertilisant des sols par macération suivi de pyrolyse	Marousek et al. (2015)
Gras animal (et produits d'hydrolyse)	Source de carbone pour des levures caroténoïdes pour la production d'acides gras insaturés, d'huiles microbiennes (pour la fabrication de biodiésel), de pigments, de stérols	Marova et al. (2017)
Déchets de fermentation de levures	Fertilisants de sols	Mata et al. (2019)
Collagène (matières animales extraites des bovins, du poisson, du porc, tanneries) (Gelita Inc.)	Films, éponges, produits pharmaceutiques, impression 3D, cosmétiques à partir d'hydrolysats	Noorzai et Verbeek (2020)
Mélange de déchets alimentaires (déchets ménagers organiques contenant 90% de bactéries lactiques)	Substrat pour la production d'acide lactique par fermentation	Probst et al. (2013)
Déchets agro-industriels (lignocellulose, carbohydrates, protéines, sirops, glycérol) (Bioprocess Engineering Laboratory)	Substrat pour des levures oléagineuses pour la production de biodiésel (par étape finale de transestérification)	Sae-ngae et al. (2020)
Déchets de pommes et de raisin (marc riche en acide malique)	Bioconversion de l'acide malique en acides organiques et autres composés à haute valeur ajoutée (éthanol, acide acétique) par fermentation de levures ( <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ); applications dans le bio-raffinage et l'industrie du vin	Steyn et al. (2021)
Levures issues des déchets citriques fermentés (sous-produits de l'industrie	Substitut protéique au tourteau de soja pour l'alimentation animale,	Suriyapha et al. (2021)

de l'acide citrique générés par le riz, le maïs et le manioc fermentés)	obtenu après fermentation anaérobie	
Surnageant de culture de <i>Lactobacillus rhamnosus</i> (Synbiotech Biotechnology)	Applications en cosmétiques (propriétés antioxydantes, de blanchiment et de rétention d'humidité)	Tsai et al. (2013)

## Pour en savoir plus

### Références bibliographiques

Abdulla, M., Martin, R., Gooch, M., & Jovel, E. (2013). The Importance of Quantifying Food Waste in Canada. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development*, 137-151. doi:10.5304/jafscd.2013.032.018

Agency, U. S. E. P. (1993). Yeast production. (1/95).

Alexandre, E. M. C., Pinto, C. A., Moreira, S. A., Pintado, M., & Saraiva, J. A. (2019). Nonthermal food processing/preservation technologies. In *Saving Food* (pp. 141-169).

Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., . . . Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 43-54. doi:10.1016/j.tifs.2021.02.041

Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Qureshi, M. I., Khan, N., Ahmad, M. H., . . . Aadil, R. M. (2020). Effective valorization of food wastes and by-products through pulsed electric field: A systematic review. *Journal of Food Process Engineering*, 44(3). doi:10.1111/jfpe.13629

Baptista, R. C., Horita, C. N., & Sant'Ana, A. S. (2020). Natural products with preservative properties for enhancing the microbiological safety and extending the shelf-life of seafood: A review. *Food Res Int*, 127, 108762. doi:10.1016/j.foodres.2019.108762

Bolobova, A. V., & Kondrashchenko, V. I. (2000). Use of yeast fermentation waste as a biomodifier of concrete (Review). *Appl. Biochem. Microbiol.*, 36(3), 205-214.

Bolumar, T., Toepfl, S., & Heinz, V. (2015). Fat Reduction and Replacement in Dry-Cured Fermented Sausage by Using High Pressure Processing Meat as Fat Replacer and Olive Oil. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 65(3), 175-182. doi:10.1515/pjfn-2015-0026

Borrajó, P., Pateiro, M., Barba, F. J., Mora, L., Franco, D., Toldrá, F., & Lorenzo, J. M. (2019). Antioxidant and Antimicrobial Activity of Peptides Extracted from Meat By-products: a Review. *Food Analytical Methods*, 12(11), 2401-2415. doi:10.1007/s12161-019-01595-4

Boyaciota-Gunduz, C. P., Ibrahim, S. A., Wei, O. C., & Galanakis, C. M. (2021). Transformation of the Food Sector: Security and Resilience during the COVID-19 Pandemic. *Foods*, 10(3). doi:10.3390/foods10030497

Campos, I., Pinheiro Valente, L. M., Matos, E., Marques, P., & Freire, F. (2020). Life-cycle assessment of animal feed ingredients: Poultry fat, poultry by-product meal and hydrolyzed feather meal. *Journal of Cleaner Production*, 252. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119845

Chemat, F., Abert Vian, M., Fabiano-Tixier, A.-S., Nutrizio, M., Režek Jambrak, A., Munekata, P. E. S., . . . Cravotto, G. (2020). A review of sustainable and intensified techniques for extraction of food and natural products. *Green Chemistry*, 22(8), 2325-2353. doi:10.1039/c9gc03878g

Costa, J. R., Tonon, R. V., Cabral, L., Gottschalk, L., Pastrana, L., & Pintado, M. E. (2020). Valorization of Agricultural Lignocellulosic Plant Byproducts through Enzymatic and Enzyme-Assisted Extraction of High-Value-Added Compounds: A Review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(35), 13112-13125. doi:10.1021/acssuschemeng.0c02087

Côté, J., Caillet, S., Doyon, G., Dussault, D., Salmieri, S., Lorenzo, G., . . . Lacroix, M. (2011). Effects of juice processing on cranberry antioxidant properties. *Food Research International*, 44(9), 2907-2914. doi:10.1016/j.foodres.2011.06.052

Côté, J., Caillet, S., Dussault, D., Sylvain, J. F., & Lacroix, M. (2011). Effect of juice processing on cranberry antibacterial properties. *Food Research International*, 44(9), 2922-2929. doi:10.1016/j.foodres.2011.06.049

FAO. (2021). Sustainable bioconversion of waste to value added products Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG.

Gerschenson, L. N., Fissore, E. N., Rojas, A. M., Idrovo Encalada, A. M., Zukowski, E. F., & Higuera Coelho, R. A. (2021). Pectins obtained by ultrasound from agroindustrial by-products. *Food Hydrocolloids*, 118. doi:10.1016/j.foodhyd.2021.106799

Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention. Paper presented at the Savefood! Interpack2011, Dusseldorf, Germany.

Gyawali, R., & Ibrahim, S. A. (2014). Natural products as antimicrobial agents. *Food Control*, 46, 412-429. doi:10.1016/j.foodcont.2014.05.047

Harich, M., Maherani, B., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2017). Antibacterial activity of cranberry juice concentrate on freshness and sensory quality of ready to eat (RTE) foods. *Food Control*, 75, 134-144. doi:10.1016/j.foodcont.2016.11.038

He, Y., Kuhn, D. D., Ogejo, J. A., O'Keefe, S. F., Fraguas, C. F., Wiersema, B. D., . . . Huang, H. (2019). Wet fractionation process to produce high protein and high fiber products from brewer's spent grain. *Food and Bioprocess Processing*, 117, 266-274. doi:10.1016/j.fbp.2019.07.011

Hossain, N., Haji Zaini, J., & Mahlia, T. M. I. (2017). A Review of Bioethanol Production from Plant-based Waste Biomass by Yeast Fermentation. *International Journal of Technology*, 8(1). doi:10.14716/ijtech.v8i1.3948

International, I. (2016). Documentation for greenhouse gas emission and energy factors used in the waste reduction model (WARM) - Organic materials chapters. Retrieved from

Korte, I., Kreyenschmidt, J., Wensing, J., Bröring, S., Frase, J. N., Pude, R., . . . Schulze, M. (2021). Can Sustainable Packaging Help to Reduce Food Waste? A Status Quo Focusing Plant-Derived Polymers and Additives. *Applied Sciences*, 11(11). doi:10.3390/app11115307

Kostag, M., & El Seoud, O. A. (2021). Sustainable biomaterials based on cellulose, chitin and chitosan composites - A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2. doi:10.1016/j.carpta.2021.100079

Kusstatscher, P., Cernava, T., Abdelfattah, A., Gokul, J., Korsten, L., & Berg, G. (2020). Microbiome approaches provide the key to biologically control postharvest pathogens and storability of fruits and vegetables. *FEMS Microbiol Ecol*, 96(7). doi:10.1093/femsec/fiaa119

Kwan, T. H., Hu, Y., & Lin, C. S. (2016). Valorisation of food waste via fungal hydrolysis and lactic acid fermentation with *Lactobacillus casei* Shirota. *Bioresour Technol*, 217, 129-136. doi:10.1016/j.biortech.2016.01.134

Lacroix, M. (2007). The use of essential oils and bacteriocins as natural antimicrobial and antioxidant compounds. *Food*, 1(2), 181-192.

Langmaier, F., Mladek, M., Mokrejs, P., & Kolomaznik, K. (2008). Biodegradable packing materials based on waste collagen hydrolysate cured with dialdehyde starch. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 93(2), 547-552.

- Laso, J., Margallo, M., Celaya, J., Fullana, P., Bala, A., Gazulla, C., . . . Aldaco, R. (2016). Waste management under a life cycle approach as a tool for a circular economy in the canned anchovy industry. *Waste Manag Res*, 34(8), 724-733. doi:10.1177/0734242X16652957
- Madureira, J., Dias, M. I., Pinela, J., Calhelha, R. C., Barros, L., Santos-Buelga, C., . . . Cabo Verde, S. (2020). The use of gamma radiation for extractability improvement of bioactive compounds in olive oil wastes. *Sci Total Environ*, 727, 138706. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138706
- Maherani, B., Harich, M., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2018). Antibacterial properties of combined non-thermal treatments based on bioactive edible coating, ozonation, and gamma irradiation on ready-to-eat frozen green peppers: evaluation of their freshness and sensory qualities. *European Food Research and Technology*, 245(5), 1095-1111. doi:10.1007/s00217-018-3211-4
- Maherani, B., Hossain, F., Criado, P., Ben-Fadhel, Y., Salmieri, S., & Lacroix, M. (2016). World Market Development and Consumer Acceptance of Irradiation Technology. *Foods*, 5(4). doi:10.3390/foods5040079
- Mantzouridou, F. T., Paraskevopoulou, A., & Lalou, S. (2015). Yeast flavour production by solid state fermentation of orange peel waste. *Biochemical Engineering Journal*, 101, 1-8. doi:10.1016/j.bej.2015.04.013
- Maroušek, J., Maroušková, A., Myšková, K., Váchal, J., Vochozka, M., & Žák, J. (2015). Techno-economic assessment of collagen casings waste management. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(10), 3385-3390. doi:10.1007/s13762-015-0840-z
- Marova, I., Sztokowski, M., Vanek, M., Rapta, M., Byrtusova, D., Mikheichyk, N., . . . Shapaval, V. (2017). Utilization of animal fat waste as carbon source by carotenogenic yeasts – a screening study. *The EuroBiotech Journal*, 1(4), 310-318. doi:10.24190/issn2564-615x/2017/04.08
- Mata, R., Ratinho, S., & Fangueiro, D. (2017). Assessment of the Environmental Impact of Yeast Waste Application to Soil: An Integrated Approach. *Waste and Biomass Valorization*, 10(6), 1767-1777. doi:10.1007/s12649-017-0168-7
- Matulyte, I., Jekabsone, A., Jankauskaite, L., Zavistanaviciute, P., Sakiene, V., Bartkiene, E., . . . Bernatoniene, J. (2020). The Essential Oil and Hydrolats from *Myristica fragrans* Seeds with Magnesium Aluminometasilicate as Excipient: Antioxidant, Antibacterial, and Anti-inflammatory Activity. *Foods*, 9(1). doi:10.3390/foods9010037
- McElhatton, A., & Marshall, R. J. (2007). *Food safety - A practical and case study approach* (A. McElhatton & R. J. Marshall Eds.). New York, NY, USA: Springer Science+Business Media, LLC.
- Moukhles, A., Ibn Mansour, A., Ellaghdach, A., & Abrini, J. (2018). Chemical composition and in vitro antibacterial activity of the pure essential oils and essential oils extracted from their corresponding hydrolats from different wild varieties of Moroccan thyme. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(3), 794-803. doi:10.26872/jmes.2018.9.3.87
- Noorzai, S., & Verbeek, C. J. R. (2021). Collagen: from waste to gold. In T. P. Basso, T. O. Basso, & L. C. Basso (Eds.), *Biotechnological Applications of Biomass* (pp. 1-36). doi:10.5772/intechopen.94266
- Nowosad, K., Sujka, M., Pankiewicz, U., & Kowalski, R. (2021). The application of PEF technology in food processing and human nutrition. *J Food Sci Technol*, 58(2), 397-411. doi:10.1007/s13197-020-04512-4
- Paolini, J., Leandri, C., Desjobert, J. M., Barboni, T., & Costa, J. (2008). Comparison of liquid-liquid extraction with headspace methods for the characterization of volatile fractions of commercial hydrolats from typically Mediterranean species. *J Chromatogr A*, 1193(1-2), 37-49. doi:10.1016/j.chroma.2008.04.021
- Parfitt, J., Barthel, M., & Macnaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 365(1554), 3065-3081. doi:10.1098/rstb.2010.0126

Pega, J., Denoya, G. I., Castells, M. L., Sarquis, S., Aranibar, G. F., Vaudagna, S. R., & Nanni, M. (2018). Effect of High-Pressure Processing on Quality and Microbiological Properties of a Fermented Beverage Manufactured from Sweet Whey Throughout Refrigerated Storage. *Food and Bioprocess Technology*, 11(6), 1101-1110. doi:10.1007/s11947-018-2078-5

Peng, K., Koubaa, M., Bals, O., & Vorobiev, E. (2020). Recent insights in the impact of emerging technologies on lactic acid bacteria: A review. *Food Res Int*, 137, 109544. doi:10.1016/j.foodres.2020.109544

Perreault, D., Hernandez Cervantes, T., McCallum, D., Matsubuchi-Shaw, M., Kohn, M., Siu, A., & MacRae, R. (2016). Making better use of what we have: Strategies to minimize food waste and resource inefficiency in Canada. *Canadian Food Studies / La Revue canadienne des études sur l'alimentation*, 3(2), 145-215. doi:10.15353/cfs-rcea.v3i2.143

Picart-Palmade, L., Cunault, C., Chevalier-Lucia, D., Belleville, M. P., & Marchesseau, S. (2018). Potentialities and Limits of Some Non-thermal Technologies to Improve Sustainability of Food Processing. *Front Nutr*, 5, 130. doi:10.3389/fnut.2018.00130

Probst, M., Fritschi, A., Wagner, A., & Insam, H. (2013). Biowaste: a *Lactobacillus* habitat and lactic acid fermentation substrate. *Bioresour Technol*, 143, 647-652. doi:10.1016/j.biortech.2013.06.022

Režek Jambrak, A., Nutrizio, M., Djekić, I., Pleslić, S., & Chemat, F. (2021). Internet of Nonthermal Food Processing Technologies (IoNTP): Food Industry 4.0 and Sustainability. *Applied Sciences*, 11(2). doi:10.3390/app11020686

Sae-ngae, S., Cheirsilp, B., Louhasakul, Y., Suksaroj, T. T., & Intharapat, P. (2020). Techno-economic analysis and environmental impact of biovalorization of agro-industrial wastes for biodiesel feedstocks by oleaginous yeasts. *Sustainable Environment Research*, 30(1). doi:10.1186/s42834-020-00052-w

Saini, R. K., Moon, S. H., & Keum, Y. S. (2018). An updated review on use of tomato pomace and crustacean processing waste to recover commercially vital carotenoids. *Food Res Int*, 108, 516-529. doi:10.1016/j.foodres.2018.04.003

Steyn, A., Viljoen-Bloom, M., & van Zyl, W. H. (2021). Valorization of apple and grape wastes with malic acid-degrading yeasts. *Folia Microbiol (Praha)*, 66(3), 341-354. doi:10.1007/s12223-021-00850-8

Suriyapha, C., Cherdthong, A., Suntara, C., & Polyorach, S. (2021). Utilization of Yeast Waste Fermented Citric Waste as a Protein Source to Replace Soybean Meal and Various Roughage to Concentrate Ratios on In Vitro Rumen Fermentation, Gas Kinetic, and Feed Digestion. *Fermentation*, 7(3). doi:10.3390/fermentation7030120

Suurs, P., & Barbut, S. (2020). Collagen use for co-extruded sausage casings – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 91-101. doi:10.1016/j.tifs.2020.06.011

Taveira, M., Silva, L. R., Vale-Silva, L. A., Pinto, E., Valentao, P., Ferreres, F., . . . Andrade, P. B. (2010). *Lycopersicon esculentum* seeds: an industrial byproduct as an antimicrobial agent. *J Agric Food Chem*, 58(17), 9529-9536. doi:10.1021/jf102215g

Thoresen, P. P. (2019). Innovative processing technologies in the valorization of rest raw materials - The potential of microwave, ultrasound and high-pressure processing as pre-treatment technologies for the valorisation of mechanically deboned chicken residual through enzymatic hydrolysis. (M.Sc.). Norwegian University of Science and Technology (NTNU) - Faculty of Natural Sciences, Norway.

Tsai, C. C., Chan, C. F., Huang, W. Y., Lin, J. S., Chan, P., Liu, H. Y., & Lin, Y. S. (2013). Applications of *Lactobacillus rhamnosus* spent culture supernatant in cosmetic antioxidation, whitening and moisture retention applications. *Molecules*, 18(11), 14161-14171. doi:10.3390/molecules181114161

Zhang, Z.-H., Wang, L.-H., Zeng, X.-A., Han, Z., & Brennan, C. S. (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(1), 1-13. doi:10.1111/ijfs.13903

### Liens Internet

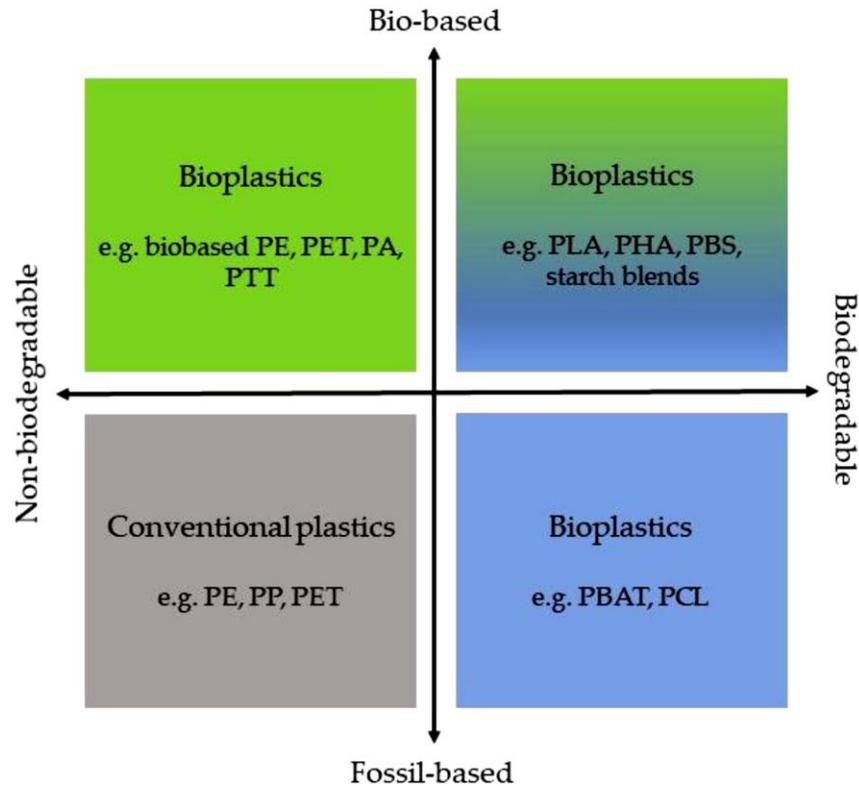
- <https://3fwasterecovery.ca/cod-collagen/>
- <https://www.gelita.com/en>
- <https://ecogreenenergy.ca/>
- [https://universalpure.com/wp-content/uploads/2017/08/Food\\_Waste\\_Whitepaper\\_Universal\\_Pure.pdf](https://universalpure.com/wp-content/uploads/2017/08/Food_Waste_Whitepaper_Universal_Pure.pdf)
- <https://anr.fr/Project-ANR-14-CE20-0004>
- <https://www.viscofan.com/>

### Bioplastiques et leurs additifs

De nombreux matériaux plastiques traditionnels sont non biodégradables (ex : polyéthylène, polypropylène) ou non recyclables (ex : polystyrène) de sorte qu'ils représentent un facteur d'augmentation des déchets (White et Lockyer, 2020). Il est rapporté que la production primaire mondiale de plastique dans le monde était de 270 millions de tonnes en 2010 et que les déchets plastiques étaient estimés à 275 millions de tonnes. Les emballages (sacs, emballages, etc.) sont le principal générateur de déchets, responsables de près de 50 % du total (Ritchie et Roser, 2019). Une alternative aux films plastiques est l'utilisation de films à base de biopolymères qui sont composés de ressources renouvelables généralement obtenues à partir de diverses sources telles que :

- i) les matières premières naturelles à base de polysaccharides (amidon, éthers cellulosiques et cellulosiques, chitosane, alginate, gomme gellane) et de protéines (protéine de lactosérum, caséinate, zéine) ;
- ii) la synthèse chimique de monomères bio-dérivés (polylactides, polycaprolactone) ;
- iii) les polymères produits naturellement par des micro-organismes (polyhydroxybutyrate, polyhydroxyvalérate) (Wihodo et Moraru, 2013).

Ainsi, les films d'emballages en plastique peuvent être classifiés selon le schéma présenté à la **Fig. 19**. Deux procédés technologiques peuvent être utilisés pour fabriquer de tels films : i) "procédé par casting" (évaporation du solvant) et ii) "procédé thermoplastique" – le plus utilisé – par thermoformage ou par extrusion (Zink et al., 2016).



**Figure 19** - Classification des plastiques utilisés pour les applications d'emballage (d'après Korte et al., 2021). Polyamide (PA), poly(butylène adipate téréphtalate) (PBAT), poly(butylène succinate) (PBS), polycaprolactone (PCL), polyéthylène (PE), polytéréphtalate d'éthylène (PET), poly(hydroxyalcanoate) (PHA), acide polylactique (PLA), polypropylène (PP), polytéréphtalate de triméthylène (PTT).

En plus des avantages environnementaux, les films à base de biopolymères peuvent également améliorer la qualité des produits alimentaires en incorporant des agents antimicrobiens/antioxydants naturels dans la matrice polymérique, en générant des films bioactifs. Également, l'ajout de nanocharges (sphériques tridimensionnelles, nanofibres bidimensionnelles ou nanoparticules en feuille à une dimension) a été étudiée et a conduit à des réalisations satisfaisantes dans la conception de bioplastiques nanocomposites. Parmi ces nanocharges, citons essentiellement les nanoparticules d'oxyde de zinc, d'argent, d'oxyde de titane comme agents antimicrobiens, les nanoparticules d'argile, les nanofibres/nanocristaux de cellulose, les nanoparticules de lignine comme agents de renforcement issus de l'industrie forestière (Korte et al., 2021).

Des études exploratoires ont identifié plusieurs facteurs motivant la décision d'adoption de matériaux biosourcés chez les représentants de l'industrie tels que les producteurs d'emballages et les entreprises alimentaires. Tous les prix du marché et la disponibilité des ressources

renouvelables pour la production de polymères biosourcés et d'additifs naturels semblent pertinents pour que les producteurs adoptent de tels emballages (Theinsathid et al., 2011). En outre, des instruments politiques pertinents doivent être mis en œuvre pour favoriser la recherche et développement de polymères biosourcés avec des additifs naturels (subventions, etc.).

## Pour en savoir plus

### *Références bibliographiques*

Åkesson, D., Kuzhanthaivelu, G., & Bohlén, M. (2020). Effect of a Small Amount of Thermoplastic Starch Blend on the Mechanical Recycling of Conventional Plastics. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(3), 985-991. doi:10.1007/s10924-020-01933-2

Camiletti, O. F., Riveros, C. G., Aguirre, A., & Grosso, N. R. (2021). Sunflower oil preservation by using chickpea flour film as bio-packaging material. *J Food Sci*, 86(1), 61-67. doi:10.1111/1750-3841.15559

Chen, Y., Tang, Y., Wang, Q., Lei, L., Zhao, J., Zhang, Y., . . . Ming, J. (2021). Carboxymethylcellulose-induced changes in rheological properties and microstructure of wheat gluten proteins under different pH conditions. *J Food Sci*, 86(3), 677-686. doi:10.1111/1750-3841.15646

Dordevic, D., Necasova, L., Antonic, B., Jancikova, S., & Tremlova, B. (2021). Plastic Cutlery Alternative: Case Study with Biodegradable Spoons. *Foods*, 10(7). doi:10.3390/foods10071612

DW. (2016). Edible film: The future of eco-friendly packaging? Retrieved from <https://www.dw.com/en/edible-film-the-future-of-eco-friendly-packaging/a-19165362>

Jangong, O. S., Heryanto, H., Rahmat, R., Mutmainna, I., Gareso, P. L., & Tahir, D. (2021). Effect of Sugar Palm Fiber (SPF) to the Structural and Optical Properties of Bioplastics (SPF/Starch/Chitosan/Polypropylene) in supporting Mechanical Properties and Degradation Performance. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(6), 1694-1705. doi:10.1007/s10924-020-02019-9

Jarroux, N. (2018) Les biopolymères: différentes familles, propriétés et applications (Focus TI, AM3580 V1). In, *Les focus techniques de l'ingénieur: Vol. Matériaux | Matériaux fonctionnels - Matériaux biosourcés*. Réf. : AM3580 V1 (pp. 1-22): Techniques de l'Ingénieur (TI).

Jeevahan, J., Chandrasekaran, M., Durairaj, R. B., Mageshwaran, G., & Britto Joseph, G. (2017). A brief review on edible food packaging materials *Journal of Global Engineering Problems and Solutions*, 1(1), 9-19.

Korte, I., Kreyenschmidt, J., Wensing, J., Bröring, S., Frase, J. N., Pude, R., . . . Schulze, M. (2021). Can Sustainable Packaging Help to Reduce Food Waste? A Status Quo Focusing Plant-Derived Polymers and Additives. *Applied Sciences*, 11(11). doi:10.3390/app11115307

Liu, R., Cong, X., Song, Y., Wu, T., & Zhang, M. (2018). Edible Gum-Phenolic-Lipid Incorporated Gluten Films for Food Packaging. *J Food Sci*, 83(6), 1622-1630. doi:10.1111/1750-3841.14151

Munoz-Tebar, N., Molina, A., Carmona, M., & Berruga, M. I. (2021). Use of Chia by-Products Obtained from the Extraction of Seeds Oil for the Development of New Biodegradable Films for the Agri-Food Industry. *Foods*, 10(3). doi:10.3390/foods10030620

Nakajima, H., Dijkstra, P., & Loos, K. (2017). The Recent Developments in Biobased Polymers toward General and Engineering Applications: Polymers that are Upgraded from Biodegradable Polymers, Analogous to Petroleum-Derived Polymers, and Newly Developed. *Polymers (Basel)*, 9(10). doi:10.3390/polym9100523

Ritchie and Roser (2019). Plastic pollution. Published online at: OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

Sable, S., Ahuja, S., & Bhunia, H. (2020). Preparation and Characterization of Oxo-degradable Polypropylene Composites Containing a Modified Pro-oxidant. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(3), 721-733. doi:10.1007/s10924-020-01910-9

Shendurse, A. M. (2018). Milk protein based edible films and coatings—preparation, properties and food applications. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 8(2). doi:10.15406/jnhfe.2018.08.00273

Theinsathid, P., Chandrachai, A., Suwannathep, S., & Keeratipibul, S. (2011). Lead Users and Early Adoptors of Bioplastics: A Market-Led Approach to Innovative Food Packaging Films. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 5(1), 17-29. doi:10.1166/jbmb.2011.1128

Theinsathid, P., Visessanguan, W., Kruenate, J., Kingcha, Y., & Keeratipibul, S. (2012). Antimicrobial activity of lauric arginate-coated polylactic acid films against *Listeria monocytogenes* and *Salmonella typhimurium* on cooked sliced ham. *J Food Sci*, 77(2), M142-149. doi:10.1111/j.1750-3841.2011.02526.x

Tullo, A. H. (2019). Plastic has a problem; is chemistry the solution? *C&EN*, 29-34. Retrieved from <https://cen.acs.org/environment/recycling/Plastic-problem-chemical-recycling-solution/97/i39>

Wang, Q., Sun, J., Yao, Q., Ji, C., Liu, J., & Zhu, Q. (2018). 3D printing with cellulose materials. *Cellulose*, 25(8), 4275-4301. doi:10.1007/s10570-018-1888-y

White, A., & Lockyer, S. (2020). Removing plastic packaging from fresh produce – what’s the impact? *Nutrition Bulletin*, 45(1), 35-50. doi:10.1111/nbu.12420

Wihodo, M., & Moraru, C. I. (2013). Physical and chemical methods used to enhance the structure and mechanical properties of protein films: A review. *Journal of Food Engineering*, 114(3), 292-302. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.08.021

Zink, J., Wyrobnik, T., Prinz, T., & Schmid, M. (2016). Physical, Chemical and Biochemical Modifications of Protein-Based Films and Coatings: An Extensive Review. *Int J Mol Sci*, 17(9). doi:10.3390/ijms17091376

### **Liens Internet**

- <https://www.wiley.com/en-ca/Biopolymers%3A+New+Materials+for+Sustainable+Films+and+Coatings-p-9780470683415>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bioplastics>
- <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1022852/emballage-alimentaire-bioplastique-bacterie-conservation-biodegradable-udem-polytechnique-chimie-gaspillage>
- <https://www.european-bioplastics.org/>
- <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/food-nutrition/legislation-guidelines/guidance-documents/lists-acceptable-polymers-use-food-packaging-applications.html>
- <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- <https://www.facebook.com/bbcearth/videos/633279483874378/?sfnsn=mo&d=n&vh=e>

## **Qui sommes-nous – Les membres du groupe INRS-PROX**

- **Monique Lacroix** est Professeure titulaire à l'INRS-Centre Armand-Frappier Santé Biotechnologie (AFSB), titulaire de la Chaire de recherche du MAPAQ en Salubrité et qualité des aliments, Laboratoires de Recherche en Sciences, Appliquées à l'Alimentation (RESALA), Centre d'Irradiation

- du Canada (CIC), Laval, QC, Canada. Courriel: [monique.lacroix@inrs.ca](mailto:monique.lacroix@inrs.ca); <https://inrs.ca/la-recherche/professeurs/monique-lacroix/>
- **Stéphane Salmieri** est Agent de recherche – Chimiste à l’INRS-Centre AFSB, membre-superviseur des Laboratoires RESALA et du CIC. Courriel: [stephane.salmieri@inrs.ca](mailto:stephane.salmieri@inrs.ca).
  - **Chantal Provost** est Présidente-Directrice Générale, Superviseure de la Coordination avec l’Industrie chez Prox Industriel, Laval, QC, Canada. Courriel: [cprovost@prox-industriel.ca](mailto:cprovost@prox-industriel.ca).
  - **Stéphane Tanguay** est Directeur des relations-clients et du développement des partenariats chez Prox-Industriel. Courriel : [stanguay@prox-industriel.ca](mailto:stanguay@prox-industriel.ca).

Nous sommes les principaux intervenants d’un projet d’activités de communication portant sur l’innovation en agroalimentaire intitulé *"Réseau Innovation et programme de transfert de connaissances aux industries agroalimentaires québécoises pour améliorer leur compétitivité et former une main-d’œuvre spécialisée"*.



## Remerciements

Ce projet est financé par l’entremise du Programme Innov’Action agroalimentaire, en vertu du Partenariat canadien pour l’agriculture, entente conclue entre les gouvernements du Canada et du Québec.

