

Les nouvelles technologies de destruction des micro-organismes applicables en industrie agro-alimentaire

1. Les traitements thermiques améliorés

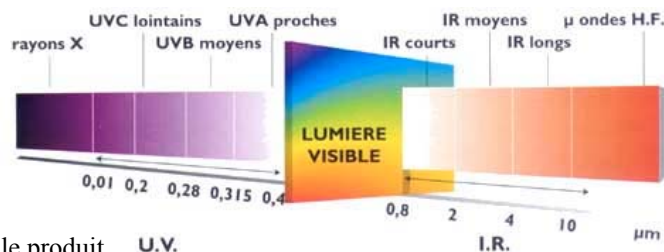
L'utilisation de traitements thermiques est de nos jours l'un des principaux moyens de décontamination des produits alimentaires et les efforts d'amélioration vont dans le sens d'une minimisation des modifications des propriétés organoleptiques des produits.

Les nouvelles technologies sont axées sur la rapidité de montée en température (au niveau de la surface ou de la masse du produit) et sur l'absence ou la minimisation du gradient thermique entre l'élément chauffant et le produit.

1.1. Transferts par rayonnement

1.1.1. Les infrarouges

Ce sont des radiations électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre 0,8 et 10 μm .



Elles provoquent par leur absorption dans le produit Un échauffement sur une profondeur limitée fonction de leur longueur d'onde.

Principaux avantages:

- rapidité de montée en température
- inertie faible autorisant une régulation précise
- possibilité de traiter dans l'emballage

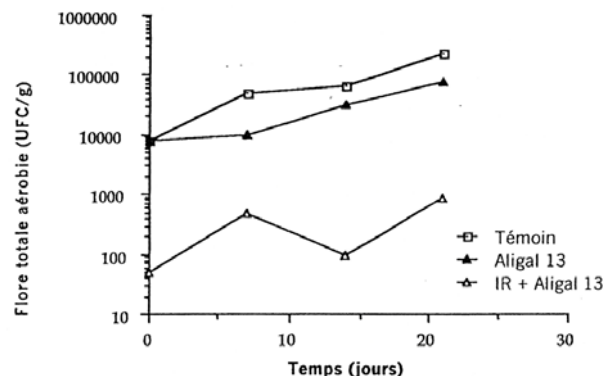
Principaux inconvénients:

- traitement de surface
- coloration pas toujours souhaitée
- investissement et entretien important

Les infrarouges sont essentiellement utilisés pour des traitements dans l'emballage:

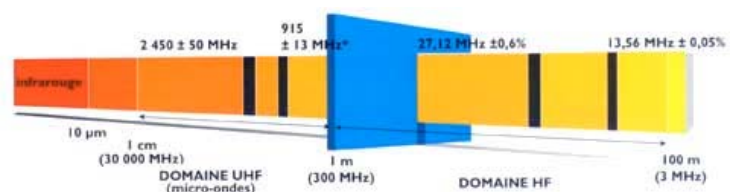
- pasteurisation de produits nus contaminés uniquement en surface (gommes végétales, grains, fruits secs...)
- produits cuits, conditionnés puis pasteurisés (pâtes jaunes, pizzas, pâtisseries...)

Exemple de l'évolution de la flore totale aérobie mésophile de pizzas ayant subi différents traitements

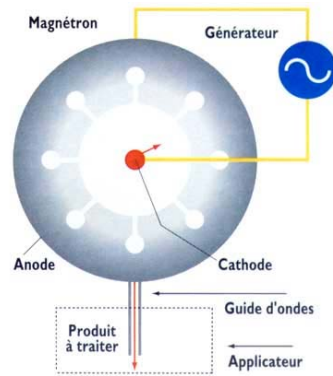


1.1.2. Les micro-ondes

Ondes électromagnétiques ayant une fréquence allant de 3 kHz à 300 GHz.



L'onde électromagnétique est généralement engendrée par un magnétron (composé d'une anode cylindrique et d'une cathode constituée d'un filament chauffé au rouge; des aimants permanents produisent un champ magnétique continu et perpendiculaire au champ électrique).



L'onde se propage jusqu'au produit à traiter dans un guide d'ondes qui est souvent un tube de section rectangulaire. Les ondes sont ensuite transmises au produit par un applicateur adapté: guides à fentes, antennes, cavités multimodes...

Outre la cuisson, le chauffage, la décongélation, le séchage, les micro-ondes permettent de détruire, en fonction des conditions mise en œuvre, les micro-organismes.

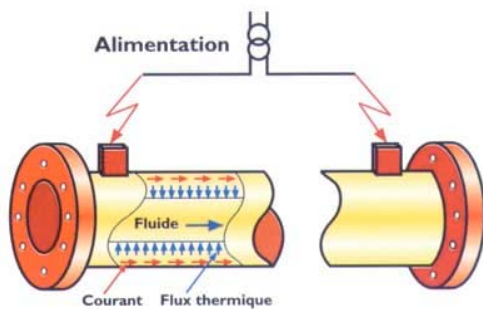
Principaux freins au développement des micro-ondes en industrie:

- coûts d'achat et de maintenance élevés
- problème d'hétérogénéité de traitement pour les produits conditionnés
- instrumentation difficile des matériels du fait de la présence des ondes et donc des interférences avec les capteurs: il en résulte une modélisation et une prédiction des résultats difficiles d'où l'obligation de faire des essais de validation
- rendements énergétiques pas forcément meilleurs que par d'autres procédés plus conventionnels

1.2. Les transferts par conduction améliorée et par chauffage ohmique

1.2.1. Les tubes à passage direct de courant

Dans ces appareils, la chaleur est générée par effet Joule dans la masse même d'un tube qui sert de résistance électrique et dans lequel circule le fluide à chauffer. Ces appareils sont des échangeurs électricité fluide, puisque l'énergie est transmise à travers une surface d'échange: la paroi interne du tube.



Il est possible de contrôler très finement la température de la paroi interne du tube par l'intermédiaire de la puissance électrique, ce qui est la principale différence avec les échangeurs tubulaires classiques.

Par ailleurs la très faible inertie du procédé permet d'éviter des surchauffes en cas d'incidents.

Limites actuelles:

- La régulation des températures de sortie et de paroi varie avec les changements de régime et l'encrassement
- Technologie limitée aux liquides pas trop visqueux et sans gros morceaux
- coût important

Exemple d'un matériel:

Le procédé ACTI - FLASH[®] est destiné à pasteuriser ou stériliser des fluides en préservant au mieux leurs qualités organoleptiques. On peut ainsi traiter des jus de fruits, du lait, des ovoproduits, du vin, des sauces très fluides.

Les spécificités de l'ACTI - FLASH[®] résident dans des vitesses de circulation des fluides supérieures à 6 m/s et dans des densités de flux énergétiques comprises entre 15 et 40 W/cm², ce qui permet des temps de montée en température très courts (3,5 à 10 secondes pour des variations de température de 50° C).

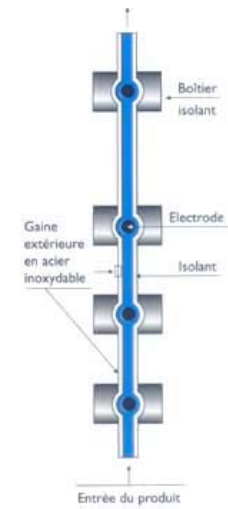


1.2.2. Le chauffage ohmique

Il résulte du passage d'un courant électrique alternatif à travers un produit liquide. C'est donc ici directement le produit alimentaire qui va être le siège d'une résistance au passage du courant électrique et chauffer par effet Joule.

La plupart du temps le gradient de température dans le produit est extrêmement faible, le cœur des particules (jusqu'à 25mm) et le liquide sont chauffés presque simultanément.

Outre le coût actuel très élevé du matériel, le principal frein à l'industrialisation est le problème de l'usure des électrodes et donc de la contamination des produits par les molécules qui les composent.



2. Méthodes non thermiques

2.1. Champ électrique pulsé

L'exposition d'une cellule animale ou végétale à un champ électrique extérieur induit une différence de potentiel électrique de part et d'autre de sa membrane. Lorsque ce champ électrique est très intense (supérieur à 10kV/cm), il induit un potentiel transmembranaire de valeur plus élevée que le potentiel naturel de la cellule. Si le potentiel transmembranaire atteint une valeur critique, approximativement 1 V, les phénomènes de répulsion entre les molécules chargées de la membrane entraînent la formation de pores dans la membrane cellulaire augmentant sa perméabilité. La formation irréversible de pores entraîne la migration vers l'extérieur du contenu cellulaire et ainsi la mort de la cellule.

Paramètres agissant sur l'efficacité des CEP:

- liés au produit:
 - composition du produit (force ionique et pH)
 - température du produit
 - nature des micro-organismes (levures plus sensibles que bactéries, Gram- que Gram+, coques que bacilles)
 - taille des cellules (plus elle est importante plus les cellules sont sensibles)
 - état physiologique des cellules (sensibles en phase de croissance)
- liés aux paramètres d'application
 - intensité du champ électrique appliqué
 - durée du traitement et fréquence d'impulsion
 - forme de la pulsation

Les traitements par champs électriques pulsés permettent d'obtenir des hauts degrés de dégradation des micro-organismes tout en étant rapides et à faible température. Les applications potentielles de cette technologie incluent la majeure partie des boissons et jus de fruits, le lait, les oeufs liquides, les sirops, sauces ou purées et les soupes. Le lait cru représente un bon modèle pour étudier l'efficacité du procédé et étudier les autres effets sur les constituants biologiques.

Destruction de la flore naturelle du lait frais :

Des échantillons de lait frais de même origine ont été traités à 55°C par champ électrique selon le procédé CoolPure (procédé de CEP mis au point l'entreprise US PurePulse) et aussi par des procédés classiques de pasteurisation. Le tableau suivant montre l'efficacité du traitement CEP comparé à trois traitements thermiques différents, pour la flore totale, les bactéries lactiques et les coliformes. On constate que dans tous les cas, la teneur en spores n'est quasiment pas modifiée.

Micro-organismes	Traitement thermique 55°C, 16s	Traitement thermique 63,3°C, 16s	Traitement thermique 73°C, 16s	CoolPure 55°C, 15s
Flore totale	8400	2600	89	50
Flore Lactique	3400	900	28	1
Coliformes	450	350	<1	<1
Spores	22	10	13	10

Destruction des bactéries pathogènes

Des échantillons de lait ont été inoculés avec des témoins de bactéries pathogènes afin de vérifier l'efficacité du traitement. *Listeria innocua* (témoin de *Listeria monocytogenes*) et *Escherichia coli* (témoin de la salmonelle et de shigella) sont toutes deux très sensibles aux champs électriques pulsés, puisque l'on observe des destructions de plus de 6 unités logarithmiques avec un traitement modéré (<55°C, <35 kV/cm). Des expériences similaires ont été menées sur du jus d'orange, permettant de conclure à l'efficacité du traitement par champ électrique pulsé pour des traitements de type pasteurisant, c'est à dire éliminant toute forme végétative de micro-organisme.

Limitations des CEP

- réservé aux fluides pompables et pas trop visqueux
- problèmes avec les produits hétérogènes
- produits à haute conductivité non traitables
- Industrialisation difficile

2.2. Les champs magnétiques pulsés

Soumettre un aliment à un champ oscillant dont la période d'atténuation est supérieure à environ 5kHz et dont l'intensité est supérieure à environ 5 Tesla réduit le nombre de micro-organismes d'environ 2 réductions décimales.

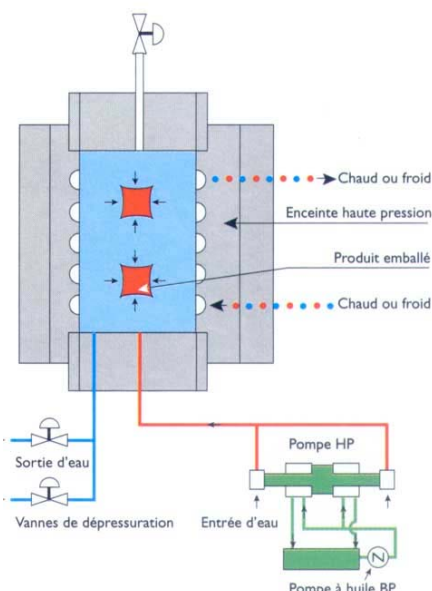
Pour des champs de 7,5 à 40 T, une fréquence de 6 à 416 et un nombre de pulsations de 1 à 10, des destructions de 1,4 à 3,6 réductions décimales sur des levures, des spores de moisissures ou des bactéries ont été observées sans élévation de température ni changement perceptible des caractéristiques sensorielles des produits alimentaires.

Micro-organismes	Produit	Intensité	Nombre de pulsation	Fréquence kHz	Temp °C		micro-orga /cm ³	
					init.	fin.	init.	fin.
Streptococcus thermophilus	Lait	12	1	6	23	24	25000	970
Saccaromyces	Yahourt	40	10	416	4	6	350	25
Saccaromyces	Jus d'orange	40	1	416	20	21	25000	6
Spores	Crème	7,5	1	8,5	-	-	3000	1

Mode d'action (théories):

- perméabilité membranaire au Ca²⁺ et K⁺ modifiée
- interaction ion molécule modifiée
- cassure des liaisons covalentes de l'ADN
- Recombinaison radicalaire

2.3. Hautes pressions hydrostatiques



La pression appliquée est isostatique: elle est identique dans toutes les directions de l'espace, en tous points de l'enceinte et donc du produit. L'intensité des pressions utilisées varie de 2000 à 7000 bars (soit 200 à 700 Mpa). Enfin l'action de la pression s'effectue la plupart du temps à température modérée (< 70°C).

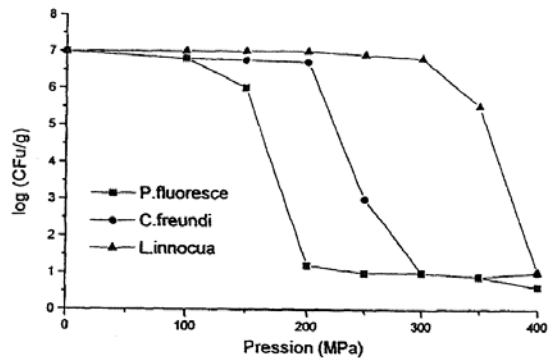
Actions des hautes pressions sur les micro-organismes

Les hautes pressions sont capables de détruire la plupart des micro-organismes. Les modifications subies par leur membrane cellulaire sont les principales causes de mortalité. La sensibilité des micro-organismes aux hautes pressions est variable: bactéries, levures, champignons sont détruits par des pressions pouvant aller jusqu'à 6000 bars. Les spores bactériennes résistent par contre à des pressions de 10 000 bars.

Applications

- en alimentaire, pasteurisation à basse température:
 - jus de fruits
 - purée d'avocats
 - viandes, charcuteries
 - compotes, gelées sauces
 - ...
- dans le domaine de la santé
 - stérilisation de composés thermosensibles en industries pharmaceutiques
 - Stérilisation d'instruments chirurgicaux
 - Inactivation des déchets hospitaliers

Exemple de l'inactivation sous pression dans la viande de bœuf de *Pseudomonas fluorescens*, *Citrobacter freundii* et *Listeria innocua*

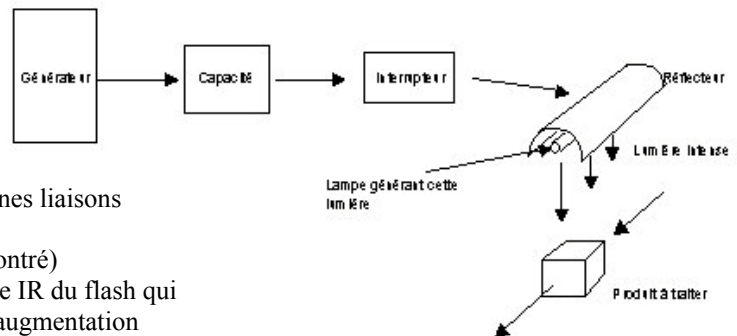


2.4. La lumière pulsée

Le système de lumière pulsée utilise des flashes de lumière intense émise par une lampe à xénon. Ces flashes de lumière ont des durées de 10^{-6} à 10^{-1} seconde et son spectre est 90 000 fois plus intense que celui du soleil à la surface de la terre.

Les longueurs d'onde sont comprises entre 200nm (UV) et 1mm (IR).

- UV entre 200 et 300nm : 8%
- UV entre 300 et 380nm: 13%
- Visible (380 à 700nm): 49%
- IR entre 700 et 1000nm: 30%

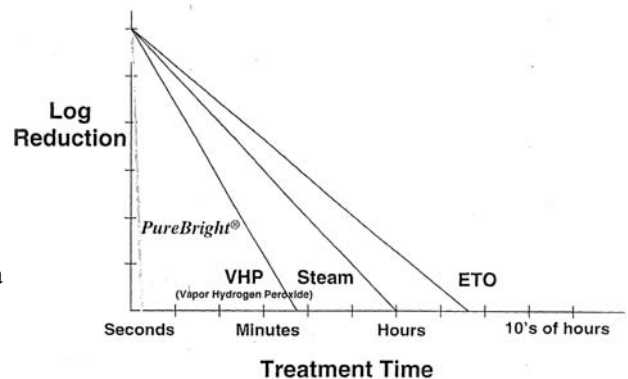


Effets de la lumière pulsée

- photochimiques (UV agit sur certaines liaisons comme celles de l'ADN)
- photomécaniques (encore non démontré)
- photothermiques: ce serait le spectre IR du flash qui serait efficace; il provoquerait une augmentation brutale, importante mais très brève de la température à la surface de l'échantillon qui entraînerait l'éclatement des cellules.

Efficacité et applications:

- Efficace sur tous les micro-organismes
- Traitement rapide
- Peu ou pas de résidus chimiques ou toxiques
- Traitement athermique
- Application pour les décontamination de surface, des liquides clairs ou peu colorés et la stérilisation des emballages.



Exemples:

- Sur l'inox avec 4 flashes à une distance de 120mm, réduction de plus de 5 log sur *Bacillus stéarothermophilus*
- Eau non chlorée de rinçage des fruits et légumes: épaisseur traitée d'environ 6mm pour une efficacité supérieure à 5 log
- Coquilles d'œuf : 6 flashes à une distance de 150mm sur des coquillesensemencées par *Bacillus subtilis* : réduction supérieure à 6log
- Jambon cuit tranché : 6 flashes à une distance de 80mm ont permis d'obtenir une DLC supérieure à 26jours...

Limites d'utilisation

- Applicable à des produits où la lumière peut avoir accès à toute la surface ou à tout le volume
- Difficulté de traitement au travers des emballages absorbant les UV
- Les surfaces rugueuses ou poreuses posent problème (zone d'ombre)

2.5. Les ultrasons

Les ultrasons ont une action de destruction des micro-organismes essentiellement par effet mécanique. Le principe d'action mis en avant est le phénomène de cavitation qui créerait des cisaillements très importants et répétitifs au niveau des cellules. La cavitation entraîne une dislocation des parois cellulaires qui sont altérées par les microbulles gazeuses créées au sein du liquide.

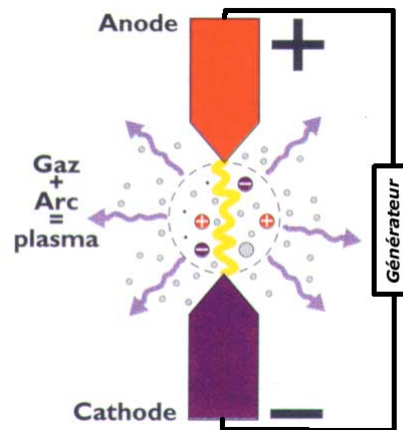
Les effets thermiques accompagnant cette émission peuvent éventuellement renforcer son effet létal.

L'utilisation des ultrasons en tant qu'agent de destruction des micro-organismes se fait systématiquement en combinaison avec une autre méthode:

- en combinaison avec les désinfectants
- en combinaison avec la chaleur
- en combinaison avec la chaleur et la pression

2.5. Les plasmas froids

Un plasma froid est un gaz partiellement ionisé à l'intérieur duquel l'énergie électronique ne se dissipe pas thermiquement mais par collisions. Ces collisions mettent en jeu les électrons et les espèces du gaz, aboutissant à un changement de nature de ces espèces. Le plasma froid est ainsi un générateur de radicaux et d'espèces excitées très active chimiquement.



En utilisation en décharge directe à côté du produit, 12 réductions décimales ont été obtenues pour des spores de *Bacillus subtilis* avec 100W (en 30 minutes pour un volume de 20L et en moins d'une minute pour un volume de 0,1L).

La première application des plasmas froids est le développement d'un stérilisateur pour endoscopes, instruments médicaux fragiles et thermosensibles, potentiellement vecteurs d'infections nosocomiales.

Les limites prévisibles pour une application en agro-alimentaire sont liées à la nature des gaz générés et à leur effet sur la matière organique en particulier au niveau des résidus d'oxydation cancérigènes.