



HAL
open science

Chapitre 12. L'apport sociétal de la pasteurisation des aliments face à son coût énergétique

Philippe Cayot

► **To cite this version:**

Philippe Cayot. Chapitre 12. L'apport sociétal de la pasteurisation des aliments face à son coût énergétique. Les vies de la pasteurisation : Récits, savoirs, actions (1865-2015), Edition Universitaire de Dijon, pp.133-147, 2015, 978-2-36441-144-9. hal-02877855

HAL Id: hal-02877855

<https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-02877855>

Submitted on 22 Jun 2020

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

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

Chapitre 12. L'apport sociétal de la pasteurisation des aliments face à son coût énergétique.

Par Philippe CAYOT, 2015. Pp. 133-147

In : Noël Barbe, Daniel Raichvarg. « *Les vies de la pasteurisation : récits, savoirs, actions (1865-2015)* ». Sous la direction de Noël Barbe et Daniel Raichvarg. Cycle de conférences sur le thème "Pasteurisation 150 : Un objet (co-)mémoriel saisi par l'interdisciplinarité". France. Éditions universitaires de Dijon (EUD), 287 p.-[16] p. de pl., 2015, Art, archéologie & patrimoine (ISSN 1768-1936), 978-2-36441-144-9. (hal-01428934)

Plan du livre

- **Préface**
 - o « *Louis-la-pasteurisation* », Christian AMATORE, Académie des sciences/ENS Ulm

- **Introduction**
 - o *La pasteurisation comme Œuvre*, Aurélie POURREZ, Daniel RAICHVARG, Lab. CIMEOS, uB

- **Le Clos des Rosières, un territoire pour l'expérience**
 - o *Le Clos des Rosières, une œnologie de la complexité et un exemple de partenariat public-privé depuis 70 ans*, Emmanuel LAURENT, Directeur technique (Société Henri Maire)
 - o *Le savant, le raisin et la levure*, Philippe BRUNIAUX, adjoint à l'action culturelle et au patrimoine à la Mairie d'Arbois, médecin et historien
 - o *Louis Pasteur et Claude Bernard, les ferments de la discorde*, Alain Marchal, Société des Amis de Pasteur.
 - o *Le Clos des Rosières ou l'expérience toujours renouvelée*, Christophe BERTSCH, Université de Haute-Alsace

- **La pasteurisation, un terrain pour les savoirs**
 - o *Pasteuriser la sociologie des sciences*, Noel BARBE, Lab. IIAC, CNRS
 - o *Cournot, Pasteur et l'hétérogénéité*, Thierry MARTIN, Logiques de l'Agir, UFC
 - o *Vie des mots et des choses : pourquoi « pasteurisons »-nous ?*, Laurent GAUTIER, Lab. TIL, uB
 - o *Déposer un brevet : une pratique scientifique au XIX^{ème} siècle*, Anne-Emmanuelle KAHN, Uni. Lyon.
 - o *Sprechen sie Deutsch ? Les cahiers de traduction de Louis Pasteur*, Françoise SALVADORI, Laurent-Henri VIGNAUD, uB, CGC.

- **La pasteurisation, un espace pour la production**
 - *Impact du brevet 67006, de 1865 à aujourd'hui*, Gladys CORRON-BOUI¹, Mathieu FONTAINE¹, Birgitta CRUANES¹, Eric POSTAIRE², Jean-Yves LEGENDRE³
¹ Questel Consulting, ² Académie des Sciences, ³ L'Oréal
 - *Lait qui nourrit, qui sauve et qui tue*, Pierre-Olivier FANICA, Ingénieur Agronome
 - ***De la pasteurisation à la stérilisation, le scientifique et l'économique*. Philippe CAYOT, AGROSUP Dijon**
 - *Bactéries lactiques, bactéries technologiques*, Patrick BOYAVAL, Chercheur, DuPont Nutrition & Health :
 - *Levons un voile sur la minéralité dans les vins du Jura*, Yves LE FUR, AGROSUP-Dijon, Laurent GAUTIER, uB, TIL, Pascale DENEULIN, Éc. Ingén., Changins
 - *Fermentons !*, Marie-Claire FRÉDÉRIC, journaliste et historienne de l'alimentation

- **La pasteurisation, un objet par des leçons**
 - Isabelle MARINONE, uB, CGC : *Pasteur*, Georges Rouquier, Jean Painlevé (Festival de Cannes, 1947)
 - Josette UEBERSCHLAG, CIMEOS, uB : *L'hygiène du lait (1926), un film pour un lait pur et sain*
 - Patricia CRÉPIN-OBERT, LDAR Uni. Paris-Diderot, *De futurs enseignants à l'école de Pasteur : diversité des travaux et unité de méthode*.
 - Aurélie POURREZ, uB, CIMEOS, Philippe BRUNIAUX, médecin et historien, adjoint à l'action culturelle et au patrimoine à la Mairie d'Arbois : *Déclinaisons pasteurienne et pédagogiques*

- **Louis Pasteur, des objets pour une mémoire**
 - *Pasteur et les Vignerons d'Arbois, le tableau-mystère*, Marie-Claude FORTIER, Société des Amis de Pasteur
 - *Les revenances de Louis : Domestiquer Pasteur ou être domestiqué ?*, Noel BARBE, Lab. IIAC, CNRS.
 - *Les savants et Pasteur, entre espace communautaire et espace public*, Christian HOTTIN, Lab. IIAC, CNRS.
 - *Salomon Reinach, Désiré Nisard et Louis Pasteur*, Hervé DUCHÊNE, uB, CGC

- **Postface**
 - « *Entre pasteurisation et vaccination* », Maxime SCHWARTZ, Académie des sciences/Institut Pasteur

- **Page de remerciements**
 - Société Henri Maire
 - Dupont de Nemours Health & Nutrition
 - Société Questel

Chapitre 12. L'apport sociétal de la pasteurisation des aliments face à son coût énergétique

Par Ph. Cayot, (Professeur, Chimie des Aliments et des Procédés Alimentaires, AgroSup Dijon)

Le coût énergétique d'un confort alimentaire

Rien de plus banal aujourd'hui que la pasteurisation ou la stérilisation des aliments. Qui d'entre nous n'est pas entré dans un hypermarché pour se procurer des produits alimentaires manufacturés (les ventes en Grande et Moyenne Surface - GMS - représentent 97% des ventes de produits alimentaires en France dont 80 en hyper- et supermarché). Si simple et si pratique : il suffit de tendre la main, de remplir un caddy réel ou virtuel désormais, de transférer ou faire transférer les victuailles jusqu'à chez soi, parfois sous un soleil de plomb sans prendre plus de précautions que cela, et de manger sans crainte. Il n'en a pas toujours été ainsi. Avant l'ère Pasteur, les aliments étaient conservés par séchage (viande, - 30000 avant J.C., Cro-Magnon), par salage (-5500), par acidification (-5000, Babylone), par fermentation (- 2000, Sumer) ou par fumage et salage (fromage de la Légion romaine, le *pecorino romano*) - pratiques toujours vivantes, bien évidemment. Mais la destruction délibérée de microorganismes, la « pasteurisation » ou la stérilisation, non seulement pour allonger la durée de conservation mais aussi pour assurer la sécurité sanitaire de l'aliment, n'apparaît dans l'histoire qu'à partir des découvertes de Pasteur. Aujourd'hui, ce geste simple en hypermarché, sans la moindre inquiétude et réalisé par des centaines de millions d'habitants des pays développés, nous le devons en grande partie aux travaux de science de Pasteur. Grâce à ses travaux, l'industrie d'aujourd'hui, par chauffage des aliments dans un contenant hermétique, offre à tous des aliments sains sur le plan hygiénique. Outre l'hygiène, ces traitements offrent une praticité sans conteste grâce à la conservation parfois longue. La qualité sanitaire des produits manufacturés est désormais quasi-parfaite, de telle sorte que les infections collectives qui mettent en cause un aliment « industriel » sont devenues rares.

Pasteuriser du lait ou stériliser des conserves nécessite cependant une importante quantité d'énergie. Cette dépense énergétique est le prix à payer pour assurer la sécurité sanitaire des aliments. Prenons un cas extrême de ce point de vue : un plat cuisiné congelé. **La poêlée de légumes congelée** est d'abord cuisinée en usine et la température des légumes atteint environ 85°C en fin de cuisson, soit au final une consommation d'énergie de 250 kJ/kg de légumes. Immédiatement après, la poêlée est congelée à -25°C pour obtenir une qualité hygiénique irréprochable, soit au total 690 kJ/kg de légumes. Passons sur les dépenses de maintien en température négative dans les congélateurs industriels (usine, centrale d'achats...), dans le camion frigorifique, dans les linéaires du supermarché et dans le congélateur familial : on ajoutera 100 kJ/kg (chiffre sans doute sous-estimé). Quand vient l'envie d'une bonne poêlée, le consommateur n'a plus qu'à verser le contenu du sac congelé à -18°C et à le porter à 65°C dans une poêle, soit 600 kJ/kg de légumes décongelés et réchauffés¹. Pour ce confort, en toute sécurité hygiénique, chacun d'entre nous, consommateur moderne au temps de cuisine réduit, dépense 1600 kJ

¹ Pour les calculs, les valeurs utilisées sont les suivantes :

- la chaleur massique des légumes décongelés est de 3,85 et congelés 1,96 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹,
- la chaleur latente est de 313,5 kJ·kg⁻¹,
- la perte énergétique à la cuisson n'est pas prise en compte, ni le type d'énergie utilisée (avec l'électricité, il faut multiplier par plus de 2,5),
- l'apport en calorie alimentaire des légumes a été considéré comme égal à 400 cal/kg soit 1600 J/kg.

d'énergie pour 1 kg de poêlée prête-à-l'emploi. Cela revient à dépenser pour un joule nutritionnel apporté par les légumes à notre corps la bagatelle de 1kJ d'énergie, ou, si l'on préfère, **1000 calories d'énergie pour 1 calorie d'aliment !** Cette dépense nous semble banale et apparaît comme supportable aujourd'hui, mais, avec l'épuisement progressif des ressources énergétiques fossiles, l'incapacité des sources d'énergie renouvelable à compenser nos dépenses en énergie actuelle, le coût de la stabilisation microbiologique par chauffage (et congélation) va nécessairement augmenter le coût de l'alimentation moderne. La question doit donc être posée : en sera-t-il toujours ainsi dans nos assiettes ?

1. Coûts économiques et humains d'un défaut d'hygiène alimentaire

Il est probable que, sans la pasteurisation ni la stérilisation, nous observerions une fréquence de TIAC très élevée. Les TIAC sont des toxi-infections alimentaires collectives, c'est-à-dire l'apparition d'au moins deux cas similaires d'une symptomatologie, en général gastro-intestinale (vomissements, diarrhée, douleurs au ventre si vous préférez !), dont on peut rapporter la cause à une même origine alimentaire (définition de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail - ANSES²). Une TIAC doit être déclarée aux autorités sanitaires quand une famille, une cantine scolaire, une ville... ou un groupe de consommateurs dans son ensemble est infecté lors d'un même repas ou par un même aliment. Prenons un exemple réel. 120 personnes mangent dans un restaurant de Pékin. Entre 1h et 9h après le début du repas, 13 personnes sont hospitalisées pour des douleurs abdominales, des diarrhées et des vomissements, accompagnés de fièvre. Qu'ont en commun ces 13 personnes ? Ils ont tous mangé de boulettes de porc, contaminées par une bactérie pathogène *Proteus mirabilis*³, les 107 autres clients interrogés n'en ayant pas consommé. Dans le cas présent, les malades s'en sortent à bon compte.

Les infections alimentaires sont parfois mortelles. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) évalue à **2,2 millions le nombre de personnes qui meurent annuellement des suites de diarrhées transmises par un aliment ou par l'eau**. Dans la majorité des cas, il s'agit d'enfants, intoxiqués par un aliment⁴. Aux États-Unis, les autorités s'accordent à penser qu'un Américain sur six (soit 46 millions de personnes) a été malade au moins une fois en raison d'un aliment corrompu, que 128 000 d'entre eux ont été hospitalisés, et que 3 000 sont morts en raison d'une maladie liée à un aliment corrompu⁵. Pour la moitié de ces cas, *Norovirus* est en cause (la gastro-entérite hivernale bien connu de tous). Viennent ensuite dans 11% des cas des *Salmonelles* (les œufs sont à 90% l'aliment en cause), *Clostridium perfringens* dans 10% des cas (souvent des viandes en sauces), *Campylobacter* dans 9% des cas (transmission par les viandes)⁶. Étant donné leur durée et leurs séquelles potentielles, les diarrhées à *Campylobacter* sont lourdes de conséquences sur le

² ANSES, *Les toxi-infections alimentaires (TIAC)*, [En ligne], <https://www.anses.fr/fr/content/les-toxi-infections-alimentaires-collectives-tiac> (page consultée le 1^{er} juillet 2015).

³ Yong WANG, Shouyin ZHANG, Jiyun YU et al., « An outbreak of *Proteus mirabilis* food poisoning associated with eating stewed pork balls in brown sauce, Beijing », *Food Control*, n 21, 2010, p. 302–305.

⁴ Organisation mondiale de la Santé, *Maladies d'origine alimentaire*, [En ligne], http://www.who.int/foodsafety/areas_work/foodborne-diseases/fr/ (page consultée le 1^{er} juillet 2015).

⁵ Centers for Disease Control and Prevention, *Estimates of foodborne illness in the United States*, [En ligne], <http://www.cdc.gov/foodborneburden/> (page consultée le 1^{er} juillet 2015).

⁶ Elaine SCALLAN, Robert HOEKSTRA, Frederick ANGULO et al., « Foodborne illness acquired in the United States-major pathogens », *Emerging Infectious Diseases*, n 17, 2011, p. 7-15.

plan socioéconomique⁷, alors que les salmonelloses, plus fréquentes, sont de conséquences généralement bénignes (même si certains cas peuvent se révéler mortels)⁸. Le coût des maladies liées à un aliment corrompu a été estimé pour les USA entre 50 et 80 milliards de dollars en frais de soins, en perte de productivité et en perte de qualité de vie⁹.

Ces intoxications alimentaires ne sont pas toutes dues à des défauts industriels. On estime que, toujours aux USA, **95% des intoxications alimentaires proviennent de mauvaises pratiques à la maison**¹⁰ : défaut d'hygiène (mains non lavées), rupture de la chaîne du froid, consommation d'aliments périmés... Les TIAC font partie des causes mineures dans les infections alimentaires des populations des pays développés, et les TIAC dont l'industrie alimentaire serait responsable sont encore plus rares. Aux USA, en 1997, sur 504 cas d'intoxications alimentaires recensés, seuls 19 provenaient d'aliments à l'origine hygiénique non conforme¹¹, soit moins de 4%, sans que l'industrie soit directement en cause. En France, 10 258 personnes (dont 6 sont décédées) ont été concernées par des TIAC en 2012, soit 1 288 foyers de toxi-infections alimentaires collectives, pour un total de plus 250.000 personnes concernées par un cas d'infection d'origine alimentaire : les TIAC représentent moins de 5% des infections alimentaires en France. Le nombre des TIAC en France est en croissance permanente depuis 1987 : moins de 200 en 1987 et 1988, 326 en 1990, 627 foyers de TIAC en 2000. Sur les 1 288 foyers de TIAC, 431 (33 %) sont des TIAC liés à un repas familial, 843 (65 %) proviennent de la restauration collective et 12 foyers étaient diffus, c'est-à-dire causés par un aliment distribué sur plusieurs lieux de survenue. Les plats cuisinés ont été suspectés d'être la cause de 29 % des TIAC en 2012. Viande (19%), poissons & crustacés (13%), volailles (9%) sont les autres aliments principalement responsables de TIAC¹².

Si les TIAC proviennent en premier lieu de plats cuisinés (29%), **très peu de TIAC sont imputables à l'industrie alimentaire** : fast-food, sandwicherie, camion pizzeria, plats traiteurs..., la « consommation nomade » (consommation sur le pouce, autrement dit sur le pouce sale !), sont autant de sources de TIAC. L'industrie alimentaire est assez rarement en cause pour des TIAC dans les pays occidentaux. Cependant, quand une industrie faillit dans sa mission d'assurance qualité, ce n'est plus 13 personnes intoxiquées dans un restaurant à Pékin, 15 autres ailleurs dans une cantine, 30 à l'occasion d'un mariage, mais, comme au Japon durant l'année 2000, ce sont 13 000 personnes infectées à *Staphylococcus aureus* (Staphylocoque doré) par de la poudre de lait¹³. Cette bactérie présente un problème particulier en raison de sa résistance accrue aux antibiotiques et de

⁷ Organisation mondiale de la Santé, *Campylobacter, Aide-mémoire*, n 255, 2011, [En ligne], <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs255/fr/> (page consultée le 21 juillet 2015).

⁸ Organisation mondiale de la Santé, *Infections à Salmonella (non typhiques), Aide-mémoire*, n 139, 2013, [En ligne], <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs139/fr/> (page consultée le 21 juillet 2015).

⁹ Carol BYRD-BREDBENNER, Jacqueline BERNING, Jennifer MARTIN-BIGGERS et al., « Food safety in home kitchens: a synthesis of the literature », *International Journal of Environmental Research and Public Health*, n 10, 2013, p. 4060-4085.

¹⁰ Elizabeth REDMOND, Christopher GRIFFITH, « The importance of hygiene in the domestic kitchen: Implications for preparation and storage of food and infant formula », *Perspectives in Public Health*, n 129, 2009, p. 69-76.

¹¹ Sonja OLSEN, Linda MACKINON, Joy GOULDING et al., « Surveillance for Foodborne Diseases Outbreaks-United States, 1993-1997 », in *Surveillance Summaries*, 2000, n SS-1, p. 1-62, [En ligne], <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/ss4901a1.htm> (page consultée le 1^{er} août 2015).

¹² Institut national de Veille sanitaire, *Surveillance des toxi-infections alimentaires collectives. Données de la déclaration obligatoire, 2012*, [En ligne], <http://alimentation-sante.org/2014/04/invs-surveillance-des-toxi-infections-alimentaires-collectives-donnees-de-la-declaration-obligatoire-2012/> (page consultée le 1^{er} août 2015).

¹³ Tsutomu ASAO, Yuko KUMEDA, Takao KAWAI, « An extensive outbreak of staphylococcal food poisoning due to low-fat milk in Japan : estimation of enterotoxin A in the incriminated milk and powdered skim milk », *Epidemiology and Infection*, n 130, 2003, p. 33-40.

la gravité de la maladie. Les coûts humains et économiques sont, en cas de TIAC d'origine industrielle très lourds, et c'est, du point de vue de l'entreprise, une catastrophe. Aucune entreprise ne peut se permettre un tel accident industriel : « La seule chose qui m'empêche de dormir, c'est un défaut de « safety » (d'hygiène) » nous répétait notre CEO (PDG) lorsque je travaillais pour une entreprise américaine.

2. L'industrialisation massive de la production alimentaire et la pasteurisation généralisée

L'espérance de vie n'a cessé de croître : autour de 25 ans en 1740, 43 ans en 1850, 84,9 ans pour une femme et 78,5 ans pour un homme en 2012¹⁴. Parallèlement, la mortalité infantile connaît à partir de 1870 une chute vertigineuse, passant de 170-200 enfants pour 1 000 qui ne dépassent pas leur première année à 3,5 décès/an/1 000 enfants en 2013¹⁵. Beaucoup admettent comme hypothèse que cet accroissement d'espérance de vie et de survie en prime enfance est lié au progrès de la médecine et de l'hygiène en milieu hospitalier notamment. Mais ce gain d'espérance de vie est sans doute aussi à attribuer à l'accroissement de la performance agricole (mécanisation notamment), à la disponibilité en aliments... et, surtout peut-être, à l'amélioration sanitaire des aliments, notamment celle du lait distribué aux enfants¹⁶.

Difficile de considérer l'amélioration des conditions de vie et à l'allongement de l'espérance de vie comme l'effet de tel ou tel progrès. On sait cependant que, **en France en 1950, le nombre de décès chez l'enfant de 1 à 4 ans liés à une entérite et autres maladies diarrhéiques** (deuxième cause de décès chez l'enfant de 1 à 5 ans dans le monde selon l'OMS) est de **231** (pour 5 110 décès liés à une entérite et autres maladies diarrhéiques dans la population totale), **en 1960** il n'est plus que de **33** (964 pour l'ensemble de la population) et, **en 1997**, de **5** (412 pour l'ensemble de la population)¹⁷. Les TIAC en Grande-Bretagne sont passés de 150 cas annuels en 1992 à 45 cas en 2008¹⁸, ce qui montre les progrès continus en termes d'hygiène de manière globale. On peut sans doute imputer la réduction des cas d'entérite depuis les années 50 à l'industrialisation de l'alimentation : contrôles plus fréquents et plus poussés, personnel de mieux en mieux formé, notamment grâce à l'introduction d'ingénieurs dans les industries agroalimentaires, généralisation de la pasteurisation ou de la stérilisation. Par exemple, entre les années 1960 et 2000, la consommation des poissons préparés et produits de la mer a été multipliée par 5 et celle des conserves de légumes et pommes de terre préparées par 4¹⁹. La consommation de légumes frais est passée de 340 euros par an en 1979 à 283 euros par an en 2 000 (euros constant) et, parallèlement,

¹⁴ Données pour la France métropolitaine.

¹⁵ Données de l'Institut national des études démographiques, [En ligne], <https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/memos-demos/fiches-pedagogiques/la-mortalite-infantile-en-france/> ; <https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/memos-demos/fiches-pedagogiques/la-duree-de-vie-en-france/> ; <https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/graphiques-cartes/graphiques-interpretes/esperance-vie-france/> (pages consultées le 1^{er} août 2015).

¹⁶ Cf. l'article de Pierre-Olivier FANICA dans ce même ouvrage : Lait qui tue, qui sauve et qui nourrit.

¹⁷ http://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/chiffres/bases-donnees/causes_deces_depuis_1950/ (http://www.ined.fr/cgi-bin/1999/display_tbl.pl)

¹⁸ Fraser GORMLEY, Christine LITTLE, Nalini RAWAL et al., « A 17-year review of foodborne outbreaks : describing the continuing decline in England and Wales (1992–2008) », *Epidemiology and Infection*, n 139, 2011, p. 688-699.

¹⁹ Patrick ÉTIÉVANT, France BELLISLE, Jean DALLONGEVILLE et al., *Les comportements alimentaires. Quels en sont les déterminants ? Quelles actions, pour quels effets ?* Synthèse du rapport d'expertise, Paris, INRA, 2010, p. 10.

les conserves (et plats préparés à base de viande) n'ont cessé de progresser : les dépenses annuelles par ménage sont passées de 639 euros par an en 1979 à 872 euros en 2000²⁰.

Cet accroissement de la consommation des produits préparés ou prêt-à-consommer par l'industrie est rendu possible par la capacité industrielle croissante à pasteuriser (stériliser)... et par la modification du commerce de bouche qui permet un approvisionnement des familles espacé dans la semaine. Par exemple l'accroissement de capacité de l'industrie laitière : les produits laitiers fabriqués en 2013 correspondent à 23,7 milliards de litres de lait transformés à 99% par l'industrie laitière²¹.

La dernière évolution apparue dans la manière d'acheter à manger est l'achat sur Internet : 2,6% des achats alimentaires en 2005, 6,5% des achats en 2012. Désormais, le consommateur est prêt à acheter sans voir le produit : le degré de confiance quant à la qualité des aliments et d'hygiène est important. Est-ce durable ?

3. Les découvertes des XVIII^e et XIX^e siècles assurent la qualité sanitaire d'aujourd'hui

L'apparition de l'aliment sain débute-elle au milieu du XIX^e siècle ? Pasteur est-il le père de la pasteurisation ? D'autres avant lui vont imaginer des solutions de stabilisation des aliments par chauffage, mais c'est bien Pasteur en 1861 qui découvre que la corruption des aliments vient de germes en suspension dans l'air. C'est par ses découvertes que s'opère à dessein (et non plus de manière fortuite et empirique) la destruction des microorganismes en vue de stabiliser un aliment. Pasteur utilisait l'autoclave pour stériliser son matériel de recherche. Denis Papin est cependant le père du principe de l'autoclave, qu'il appelle en 1679 le « digesteur », ancêtre de l'autocuiseur, et pour lequel il créa la soupape de sûreté²². Papin, huguenot chassé de France, ne tira aucun profit de cette invention (il meurt dans la pauvreté à Londres) tandis que l'entreprise SEB en sortant sa super-cocotte en 1953, fera fortune avec ses autocuiseurs ! Papin observe déjà que les aliments s'altèrent moins vite après traitement dans le digesteur mais leur structure est détruite par le traitement. L'usage du digesteur sera mis à profit par les Anglais pour produire de la gélatine (Jelly) à partir d'os²³. En 1688, Papin s'installe à Marebourg (Allemagne) sur proposition d'une chaire de mathématique du prince Charles-Auguste, électeur de Hesse-Cassel²⁴, puis à Cassel comme

²⁰ Pascale HÉBEL, Fanette RECOURS, « Effets d'âge et de génération : transformation du modèle alimentaire », *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, n 6, 2007, p. 297-303.

²¹ La Maison du Lait, La filière laitière française, [En ligne], <http://www.maison-du-lait.com/fr/chiffres-cles/filiere-laitiere-francaise-en-50-chiffres> (page consultée le 1^{er} août 2015).

²² *Encyclopédie Larousse*, « Denis Papin », [En ligne], http://www.larousse.fr/encyclopedie/personnage/Denis_Papin/136994 (page consultée le 1^{er} août 2015) ; Charles-Armand KLEIN, *Denis Papin, illustre savant blaisois. Grandes figures du Val de Loire*, Chambray-lès-Tours, CLD, 2000 et Yves-Denis PAPIN, « Denis Papin : un cerveau en ébullition », *Historia*, n 696, 2004, p. 36-38.

²³ Cf. Denys PAPIN, *A new digester or engine for softening bones containing the description of its make and use in these particulars: viz. cookery, voyages at sea, confectionary, making of drinks, chemistry, and dying: with an account of the price a good big engine will cost, and of the profit it will afford*, London, Henry Bonwicke, 1681 ; Denis PAPIN, *La Manière d'amollir les os et de faire cuire toutes sortes de viandes en fort peu de temps & à peu de frais. Avec une description de la Machine dont il faut se servir pour cet effet, ses propriétés et ses usages confirmés par plusieurs Expériences*, Paris, édition Michallet, 1682.

²⁴ Jacques MÉRAND, « Papin Denis (1647-vers 1712) », *Encyclopædia Universalis* [En ligne], <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/denis-papin/> (page consultée le 12 mai 2015).

médecin personnel du Landgrave de Hesse, Philippe de Hesse-Philippsthal. Il aurait inventé, entre 1695 et 1700, une machine à conserver les jus de fruits par échauffement puis maintien sous vide²⁵. Viennent ensuite des découvreurs comme John Needham (1748) qui découvre le pouvoir de stérilisation du feu et Nicolas Appert (1795) qui stabilise des aliments en bouteille de verre bouchée et trempée dans une eau bouillante, bouteille de verre bientôt remplacée par des boîtes en fer²⁶, des scientifiques comme Alfred de Vergnette de Lamotte (1850) qui stabilise le vin par un chauffage. De même, la découverte des bactéries n'est pas faite en premier par Pasteur mais par Van Leeuwenhoek en 1676 que celui-ci appelle à l'époque des « animalcules »²⁷. Après Pasteur, John Tyndall en 1875 démontrera que certaines formes bactériennes sont particulièrement résistantes à la destruction thermique et mettra au point la « tyndallisation », alternance de chauffage à basse température et de refroidissement, une sorte d'alternative à la « pasteurisation ». La « tyndallisation » consiste à chauffer modérément de manière discontinue : dans les faits, il s'agit de chauffer environ 30 minutes de 60°C à 70°C et de répéter plusieurs fois ce chauffage par 24h. Les spores qui résistent à des traitements de type « pasteurisation » germent en bactéries qui sont ensuite éliminées par le traitement de « pasteurisation basse » longue durée. Par la répétition, on élimine ainsi toutes les spores. Le procédé de « tyndallisation » est parfois utilisé pour conserver des viandes et s'étudie encore²⁸. En 1863, Malvezin, Gasquet et Gangloff mettent au point un procédé de stabilisation de la bière. En 1865, comme on le suit dans cet ouvrage, Pasteur dépose un brevet sur la stabilisation du vin par chauffage à 58°C, idée qui sera étendue au lait et brevetée par le chimiste allemand Franz Von Soxhlet en 1886. Émile Duclaux, élève à l'École Normale Supérieure, collaborateur de Pasteur, puis nommé à 27 ans professeur à Clermont-Ferrand, non loin de sa ville natale Aurillac, travaille sur la microbiologie du lait et du fromage ainsi que sur la fermentation de la bière²⁹. Propriétaire d'une ferme à Marmanhac³⁰, Duclaux poursuivait sur le terrain ses études sur la pasteurisation du lait et la microbiologie du fromage, du cantal en l'occurrence³¹. De retour à Paris en 1878, il rejoint Pasteur à Paris 1887 et lui succède en 1895 comme directeur de l'Institut³¹. Il perfectionne la « pasteurisation du lait » en 1895³². Ces lents progrès scientifiques vont donner naissance à l'industrie alimentaire, à commencer par l'industrie laitière. Entre 1889 et 1930, on verra s'intensifier la production industrielle de lait pasteurisé et conditionné en bouteille. En 1969, viendra ensuite le lait UHT (lait stérilisé, traité par traitement Ultra-Haute Température), puis, en 1980, l'épuration bactérienne par microfiltration³³.

4. La pasteurisation aujourd'hui dans les laiteries industrielles

Le traitement thermique peut cependant détruire aussi l'aliment, comme Papin s'en était aperçu en 1679 avec son digesteur. Il faut donc trouver un barème temps-température qui assure une

²⁵ Alfred Auguste ERNOUF, *Denis Papin, sa vie et son œuvre (1647-1714)*, Paris, Hachette, 1874 et Henry Winram DICKINSON, « Tercentenary of Denis Papin », *Nature*, n 160, 1947, p. 422-423.

²⁶ Peter Durand patent N° 3372, déposé en 1810 en Angleterre.

²⁷ Lansing PRESCOTT, John HARLEY, Donald KLEIN, *Microbiologie*, Bruxelles, De Boeck-Wesmael, 1995.

²⁸ Hun Soo KIM, Jeong Hoon KIM, Ji Hyun BANG et al., « Reduction of Bacillus cereus spores in sikhye, a traditional Korean rice beverage, by modified tyndallization processes with and without carbon dioxide injection », *Letters In Applied Microbiology*, n 55, 2012, p. 218-223.

²⁹ Michel MORANGE, « What history tells us V. Émile Duclaux (1840-1904) », *Journal of Biosciences*, n 31, 2006, p. 215-218.

³⁰ Une rue y porte son nom.

³¹ Émile DUCLAUX, *Le lait. Études microbiologiques et chimiques*, Paris, J.-B. Baillière et fils, 1887.

³² Pierre-Olivier FANICA, *Le lait, la vache et le citoyen*, Versailles, éd. Quæ, 2008, p.390.

³³ <http://www.maison-du-lait.com/fr/filiere-laitiere/lhistoire-lait-au-fil-des-siecles>

destruction bactérienne suffisante mais aussi qui protège la structure de l'aliment et ses qualités nutritionnelles (vitamines, apport en acides aminés indispensables tels que la lysine et dont la teneur chute au chauffage en raison de la réaction de Maillard³⁴). Chick en 1908 observe que la destruction des micro-organismes se fait selon une loi exponentielle décroissante : $N = N_0 \cdot e^{-k \cdot t}$ avec N le nombre de bactéries qui vivent encore après un chauffage d'une durée t, N_0 la population avant chauffage et k, un taux de destruction fonction de la résistance des bactéries³⁵. Cette découverte permet ensuite à Bigelow et Esty en 1920 de définir la durée de chauffage la plus courte pour détruire la totalité des micro-organismes, durée qu'ils ont appelés « Thermal Death Point »³⁶. Katzin et ses collaborateurs (1943) trouvent un moyen de calcul simple pour évaluer l'efficacité du traitement thermique : la durée de réduction décimale. Cette durée de réduction décimale correspond au temps de traitement nécessaire pour diviser d'un facteur 10 le nombre de micro-organismes qui survivent³⁷. La durée de réduction décimale se note D, s'exprime en minutes et fait aujourd'hui encore référence en agroalimentaire pour évaluer la performance d'un traitement thermique de réduction des microorganismes. Le modèle utilisé s'appelle le modèle de Bigelow :

$D = D^* \cdot 10^{\left(\frac{T^* - T}{Z}\right)}$, où D est la durée de réduction décimale à la température T, D^* la durée de réduction décimale de référence à la température de référence, T^* , égale à 121,1°C et Z l'écart de température induisant la variation de D d'un facteur 10. Les valeurs de Z et D^* caractérisent la thermorésistance d'un microorganisme donné.

La pasteurisation du lait s'effectue de nos jours dans les industries laitières à 72°C durant 15 à 20 secondes et suffit à réduire globalement la population de microorganismes de 5 décimales, c'est-à-dire de 99,999% de la population de départ, soit d'environ un million (10^6) de cellules par ml de lait à 10 (10^1) cellules par ml de lait. Cette pasteurisation du lait s'opère dans un « pasteurisateur à plaques », par le passage du lait entre deux plaques qui forment un circuit pour le lait et un pour de l'eau chaude ou de la vapeur (figure 1)³⁸.

³⁴ La réaction dite de « Maillard », découverte en 1912 par Louis-Camille Maillard, résulte de la réaction d'un groupe amino ($R-NH_2$) - les résidus de lysine des protéines - avec un sucre réducteur (un carbonyl, $R'R''C=O$) par une réaction d'addition nucléophile à un $pH > 5$. Par exemple, dans le lait (pH proche de 7), le lactose, qui est un sucre réducteur au même titre que le glucose et le fructose (et contrairement au saccharose, le sucre de table), réagit avec les groupes aminos des protéines et produit d'autant plus de groupes amino-alkylés ($R-N=CR'R''$) que la température est haute et la durée de chauffage longue. Après digestion, on ne trouve plus de lysine, un acide aminé strictement indispensable pour l'homme mais un alkyllysine sans valeur nutritionnelle. La réaction de Maillard est, entre autre, à la base du brunissement du pain à la cuisson et du développement des arômes de cuit.

³⁵ Harriette CHICK, « An investigation of the laws of disinfection », *Journal of Hygiene Cambridge*, n 8, 1908, p. 92-158.

³⁶ Willard Dell BIGELOW, James Russell ESTY, « The thermal death point in relation to time of typical thermophilic organisms », *Journal of Infectious Diseases*, n 27, 1920, p. 602-617.

³⁷ Leonard KATZIN, Leslie SANDOHLZER, Mary STRONG, « Application of the decimal reduction time principle to a study of the resistance of coliform bacteria to pasteurization », *Journal of Bacteriology*, n 45, 1943, p. 256-272.

³⁸ L'échangeur à plaques moderne provient d'une idée du début du XX^e siècle. En 1910, une société parisienne dépose un brevet qui consiste à faire passer du lait dans une sorte d'éponge métallique. Un peu plus tard, Henri Stassano propose ce qui sera appelée « la machine Stassano » dans les laiteries jusque vers 1950 (Henri STASSANO, « Des appareils de pasteurisation à plaques », *Le Lait*, n° 102, 1931, p. 124-133. Un premier prototype (brevet déposé en Belgique le 23 mars 1911) était constitué, comme l'explique Stassano, d'une « lame en bronze [...] parfaitement superposable à la plaque portant le cadre en papier japon [et] réunies [pour] former un bloc unique que l'on plongeait dans un bain-marie ». Ce prototype sera suivi d'un deuxième fait de trois plaques de métal entre lesquelles le lait circule, le bloc étant plongé dans un autoclave. Enfin un troisième prototype, fait de « superposition de plaques de cuivre espacées d'une faible épaisseur (1mm) permettant un long cheminement (12 m) en circuit fermé à une vitesse maximale de 1,5 m/s » pour une parfaite efficacité de destruction bactérienne donnera lieu finalement à

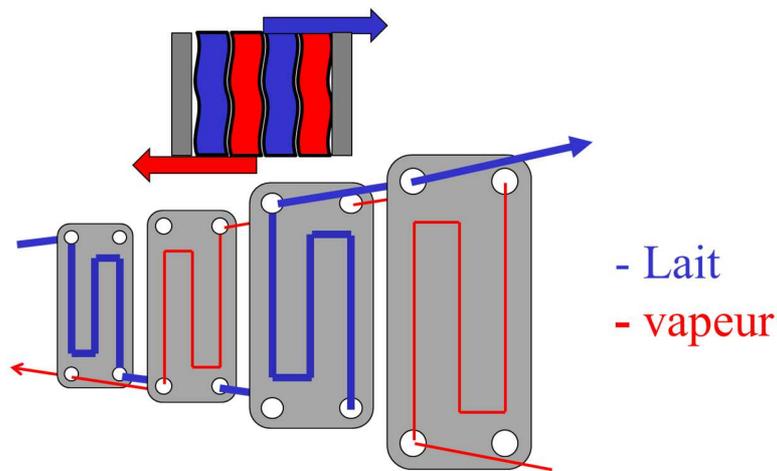


Figure 1 : Schéma du pasteurisateur à plaques

Légende : La vapeur circule dans un circuit séparé de celui du lait. Ces circuits serpentent entre un empilement de plaques d'inox qui transmettent la chaleur de la vapeur au lait.

Il subsiste donc encore certaines bactéries (en raison de leur résistance), ce qui oblige le lait à être conservé au réfrigérateur (idéalement 4°C, dans la réalité domestique plutôt 8°C) pour ralentir la croissance des survivants. Par exemple, la valeur de D à 95°C voisine de 4 min pour *Bacillus cereus*, montre qu'un traitement thermique à 72° pendant 20 secondes (0,33 min) ne suffit pas à détruire cette bactérie.

Bacillus cereus, un microorganisme pathogène, produit plusieurs toxines, dont la céréulide. Cette toxine provoque vomissements et diarrhées : 5 à 10 µg/kg corporel suffisent à rendre malade, soit un minimum de 10⁶ cellules bactériennes / g d'aliment. *Bacillus cereus* vit sous forme de spores dormantes dans le sol (10⁴ à 10⁵ cellules par g de sol) et se retrouve dans les aliments, par transmission via des insectes. Un chauffage à 70°C durant 12 secondes permet toutefois une réduction décimale de 6 unités dans de la viande de porc selon l'ANSES. En 2008, *Bacillus cereus* est la 3^e cause de TIAC en France et selon l'ANSES, 80% des cas se produisent en restauration collective. Les plats cuisinés, ou à base de poudre, et reconstitués avec de l'eau chaude, les pâtes cuites et maintenues tièdes en attendant le client sont les principales sources de TIAC. Autant qu'une cuisson pas assez poussée, il semble que ce soit aussi une réfrigération trop lente et/ou un temps trop important entre la préparation et la cuisson qui en soit la cause pour l'ANSES. *Bacillus cereus* croît entre 4 et 55°C. La liaison chaude est autant à surveiller que la chaîne du froid.

À l'inverse, pour *Staphylococcus aureus*, la valeur de D à 72°C est de 0,1 à 1 seconde, ce qui signifie que la pasteurisation assure parfaitement sa destruction (heureusement, étant donné la gravité de l'intoxication). Pourtant, entre 1988 et 2003, il est admis que *Staphylococcus aureus* est responsable à lui-seul de 20% des TIAC « laitières » (les TIAC « laitières » représentent 5% des TIAC tous aliments confondus). 87% de ces TIAC proviennent de fromages³⁹, c'est-à-dire des

l'industrialisation de l'échangeur à plaques toujours utilisé actuellement. Cf. l'article de Pierre-Olivier FANICA dans ce même ouvrage : Lait qui tue, qui sauve et qui nourrit,

³⁹ Marie-Laure DE BUYSER, Anne BRISABOIS, Emmanuelle ESPIÉ, et al., « Implication du lait et des produits laitiers dans les maladies infectieuses d'origine alimentaire en France de 1988 à 2003 », *Bulletin épidémiologique*, n 16, 2005, p. 1-2.

aliments non pasteurisés (même si le lait de départ peut l'être) mais aucune n'est attribuée à du lait, ce qui démontre l'efficacité des traitements thermiques actuels du lait. *Staphylococcus aureus* est très ubiquitaire : on le trouve partout, dans le sol, l'air, l'eau de mer, sur la peau de l'homme, dans les réfrigérateurs, les hôpitaux ! Plusieurs toxines sont responsables de l'infection. Les plats cuisinés sont le vecteur principal, soit par re-contamination après traitement thermique (manipulation humaine inadaptée), soit lors d'une fermentation lente, comme dans le cas des fromages ou surtout des salaisons. Selon l'ANSES, en 2009, *Staphylococcus aureus* serait le 3^e responsable de TIAC en Europe, dont 300 hospitalisations et 3 décès. Ici, plus qu'un problème de pasteurisation, c'est un problème d'hygiène en cuisine et de durée entre la préparation et la consommation. « Les plats ayant nécessité des manipulations humaines (salades composées, plats cuisinés) et les produits laitiers ont été les aliments les plus fréquemment associés aux intoxications à staphylocoques rapportées en Europe et en France, au cours de l'année 2009 » écrit l'ANSES (fiche *Staphylococcus aureus*, description de danger biologique transmissible par les aliments, septembre 2011). La méthode de traitement en peut évidemment tout régler : la question des usages et de la formation des hommes sont au moins aussi importantes.

Il convient, quand cela est possible, de chauffer encore plus fortement le lait que ne le fait la pasteurisation pour obtenir un lait stérilisé (absence totale de germes) : cela s'opère par traitement UHT (Ultra Haute Température). Le traitement UHT du lait correspond à un traitement thermique de 140°C durant 2 secondes. Pour les conserves, ne pouvant évidemment pas faire circuler des petits pois ou des carottes dans un échangeur à plaques, on procède à une stérilisation dans un autoclave à 134°C durant 18 min (et 2,05 bars).

La stérilisation ou la pasteurisation induisent donc des dépenses énergétiques. Les dépenses énergétiques en laiterie ont été évaluées en moyenne de 0,25 à 2,65 GJ / 1 000 kg de lait⁴⁰ (traité pour l'essentiel par des procédés thermiques). Si la dépense d'énergie à l'usine est rapportée à la valeur nutritionnelle du lait (en apport d'énergie pour le corps), on obtient **les chiffres ahurissants de 92 à 368 Joules d'énergie dépensée en chauffage (pour raison sanitaire mais aussi technologique) par Joule nutritionnel** ! Quelles dépenses au regard des défis d'approvisionnement en énergie (« peak oil »⁴¹ et réserves estimées de 50 à 250 ans selon les formes d'énergie et les prévisionnistes) et des conséquences discutées sur le climat...

5. Comprendre les processus de destruction bactérienne pour de nouveaux procédés sobres et sûrs

Il semble que l'on puisse attribuer à la chaleur différents mécanismes possibles d'inactivation bactérienne : dénaturation des enzymes qui catalysent les réactions dans les cellules, dénaturation de l'ADN, oxydation (stress oxydatif) et peut-être altération de la membrane des cellules (rupture, intégrité de la membrane, modification de la perméabilité).

L'élévation de température (et parfois son abaissement sous 0°C) provoque la dénaturation des protéines, si l'on préfère, la perte de leur conformation. La structure de la protéine (enzyme) ayant été modifiée irréversiblement, l'enzyme perd son activité de catalyse. Quand un aliment est

⁴⁰ Stefan TOEPFL, Alexander MATHYS, Volker HEINZ, Dietrich KNORR, « Review : Potential of High Hydrostatic Pressure and Pulsed Electric Fields for Energy Efficient and Environmentally Friendly Food Processing », *Food Reviews International*, n 4, 2006, p. 405-423.

⁴¹ Le « peak oil » est le moment où la demande en pétrole dépasse l'offre, c'est-à-dire la capacité à fournir le pétrole que le monde demande.

chauffé, les protéines qui font fonctionner le microorganisme se dénaturent et la vie s'arrête. Chaque protéine possède sa valeur spécifique de température de thermo-dénaturation et certains enzymes sont particulièrement thermorésistants. Les scientifiques ont connaissance des bactéries thermophiles depuis 1922⁴², bactéries pouvant croître jusqu'à 70°C, mais la découverte de bactéries extrême-thermophiles en 1969, comme, par exemple, *Thermus aquaticus* isolée des sources d'eau chaude de Yellowstone (USA)⁴³, brise l'idée de Pasteur que les bactéries sont détruites au-delà de 80°C. Par la suite, les scientifiques vont découvrir des bactéries barophiles, isolées de fonds sous-marins à 5 700m en 1977⁴⁴ puis en 1978 à plus de 10 476 m de fond (1 000 bars de pression)⁴⁵. Mais les découvertes en 1997 de ces bactéries sous-marines à côté de cheminées hydrothermales, les fumeurs noirs, comme *Pyrolobus fumarii*⁴⁶, amena à entrevoir des formes de vie ultra-résistantes, au-delà de ce que l'homme pouvait imaginer comme limite de vie possible : on va nommer alors ces bactéries les *bactéries extrémophiles*. Elles sont variées et peuvent résister soit à des conditions très acides (pH<3) ou très basiques (pH>9), à de fortes pressions (P>50bars), à des températures importantes (t>70°C) ou très basses (t<10°C), et à une salinité élevée (150g/L)⁴⁷. Ce type de bactérie est très difficile à détruire car leurs protéines possèdent des conformations très solides qui ne se modifient qu'à très haute température⁴⁸. Ces bactéries possèdent en outre des systèmes de réparation d'ADN très sophistiqués. Pire, il existe des bactéries poly-extrémophiles, résistantes à la dessiccation, au froid, aux rayons UV ou ionisants, aux fortes acidités, comme *Deinococcus radiodurans*⁴⁹. Un défi à la stérilisation en cas de pathogénie ! Heureusement, cette bactérie ne semble pas présenter de danger pour l'homme⁵⁰.

La structure des protéines-enzymes peut certes être altérée par le chauffage mais on peut aussi les modifier sous haute pression, souvent au-delà de 2 000 bars (200 MPa : figure 2). La pression permet aussi de dénaturer l'ADN, d'induire la perte de la structure en double hélice et la formation de monobrin sans structure, donc sans capacité de contrôle de synthèse des enzymes. C'est ainsi que les Japonais ont été les premiers (à partir de 1990) à traiter des jus de fruit non plus par chauffage mais par haute-pression pour les stabiliser (« pasteuriser » par la pression en quelque sorte). La bouteille plastique du jus de fruit fraîchement pressé et embouteillé est placée dans une enceinte remplie d'eau et est soumise à 3-4°C à une pression de 2 000 à 6 000 bars durant 3 à

⁴² Lethé MORRISON, Fred TANNER, « Studies on thermophilic bacteria. I. Aerobic thermophilic bacteria from water », *Journal of Bacteriology*, n 3, 1922, p. 343-366.

⁴³ Thomas BROCK, Hudson FREEZE, « *Thermus aquaticus* gen. n. and sp. n., a Nonsporulating Extreme Thermophile », *Journal of Bacteriology*, n 1, 1969, p. 289-297.

⁴⁴ Aristides YAYANOS, Allan DIETZ, Rian VAN BOXTEL, « Isolation of a Deep-Sea Barophilic Bacterium and Some of Its Growth Characteristics », *Science*, n 4408, 1979, p. 808-810.

⁴⁵ Aristides YAYANOS, Allan DIETZ, Rian VAN BOXTEL, « Obligately barophilic bacterium from the Mariana Trench », *Proceedings of National Academy of Sciences USA*, n 8, 1981, p. 5212-5215.

⁴⁶ Elisabeth BLÖCHL, Reinhard RACHEL, Siegfried BURGGRAF et al., « *Pyrolobus fumarii*, gen. and sp. nov., represents a novel group of archaea, extending the upper temperature limit for life to 113 degrees C », *Extremophiles*, n 1, 1997, p. 14-21.

⁴⁷ Koki HORIKOSHI, « Discovering novel bacteria, with an eye to biotechnological applications », *Current Opinion in Biotechnology*, n 3, 1995, p. 292-297.

⁴⁸ Structure en empilement de feuillets β et d'hélices α - on parle de compactage $\beta\alpha\beta$ -, ponts disulfures formant des liaisons chimiques à l'intérieur de la structure protéique.

⁴⁹ Pascal JOSEPH, Stéphanie TEXIER, Jean-Paul LEONETTI, « *Deinococcus*, from polyextremophile to biotechnologies », *Biofutur*, n 310, 2010, p. 52.

⁵⁰ Kira MAKAROVA, Iyer ARAVIND, Yuri WOLF Yuri et al., « Genome of the extremely radiation-resistant bacterium *Deinococcus radiodurans* viewed from the perspective of comparative genomics », *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, n 1, 2001, p. 44-79.

4 minutes. Les avantages des procédés de haute-pression hydrostatique sont nombreux^{51,52,53} : préservation des vitamines, des arômes, de la couleur du fruit fraîchement pressé. Mais ils présentent certains inconvénients : les installations sont très chères et présentent des exigences sécuritaires importantes ; le procédé n'est pas toujours aussi efficace qu'un traitement thermique ; le procédé n'est pas applicable à tous les produits alimentaires. Ainsi, la micelle de caséine, la protéine majoritaire du lait, constituée en une structure supramoléculaire de forme sphéroïdale (en moyenne autour de 300 nm de diamètre, 0,3µm, soit environ 10 fois plus petite qu'une bactérie), « explose » sous des pressions de 200MPa souvent insuffisantes pour détruire aisément les bactéries dans le lait.

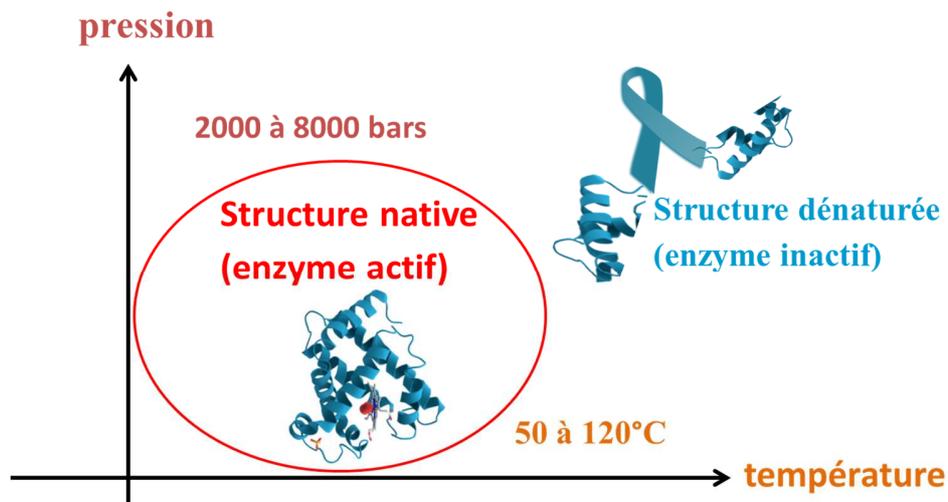


Figure 2 : Dénaturation protéique sous haute-pression ou par la chaleur

Légende : En changeant de forme, en perdant son organisation dans l'espace, l'enzyme perd sa capacité à catalyser les réactions chimiques qui s'opèrent dans la bactérie.

On peut ainsi comparer les mécanismes de destruction de microorganismes par chauffage à des mécanismes de destruction par d'autres procédés testés actuellement dans les laboratoires (tableau 1). Les champs électriques pulsés provoquent des ruptures membranaires⁵⁴ au même titre que les procédés haute-pression⁵⁵. Les ultraviolets, la lumière pulsée pourraient induire un stress

⁵¹ Angeliki POLYDERA, Nikolaos STOFOROS, Petros TAOUKIS, « Quality degradation kinetics of pasteurised and high pressure processed fresh Navel orange juice: Nutritional parameters and shelf life », *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, n 1, 2005, p. 1-9.

⁵² Kemal AGANOVIC, Tara GRAUWET, Binian KEBEDE et al., « Impact of different large scale pasteurisation technologies and refrigerated storage on the headspace fingerprint of tomato juice », *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, n 26, 2014, p. 431-444.

⁵³ Xuehong CHEN, Weidong QIN, Lihua MA et al., « Effect of high pressure processing and thermal treatment on physicochemical parameters, antioxidant activity and volatile compounds of green asparagus juice », *LWT - Food Science and Technology*, n 1, 2015, p. 927-933.

⁵⁴ Stefan TOEPFL, Alexander MATHYS, Volker HEINZ, Dietrich KNORR, *op. cit.*

⁵⁵ Hsiao-Wen HUANG, Hsiang-Mei LUNG, Binghui YANG et al., « Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. A Review », *Food Control*, n 1, 2004, p. 250-259.

oxydatif, c'est-à-dire un haut niveau de concentration de radicaux⁵⁶ dans la cellule (comme lors d'un traitement thermique) et « intoxiquer » la cellule. C'est alors la mort cellulaire.

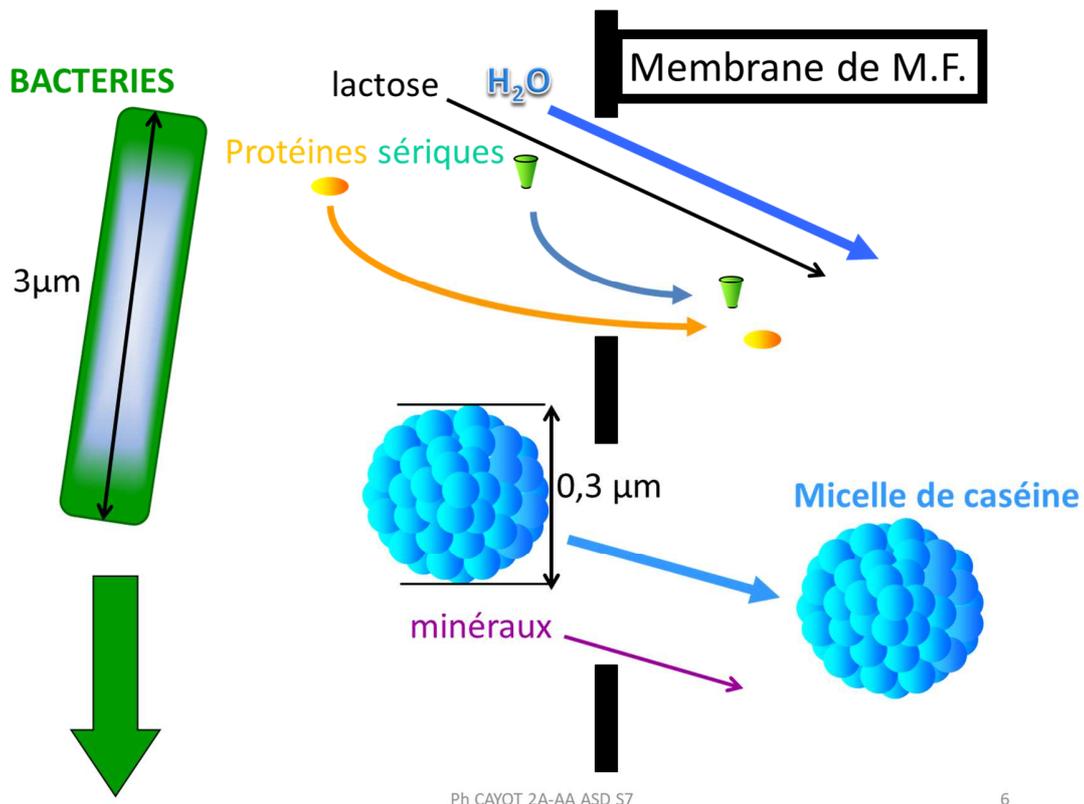
Mécanismes d'inactivation en jeu durant un chauffage	Autres procédés ou traitements possibles provoquant un de ces mécanismes
Dénaturation protéique	Solvants, acides, haute-pression hydrostatique,...
Dénaturation de l'ADN	Solvants, haute-pression hydrostatique, rayonnements ionisants...
Oxydation (stress oxydatif)	Chimique (H ₂ O ₂ , Cl ⁻ , F ⁻ , Br ⁻ , I ⁻), ultraviolets, lumière pulsée,...
Altération de la membrane (modification de perméabilité ; rupture)	Tensioactifs, haute-pression hydrostatique, champs électriques pulsés...

Tableau 1 : Similitude d'actions entre les procédés par chauffage et les nouvelles technologies de destruction de microorganismes

On peut aussi épurer du lait par un procédé membranaire. En faisant traverser d'un lait au travers d'une membrane d'une porosité autour du μm , on retient d'un côté de la membrane les microorganismes (rétentat) quand tous les éléments qui constituent le lait passent au travers la membrane (perméat ; figure 3). Ce procédé s'appelle la microfiltration « stérilisante » (bien que l'on ne puisse pas considérer qu'il s'agisse de stérilisation) et ce procédé permet de passer d'un lait au départ à $2 \cdot 10^4$ (soit 20 000) microorganismes par ml à 10, ce qui revient pratiquement à la même efficacité qu'une pasteurisation⁵⁷.

⁵⁶ Les radicaux sont des espèces chimiques qui possèdent un électron célibataire (quand toute molécule « normale » ou ion possède une paire d'électrons) : du fait du « déséquilibre électronique » de la couche périphérique des atomes, cela rend le radical très réactif (recherchant en quelque sorte un autre électron pour s'apparier). Ces radicaux, que l'on note R° (le rond en exposant désignant l'électron célibataire), attaquent les enzymes et même l'ADN des cellules, modifiant la structure chimique.

⁵⁷ Luciana SABOYAINSTA, Jean-Louis MAUBOIS, « Current developments of microfiltration technology in the dairy industry. A Review », *Le Lait*, n 6, 2010, p. 541–553.



Ph CAYOT 2A-AA ASD S7

6

Figure 3 : Principe de l'épuration microbienne du lait par microfiltration

Légende : Le lait circule en parallèle d'une membrane (céramique ou polymère) percée d'orifices dont la taille permet le passage de tous les éléments du lait, y compris la micelle de caséine (protéine majoritaire du lait et plus grosse structure des éléments du lait : les protéines sériques font de 3 à 5 nm, le lactose 0,8 nm, les minéraux 0,4 nm et l'eau 0,3 nm, la caséine est une structure supramoléculaire de 300 nm de diamètre (0,3 μm) en moyenne, soit approximativement 10 fois plus petite qu'une bactérie..) mais pas des bactéries dont les tailles dépassent le diamètre des orifices de la membrane de microfiltration (M.F.)

6. Ces procédés sont-ils réellement moins énergivores ?

Par un calcul un peu rapide, il est aisé de conclure que les procédés de pasteurisation par la chaleur sont les plus coûteux : 1 GJ/t de lait traité. C'est 0,1 GJ/t de lait avec les procédés PEF (pulsed electric field), 0,05 GJ/t de lait pour les procédés haute-pression hydrostatique et 0,01 GJ/t pour la microfiltration stérilisante en comptant très large^{58, 59}. Pour l'ultrafiltration, on trouve des valeurs

⁵⁸ Volker HEINZ, Stefan TOEPFL, Dietrich KNORR, « Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric fields treatment », *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, n 2, 2003, p. 167-175.

⁵⁹ Ricardo PEREIRA, Antonio VICENTE, « Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing », *Food Research International*, n 7, 2010, p. 1936-1943.

de 3 à 9 kW/kg de protéines qui sont passées au travers de la membrane⁶⁰ soit approximativement de 100 à 300 kW par tonne de lait traitée, soit (watt = joule par seconde) très approximativement 0,36 à 1 MJ/t de lait traité pour une heure de filtration, sans compter le nettoyage des membranes. L'épuration du lait par microfiltration semble de loin la plus performante, mais encore faut-il y ajouter le coût du nettoyage des membranes (immobilisation de l'appareil hors production, coût en détergent,...) et le changement des membranes (toutes les 125 opérations de filtration). Les autres procédés ne sont en réalité guère plus performants si l'on y ajoute l'énergie grise (énergie pour fabriquer les appareils) et le vrai coût de l'énergie. Dans un procédé thermique, la production de chaleur se fait par l'utilisation d'une énergie primaire (gaz, ou combustible pétrolier) avec des rendements très optimisés. Avec l'électricité, il faut multiplier les valeurs d'énergie consommée par 2,6 en raison des pertes lors du transport de l'électricité (5% environ) auquel il faut ajouter le rendement de 35 à 45 % (conversion d'énergie ; donnée EDF ; 31,4% selon d'autres sources) en sortie de centrale électrique. Il semble bien donc que ces nouveaux procédés à champs électrique pulsé ou à haute pression hydrostatique présentent de vraies perspectives de sobriété énergétique pour la stérilisation des aliments. Reste à prouver que leur efficacité stérilisante équivaut à un procédé thermique, ce que les chercheurs font actuellement.

La sobriété pourrait cependant être contrainte par l'apparition de résistances bactériennes. Ces résistances proviennent de différents phénomènes : adaptation à la température (résistance accrue des spores)⁶¹, effet de la formulation des aliments. Ainsi, par exemple, l'impact de la présence de polyphosphates dans un jambon modifie la valeur de réduction décimale (tableau n°2)⁶². Ces polyphosphates servent à obtenir un jambon (premier choix, 1^{er} prix si vous préférez) dont les capacités de rétention d'eau sont plus fortes et la tenue à la découpe meilleure. Des observations similaires ont été faites avec la présence ou l'absence d'oméga 3 (dont on enrichit les aliments pour des raisons nutritionnelles). Les bactéries utilisent ses constituants pour acquérir de la résistance. N'oublions pas non plus l'usage des antibiotiques... La résistance de certaines souches relance le défi de la stérilisation.

T°C	Sans polyphosphate	Avec polyphosphate
60	27,6	45,4
64	14,6	25,3
70	7,2	11,7

Tableau 2 : Valeur D (min) pour *Enterococcus faecalis* dans un broyat de jambon, avec ou sans polyphosphates ajoutés : la résistance s'accroît en présence de polyphosphates

Le coût énergétique de la pasteurisation ou de la stérilisation du lait n'est, de fait, pas négligeable dans le coût total sortie usine. Entre 2005 et 2009, pour un litre de lait demi-écrémé UHT, le prix final (de 0,6 à 0,7€ le litre) est dû à 34,1% à 52,1% au coût de transformation industrielle. Pour les yaourts, la part revenant à l'industrie dans le prix final d'un yaourt nature est entre 41,9 et 46,7%, la production du lait ne représentant plus que 12 à 16,3% du prix (la distribution de 33,5 à 40,1%

⁶⁰ Antti HEINO, *Microfiltration in cheese and whey processing*, Academic dissertation of University of Helsinki, 2010, p. 65.

⁶¹ Graham Warwick GOULD, André HURST (dir.), *The bacterial spore*, London and New York, Academic Press, 1969.

⁶² FÉRY et al., 1995, cité par Jean-Luc MARTIN, « Revisiter l'efficacité de l'inactivation des microorganismes par le traitement thermique », *Bulletin de Liaison du CTSCCV*, n 4, 2002, p. 17.

(figure n°4)⁶³. En 2012, le prix moyen d'un yaourt est de 1,53€ HTVA, avec 0,29€ de matière première agricole (lait brut), 0,92€ de marge brute industrielle (transport, réfrigération, traitement thermique 90°C – 4 min, ensemencement en ferments, fermentation 4h à 42°C, réfrigération) et 0,32€ de marge brute pour la distribution (transport, stockage en linéaire réfrigéré)⁶⁴.

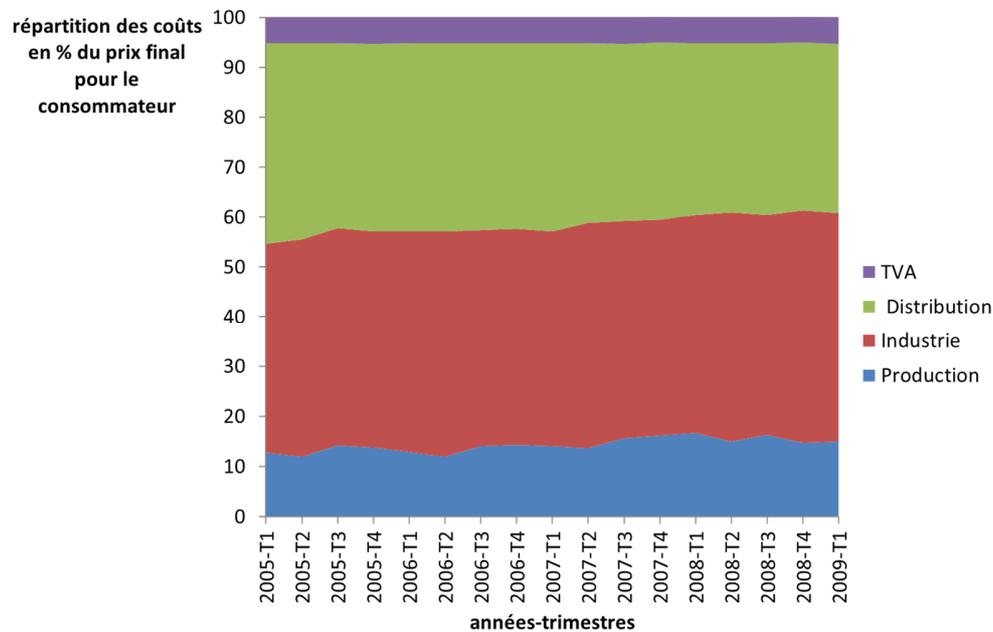


Figure 4 : Part dans le prix d'un yaourt nature au détail payé par le consommateur entre le secteur de production laitière, de l'industrie de transformation du lait, de la distribution (GMS) et de la TVA (FranceAgriMer, 2009)

On remarquera que n'apparaît pas le coût de dépenses du consommateur (transport mais aussi réfrigération !) dans ces chiffres de FranceAgriMer. La composante industrielle dans le coût final est importante mais les coûts énergétiques totaux sont importants. La pasteurisation prolongée du lait pour la fabrication des yaourts est nécessaire pour « greffer » à la surface des micelles de caséine (structure protéique majeure du lait responsable de la gélification du lait par acidification-fermentation – figure 5 - et par emprésurage) des protéines sériques : cela permet de « récupérer » toutes les protéines du lait dans le yaourt, d'économiser des micelles de caséine et d'accroître la fermeté des yaourts. Ce chauffage avant ensemencement pèse dans le prix final du yaourt !

⁶³ Observatoire des prix et des marges. *Filière laitière*, [En ligne], http://www.draaf.auvergne.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Lait_observ_prix_et_marges_cle0b211d.pdf (page consultée le 1^{er} août 2015).

⁶⁴ Observatoire de la formation des prix et des marges des produits alimentaires, *Rapport au parlement. Prix et coûts dans l'agroalimentaire. Nouvelles études : comptes des rayons en GMS, « l'euro alimentaire »*, Paris, ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, ministère de l'Économie et des finances, FranceAgriMer, 2012, p. 10.

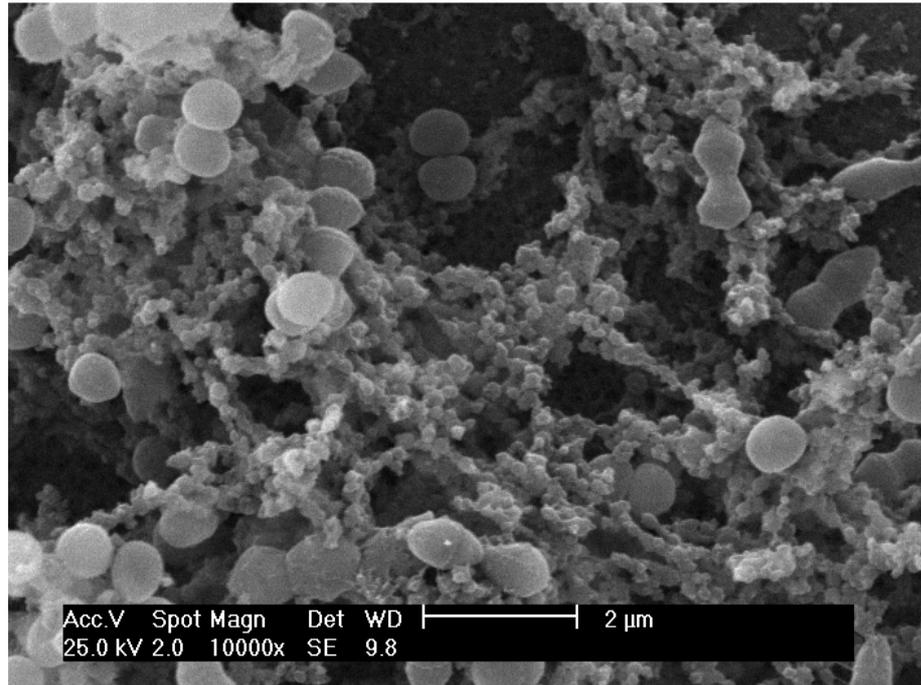


Figure 5 : Microscopie électronique d'un yaourt.

Les petites « billes » associées en grappes sont les micelles de caséines (protéines majeures du lait, structurées en un édifice supramoléculaire de forme sphéroïdale), les grosses billes sont des *Streptococcus thermophilus* (microscopie G. Houzé)⁶⁵. Les micelles de caséine ainsi associées forment un réseau tridimensionnel qui emprisonne l'eau dans des poches et permet la formation d'un gel (le yaourt).

L'ADEME a calculé ce que représentait la dépense énergétique dans le total des dépenses d'une laiterie qui produit du lait UHT et des fromages (trois Appellations d'Origine Protégée - AOP) : la dépense énergétique est le 3^e poste de dépense en 2013 (alors qu'il était le 5^e en 2010...) ⁶⁶. Même si, en ce mois de mai 2015, le prix du baril de pétrole et, donc, du gaz est bas, le coût énergétique va à nouveau s'accroître⁶⁷. Dans la production de lait UHT ou de yaourt, c'est bien le traitement thermique qui est le plus énergivore, soit environ 50% de l'énergie consommée (tableau n°3).

⁶⁵ Guillaume HOUZÉ, *Étude des propriétés rhéologiques et de la texture des yaourts : influence des particules incorporées à la matrice : cas des globules gras, bactéries et agrégats protéiques*, Thèse de doctorat en science des aliments, Université de Bourgogne, 2006.

⁶⁶ CCOP de France ADEME, *Utiliser la biomasse pour la production de chaleur dans les coopératives. Étude du potentiel de substitution d'énergie fossile dans les procédés de stockage et transformation agro-industriels, réalisée par COOP de France pour ses adhérents. Extrait : Note d'opportunité sur un site de coopérative dans le secteur du lait (laiterie – fromagerie)*, Paris, Ademe, 2012, [En ligne], <http://www.ademe.fr/utiliser-biomasse-production-chaleur-cooperatives> (page consultée le 1^{er} août 2015).

⁶⁷ Les exploitations de gaz de schiste aux USA ne sont plus rentables.

Stade de production	Consommation d'énergie (Wh/l de lait traité)
Réception –stockage à 4°C	5
Séparation phase aqueuse - crème	5
« Pasteurisation » + homogénéisation (Chauffage 90°C/4min et UHT)	52,6
remplissage	10
refroidissement	2,1
Nettoyage en place (par circulation dans les circuits)	30
Climatisation-Ventilation-Chauffage	5
Autres	8,6
TOTAL	118,3

Tableau 3 : Consommation par stade de production dans un ensemble de 17 usines participantes représentant plus de 50 p. 100 de la production canadienne et produisant du lait UHT, des yaourts, de la crème et du lait pasteurisé, selon Office de l'Efficacité Energétique du Canada⁶⁸. Le mot « pasteurisation » se comprend ici dans un sens large.

Conclusion

Comme nous l'avons vu, la pasteurisation conçue par Louis Pasteur et son collaborateur Émile Duclaux et ses applications dérivées sont des procédés très énergivores. La pasteurisation telle qu'elle se pratique actuellement en usine n'est sans doute pas durable. Certains cherchent à optimiser les barèmes de pasteurisation en prenant en compte l'histoire thermique et la composition de l'aliment⁶⁹ pour plus de sécurité, beaucoup moins pour ajuster au plus économe la dépense d'énergie. L'avenir exige sans doute aussi de trouver des solutions de pasteurisation « froide », plus sobre en énergie que le chauffage, mais les nouvelles résistances de microorganismes compliquent la tâche. Il faut non seulement continuer de comprendre les mécanismes qui conduisent à la destruction des bactéries mais aussi identifier les mécanismes de résistances pour maintenir le niveau d'hygiène qui est le nôtre en Industries Agro-Alimentaires actuellement. C'est par la compréhension de la biologie (réparation de l'ADN), de la chimie (mécanismes d'oxydation), de physicochimie (dénaturation protéique) que pourront être imaginés de nouveaux procédés (physiques, mécaniques), c'est-à-dire par la rencontre des champs disciplinaires. L'étude des mécanismes de résistances des bactéries extrêmophiles, *a priori* plutôt théorique, peut fournir des informations fort utiles à des applications de stérilisation froide. Le scientifique et l'économique sont, de fait, indissociables.

⁶⁸ Office de l'efficacité énergétique, *Rapport indicateur de rendement énergétique : usines produisant du lait de consommation, préparé pour le Conseil national de l'industrie laitière du Canada*, Ottawa, 2001.

⁶⁹ Stéphane GAILLARD, *Modélisation de la thermorésistance, de la viabilité et du comportement à la recroissance de Bacillus cereus, en fonction de la température, du pH et de l'activité aqueuse*, Thèse de doctorat en microbiologie, Université de Bretagne occidentale, 2003.