

UNIVERSITE TOULOUSE III PAUL SABATIER
FACULTE DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES

ANNEE : **2021**

THESES 2021 TOU3 2099

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

Présentée et soutenue publiquement
par

DURIER ADELINE

Utilisation des hautes pressions hydrostatiques dans la
maîtrise du risque microbiologique en agroalimentaire et
applications dans le domaine de la santé, un état des
lieux

Date de soutenance
16 Décembre 2021

Directeur de thèse : Bergé Mathieu

★ **JURY**

Président : Chapuy-Regaud, Sabine
1er assesseur : Mathieu, Florence
2ème assesseur : Bergé, Mathieu

PERSONNEL ENSEIGNANT
de la Faculté des Sciences Pharmaceutiques de l'Université Paul Sabatier
au 1er octobre 2020

Professeurs Emérites

Mme BARRE A.	Biologie Cellulaire
M. BENOIST H.	Immunologie
M. BERNADOU J.	Chimie Thérapeutique
M. CAMPISTRON G.	Physiologie
M. GAIRIN J.E.	Pharmacologie
Mme NEPVEU F.	Chimie analytique
M. ROUGE P.	Biologie Cellulaire
M. SALLES B.	Toxicologie

Professeurs des Universités

Hospitalo-Universitaires		Universitaires	
Mme AYYOUB M.	Immunologie	Mme BERNARDES-GÉNISSON V.	Chimie thérapeutique
M. CESTAC P.	Pharmacie Clinique	Mme BOUTET E.	Toxicologie - Sémiologie
M. CHATELUT E.	Pharmacologie	Mme COUDERC B.	Biochimie
Mme DE MAS MANSAT V.	Hématologie	M. CUSSAC D. (Vice-Doyen)	Physiologie
M. FAVRE G.	Biochimie	M. FABRE N.	Pharmacognosie
Mme GANDIA P.	Pharmacologie	Mme GIROD-FULLANA S.	Pharmacie Galénique
M. PARINI A.	Physiologie	M. GUIARD B.	Pharmacologie
M. PASQUIER C. (Doyen)	Bactériologie - Virologie	M. LETISSE F.	Chimie pharmaceutique
Mme ROQUES C.	Bactériologie - Virologie	Mme MULLER-STAUTMONT C.	Toxicologie - Sémiologie
Mme ROUSSIN A.	Pharmacologie	Mme REYBIER-VUATTOUX K.	Chimie analytique
Mme SALLERIN B.	Pharmacie Clinique	M. SEGUI B.	Biologie Cellulaire
M. VALENTIN A.	Parasitologie	Mme SIXOU S.	Biochimie
		M. SOUCHARD J-P.	Chimie analytique
		Mme TABOULET F.	Droit Pharmaceutique
		M. VERHAEGHE P.	Chimie Thérapeutique

Maîtres de Conférences des Universités

Hospitalo-Universitaires		Universitaires	
M. DELCOURT N.	Biochimie	Mme ARELLANO C. (*)	Chimie Thérapeutique
Mme JUILLARD-CONDAT B.	Droit Pharmaceutique	Mme AUTHIER H.	Parasitologie
M. PUISSET F.	Pharmacie Clinique	M. BERGE M. (*)	Bactériologie - Virologie
Mme ROUCH L.	Pharmacie Clinique	Mme BON C. (*)	Biophysique
Mme ROUZAUD-LABORDE C.	Pharmacie Clinique	M. BOUJILA J. (*)	Chimie analytique
Mme SERONIE-VIVIEN S. (*)	Biochimie	M. BROUILLET F.	Pharmacie Galénique
Mme THOMAS F. (*)	Pharmacologie	Mme CABOU C.	Physiologie
		Mme CAZALBOU S. (*)	Pharmacie Galénique
		Mme CHAPUY-REGAUD S.	Bactériologie - Virologie
		Mme COLACIOS C.	Immunologie
		Mme COSTE A. (*)	Parasitologie
		Mme DERAEEVE C. (*)	Chimie Thérapeutique
		Mme ECHINARD-DOUIN V.	Physiologie
		Mme EL GARAH F.	Chimie Pharmaceutique
		Mme EL HAGE S.	Chimie Pharmaceutique
		Mme FALLONE F.	Toxicologie
		Mme FERNANDEZ-VIDAL A.	Toxicologie
		Mme GADEA A.	Pharmacognosie
		Mme HALOVA-LAJOIE B.	Chimie Pharmaceutique
		Mme JOUANJUS E.	Pharmacologie
		Mme LAJOIE-MAZENC I.	Biochimie
		Mme LEFEVRE L.	Physiologie
		Mme LE LAMER A-C.	Pharmacognosie
		M. LE NAOUR A.	Toxicologie
		M. LEMARIE A.	Biochimie
		M. MARTI G.	Pharmacognosie
		Mme MONFERRAN S.	Biochimie
		M. SAINTE-MARIE Y.	Physiologie
		M. STIGLIANI J-L.	Chimie Pharmaceutique
		M. SUDOR J. (*)	Chimie Analytique
		Mme TERRISSE A-D.	Hématologie
		Mme TOURRETTE-DIALLO A. (*)	Pharmacie Galénique
		Mme VANSTEELANDT M.	Pharmacognosie
		Mme WHITE-KONING M. (*)	Mathématiques

(*) Titulaire de l'habilitation à diriger des recherches (HDR)

Enseignants non titulaires

Assistants Hospitalo-Universitaires		Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)	
Mme LARGEAUD L.	Immunologie	M. François-Xavier TOUBLET	Chimie Thérapeutique
M. LE LOUEDEC F.	Pharmacologie		
M. MOUMENI A.	Biochimie		
M. PAGES A.	Pharmacie Clinique		
Mme SALABERT A.S	Biophysique		
Mme TRIBAUDEAU L.	Droit Pharmaceutique		

★ REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en tout premier lieu M. Mathieu Bergé, mon directeur de thèse, pour ses précieux conseils qui m'ont permis d'orienter et de structurer mes recherches, ainsi que pour le temps passé à la correction de ma thèse.

Je remercie particulièrement Mme. Chapuy-Regaud d'être la directrice de mon jury d'examen.

Je remercie également Mme. Florence Mathieu d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je remercie Mme. Nathalie Panier de m'avoir permis de travailler sur le projet Shpore, qui m'a initié aux hautes pressions et m'a permis d'utiliser les ressources du CTCPA lors de mes recherches bibliographiques.

Je tiens à remercier M. Gavard pour toutes nos discussions et ses conseils qui m'ont accompagné tout au long de ma dernière année.

Mes derniers remerciements vont à ma famille et mes amis pour leur soutien.

I.	CONTEXTE	10
II.	LES HAUTES PRESSIONS HYDROSTATIQUES	12
1.	INTRODUCTION :.....	12
1.1.	<i>Les débuts de la pascalisation.....</i>	<i>12</i>
1.2.	<i>Valeurs de pression.....</i>	<i>12</i>
1.3.	<i>Utilisation des HP dans l'agroalimentaire</i>	<i>12</i>
2.	LES APPAREILS HP :.....	14
2.1.	<i>Fonctionnement.....</i>	<i>14</i>
2.2.	<i>Mode de production discontinue</i>	<i>16</i>
2.3.	<i>Remplissage</i>	<i>17</i>
3.	LA PREPARATION DES PRODUITS :.....	17
3.1.	<i>Choix limité de l'emballage</i>	<i>17</i>
3.2.	<i>Conditionnement des aliments</i>	<i>18</i>
3.3.	<i>Pré-traitement de l'emballage</i>	<i>18</i>
3.4.	<i>Impact du traitement sur l'emballage</i>	<i>18</i>
3.5.	<i>Réduit l'utilisation d'agents nettoyant</i>	<i>19</i>
4.	LES COUTS DE LA TECHNOLOGIE HP :.....	20
4.1.	<i>Investissement initial.....</i>	<i>20</i>
4.2.	<i>Coûts de fonctionnement.....</i>	<i>20</i>
4.3.	<i>Coût total</i>	<i>22</i>
5.	LES DESAVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE HP :	22
5.1.	<i>Sur les produits fragiles</i>	<i>22</i>
5.2.	<i>La stérilisation par les HP</i>	<i>23</i>
5.3.	<i>Vérification de l'efficacité du traitement.....</i>	<i>24</i>
5.4.	<i>Lorsque l'avantage des HP devient un inconvénient.....</i>	<i>24</i>
6.	LES PARTICULARITES DES PRODUITS LIQUIDES TRAITES EN VRAC :	24
III.	EFFETS DE LA PRESSION SUR LES CONSTITUANTS DE LA MATIERE VIVANTE	26
1.	MODIFICATION DES LIAISONS INTRAMOLECULAIRES ET INTERMOLECULAIRES :.....	27
1.1.	<i>Les liaisons covalentes.....</i>	<i>27</i>
1.2.	<i>Les liaisons non covalentes.....</i>	<i>28</i>
1.2.1.	<i>Les liaisons hydrophobes.....</i>	<i>28</i>
1.2.2.	<i>Les liaisons hydrogènes.....</i>	<i>28</i>
1.2.3.	<i>Les interactions électrostatiques.....</i>	<i>28</i>
1.3.	<i>Etat d'ionisation.....</i>	<i>29</i>
1.4.	<i>Hydratation et déshydratation.....</i>	<i>29</i>
1.5.	<i>Prédiction de l'effet des HP.....</i>	<i>30</i>
2.	EFFETS DES HP SUR LES PROTEINES :.....	30
2.1.	<i>Les protéines oligomériques.....</i>	<i>31</i>
2.2.	<i>La dénaturation des protéines par la pression.....</i>	<i>31</i>

2.3.	<i>Etat partiellement déplié.....</i>	32
2.4.	<i>Volume occupé par une protéine dénaturée.....</i>	32
2.5.	<i>Compressibilité des protéines dénaturées par la pression.....</i>	33
3.	MODIFICATION DE L'ACTIVITE ENZYMATIQUE :	33
3.1.	<i>Principes thermodynamiques.....</i>	34
3.2.	<i>Déplacement de l'équilibre chimique de réaction.....</i>	34
3.3.	<i>Exemples de réactions.....</i>	35
3.4.	<i>Inactivation des enzymes.....</i>	35
3.5.	<i>Cas particulier de la réaction de Maillard.....</i>	36
4.	INFLUENCE DU MILIEU SUR L'EFFICACITE DES HP :	36
4.1.	<i>Le pH.....</i>	36
4.2.	<i>Le type de solvant.....</i>	37
4.3.	<i>L'activité de l'eau (Aw) et types de solutés.....</i>	38
4.4.	<i>Les sels.....</i>	39
4.5.	<i>Les antimicrobiens.....</i>	39
4.6.	<i>La technologie Hurdle.....</i>	39
5.	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR L'EFFICACITE DES HP :	40
5.1.	<i>Impact de la température.....</i>	41
5.2.	<i>Cas particulier des bactéries sporulées acidophiles.....</i>	41
5.3.	<i>Augmentation de la température due à la pression.....</i>	42
5.4.	<i>Stérilisation par les HP associées à la chaleur.....</i>	42
5.5.	<i>Stabilité des protéines selon la température et la pression.....</i>	43
IV.	UTILISATION DES HP POUR DETRUIRE LES CELLULES VIVANTES	44
1.	EFFETS CELLULAIRES D'UN TRAITEMENT HP :	44
1.1.	<i>Modification des membranes cellulaires.....</i>	45
1.2.	<i>Modification de morphologie.....</i>	46
1.3.	<i>Modification des organites.....</i>	46
1.4.	<i>Modification de la croissance.....</i>	46
1.5.	<i>Modification de l'expression des gènes.....</i>	47
2.	EFFICACITE CONTRE LES CELLULES EUCARYOTES :	47
	<i>Les cellules eucaryotes peuvent être inactivées en suivant deux voies principales.....</i>	47
2.1.	<i>Destruction (ex vivo) des cellules cancéreuses.....</i>	47
3.	INACTIVATION DES MICRO-ORGANISMES :	48
3.1.	<i>Sensibilité des microorganismes en règle générale.....</i>	48
4.	EFFICACITE CONTRE LES BACTERIES :	48
4.1.	<i>Les bactéries barophiles.....</i>	49
4.2.	<i>Les spores bactériennes.....</i>	49
4.3.	<i>Résistances accrues de certaines souches non sporulées.....</i>	50
5.	EFFICACITE CONTRE LES VIRUS :	50
5.1.	<i>Les protéines du manteau viral et de l'enveloppe.....</i>	50

5.2.	<i>Suppression de l'inféctivité.....</i>	51
6.	EFFICACITE CONTRE LES AUTRES AGENTS PATHOGENES :	52
6.1.	<i>Plaques amyloides.....</i>	52
V.	TRAITEMENT HP DES PRODUITS ALIMENTAIRES.....	52
1.	LES PRODUITS DERIVES DES FRUITS ET DES LEGUMES :	53
1.1.	<i>Historique</i>	53
1.2.	<i>La flore contaminante.....</i>	54
1.3.	<i>Les traitements HP.....</i>	54
1.4.	<i>Les produits peu acides et issus de légumes : exemple du jus de carotte</i>	55
1.5.	<i>L'apparence.....</i>	55
2.	LES PRODUITS DE LA PECHE :	58
2.1.	<i>Les huîtres.....</i>	58
2.2.	<i>Décorticage des coquillages et des crustacés.....</i>	59
2.3.	<i>Les traitements HP.....</i>	59
3.	LES PRODUITS CARNES :	60
3.1.	<i>Les traitements HP.....</i>	60
3.2.	<i>Changement de couleur.....</i>	60
3.3.	<i>Texture.....</i>	61
3.4.	<i>Les produits pré-emballés</i>	61
4.	L'ALCOOL :	62
4.1.	<i>La bière.....</i>	62
4.2.	<i>Le vin.....</i>	62
5.	LES AVANTAGES DES PRODUITS ALIMENTAIRES TRAITES PAR LES HP :	63
5.1.	<i>La flaveur.....</i>	64
5.2.	<i>La conservation</i>	64
5.3.	<i>La valeur nutritive.....</i>	65
5.4.	<i>Les aliments santé.....</i>	65
VI.	AUTRES DOMAINES D'APPLICATION DES HP.....	66
1.	BIOLOGIE CELLULAIRE :	66
1.1.	<i>Synthèse de cartilage hyalin.....</i>	66
1.2.	<i>La greffe de peau.....</i>	67
1.3.	<i>Ingénierie agronome.....</i>	68
2.	LE TRAITEMENT DU PLASMA :	68
2.1.	<i>Les enjeux.....</i>	68
2.2.	<i>Outils de réduction de la charge microbienne du plasma.....</i>	69
2.3.	<i>Efficacité sur les bactéries.....</i>	69
2.4.	<i>Les facteurs de la coagulation.....</i>	72
2.5.	<i>Efficacité sur les virus.....</i>	74
2.6.	<i>Congélation du plasma.....</i>	76
3.	FERMENTATION MICROBIENNE EN BIOREACTEUR :	76

3.1.	<i>Amélioration de la résistance des m.o.....</i>	76
3.2.	<i>Augmentation de la vitesse de réaction.....</i>	77
3.3.	<i>Modification des rendements de réaction.....</i>	77
3.4.	<i>Enzyme engineering.....</i>	78
4.	MODIFICATION DES MACROMOLECULES :	78
4.1.	<i>Dissociation des agrégats et des corps d'inclusion.....</i>	79
4.2.	<i>Gels protéiques et de polysaccharides.....</i>	79
4.3.	<i>Extraction assistée par les HP</i>	82
5.	IMMUNOLOGIE :	82
5.1.	<i>Vaccins contre les cellules cancéreuses.....</i>	83
5.2.	<i>Informations supplémentaires sur la structure des virus.....</i>	83
5.3.	<i>Immunoabsorption</i>	83
6.	LYSE ENZYMATIQUE ASSISTEE PAR LES HP :	84
6.1.	<i>Mise au jour de nouveaux sites d'hydrolyse.....</i>	84
6.2.	<i>Digestibilité et allergénicité.....</i>	84
7.	LA CONGELATION (ET LA DECONGELATION) SOUS HP :	85
7.1.	<i>L'état de l'eau dépend de la pression (et de la température).....</i>	85
7.2.	<i>Congélation rapide.....</i>	86
7.3.	<i>Décongélation assistée par les HP.....</i>	87
7.4.	<i>Stockage à des températures inférieures à zéro.....</i>	87
8.	CADRE REGLEMENTAIRE DES DENREES ALIMENTAIRES TRAITEES PAR LES HP :	87
8.1.	<i>Règlement « novel food ».....</i>	87
8.2.	<i>Mise sur le marché.....</i>	88
8.3.	<i>Statut des aliments traités par les HP.....</i>	88
VII.	CONCLUSION	89
VIII.	BIBLIOGRAPHIE.....	91
IX.	SOURCES IMAGES.....	95
X.	ANNEXES	96

★ Table des illustrations

Figure 1 : Schématisation des pressions utilisées dans l'industrie agroalimentaire	13
Figure 2 : Répartition géographique des appareils HP et principales utilisation en agroalimentaire ...	14
Figure 3 : Schématisation d'un procédé de Hautes Pressions industriel (appareil horizontal)	15
<u>Tableau 1 : Cadence de production des appareils Hiperbaric</u>	<u>15</u>
<u>Tableau 2 : Répartition du coût en capital d'un système à hautes pressions</u>	<u>20</u>
<u>Tableau 3 : Exemples de coût de fonctionnement en comptabilisant l'amortissement sur 7 ans de l'investissement de l'appareil</u>	<u>21</u>
Figure 4 : Fonctionnement d'un appareil HP à traitement continu	25
Figure 5 : Représentation graphique de l'économie faite avec traitement HP continu par rapport à un traitement discontinu	26
Tableau 4 : Modifications de volume des principales interactions non covalentes	30
Tableau 5 : Chaleur de compression mesurée pour des aliments à 25°C avant mise sous pression ..	42
Figure 6 : Variation d'enthalpie libre (ΔG_d) de la dénaturation du chymotrypsinogène A en fonction de la température et de la pression	44
Figure 7 : Structure moléculaire de la pectine	56
Figure 8 : Effet d'un pré-traitement HP sur la structure de la paroi de tissu de carotte après un traitement thermique.....	56
Figure 9 : Déméthoxylation de la pectine	57
Figure 10 : Efficacité d'un traitement HP cyclique sur <i>E. coli</i>	70
Figure 11 : Efficacité d'un traitement HP cyclique sur <i>les bactéries testées</i>	71
Figure 12 : Effet d'un traitement HP cyclique sur l'activité des facteurs de coagulation plasmatique.	72
Figure 13 : Comparaison de l'effet d'un traitement HP cyclique sur l'activité des facteurs de coagulation plasmatique V et VIII.....	73
Tableau 6 : Particularités structurales des virus testés	74
Figure 14 : Efficacité d'un traitement HP cyclique sur <i>les virus testés</i>	75
Figure 15 : Représentation de la transition entre les formes solubles et polymérisées des principales protéines et polysaccharides	80
Tableau 7 : Variation de volume entre les formes solubles et polymérisées des principales protéines et polysaccharides	82
Figure 16 : Diagramme de phase de l'eau pure en fonction de la température et de la pression	86

★ Abréviations utilisées

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Aw : Activité de l'eau

CES : Comité d'expert spécialisés

DGCCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

dV : variation de volume

E. coli : *Escherichia coli*

HP : hautes pressions

HPP : Traitement par les hautes pressions hydrostatiques (= High pressure processing)

log = logarithme décimal ($\log_{10}$)

1M = 1 mole / litre

m.o. : Microorganisme(s)

MPa : Mégapascal (1 MPa = 10 bar)

PG : Polygalacturonase

PME : Pectine méthylestérase

TIA : Toxi-infection alimentaire

I. Contexte

Entre 2010 et 2019, le nombre de toxi-infections alimentaires collectives déclarées aux autorités compétentes (Agences régionales de santé et directions départementales de la protection des populations) est passé de 1 032 à 1 783.

En 2020, on a dénombré 1010 foyers de TIAC en France, 6814 personnes malades dont 396 ont été hospitalisées et 9 sont décédées.

Le nombre de TIAC déclarées a diminué de 43% par rapport à l'année 2019 à cause de la pandémie de SARS-CoV-2 qui a causé, entre autres, la fermeture des lieux de restauration et un confinement en France. On a observé une réduction de 61% des TIAC en restauration d'entreprise, probablement due au télétravail et une réduction de 49% pour la restauration commerciale et de 46% en milieu scolaire.

D'après les chiffres de santé publique France, les bactéries du genre *Salmonella*, sont la cause de 43% des TIAC pour lesquelles l'agent pathogène a été confirmé. Les bactéries des espèces *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens* et *Bacillus cereus* représentent quand à elles 74% des TIAC pour lesquelles l'agent a été suspecté.⁽¹⁾

Les aliments contaminés qui ont causés des TIAC en France sont les plats cuisinés et les produits carnés (viande, volaille, charcuteries) qui représentent plus de la moitié des aliments suspectés.

Lorsque l'agent pathogène est confirmé ou suspecté, les plats cuisinés et les produits carnés sont principalement contaminés par des *Staphylococcus aureus* (38% et 21%) et des *Bacillus cereus* (34% et 24%).

Les produits de la pêche (poissons, coquillages et crustacés) sont principalement contaminés par des virus (33%) et des *Staphylococcus aureus* (19%).

Les œufs et les ovoproduits sont majoritairement contaminés par des *Salmonella* (75%).

Les produits laitiers sont contaminés par des *Staphylococcus aureus* (33%), des *Salmonella* (27%) et des *Bacillus cereus* (24%).⁽¹⁾

Les espèces *Salmonella spp*, *Staphylococcus aureus* et *Bacillus cereus* sont donc celles qui font l'objet d'une surveillance accrue et pour lesquelles l'efficacité des HP est la plus testée, avec également *Listeria monocytogenes* et *Escherichia coli*.

L'élimination des pathogènes des denrées alimentaires est un enjeu majeur de santé publique et représente l'utilisation initiale et principale de la technologie des hautes pression (HP). Ces approches, alternatives aux techniques classiques (par exemple la pasteurisation thermique), permettent dans certains cas de mieux préserver l'intégrité physico-chimique de produits.

L'utilisation des HP en France pour assurer la pasteurisation de produits est relativement récente. On peut cependant compter sur l'avis des experts de l'ANSES, notamment sur l'expertise du comité d'experts spécialisés dans l'évaluation des risques biologiques dans les aliments (CES-BIORISK) et sur le groupe de travail chargé de l'évaluation des substances et procédés soumis à autorisation en alimentation humaine (ESPA) pour valider l'efficacité et l'innocuité des HP dans l'agroalimentaire.⁽²⁾

Je vais donc au travers de ce manuscrit faire l'état des lieux de l'utilisation des HP en France et en Europe, en soulignant les différentes méthodologies utilisées. J'aborderai également les avantages et les inconvénients des HP en fonction des contextes et des produits à stériliser. Ce document traitera pour une large part des applications de la stérilisation par HP des produits agroalimentaires. Je développerai dans un second temps les nouvelles applications des HP dans les domaines de la santé. Pour finir je ferai un point sur les aspects réglementaires qui régissent l'utilisation des HP en France.

II. Les Hautes Pressions Hydrostatiques

1. Introduction :

1.1. Les débuts de la pascalisation

Les recherches les plus anciennes réalisées sur les HP ont été réalisées par Hite en 1899 en Virginie occidentale. Il remarque que du lait traité à 450 MPa à température ambiante s'acidifie plus lentement et conclut qu'un traitement HP permet d'allonger la durée de conservation du lait.

De la même manière, il parvient à allonger la durée de conservation des fruits mais il rencontre des difficultés pour améliorer celle des légumes. Il justifie cette différence de résultat par le fait que les fruits sont dégradés par des levures et des bactéries lactiques, davantage sensibles aux HP, alors que les légumes sont dégradés par des espèces bactériennes capables de former des spores, beaucoup plus résistantes aux HP. ^(3,4)

1.2. Valeurs de pression

La pression maximale atteinte sur Terre est de 109 MPa, au fond du Challenger deep de la fosse des Mariannes dans l'océan Pacifique. On y retrouve divers microorganismes piézophiles adaptés pour survivre à des pressions de 100 MPa.

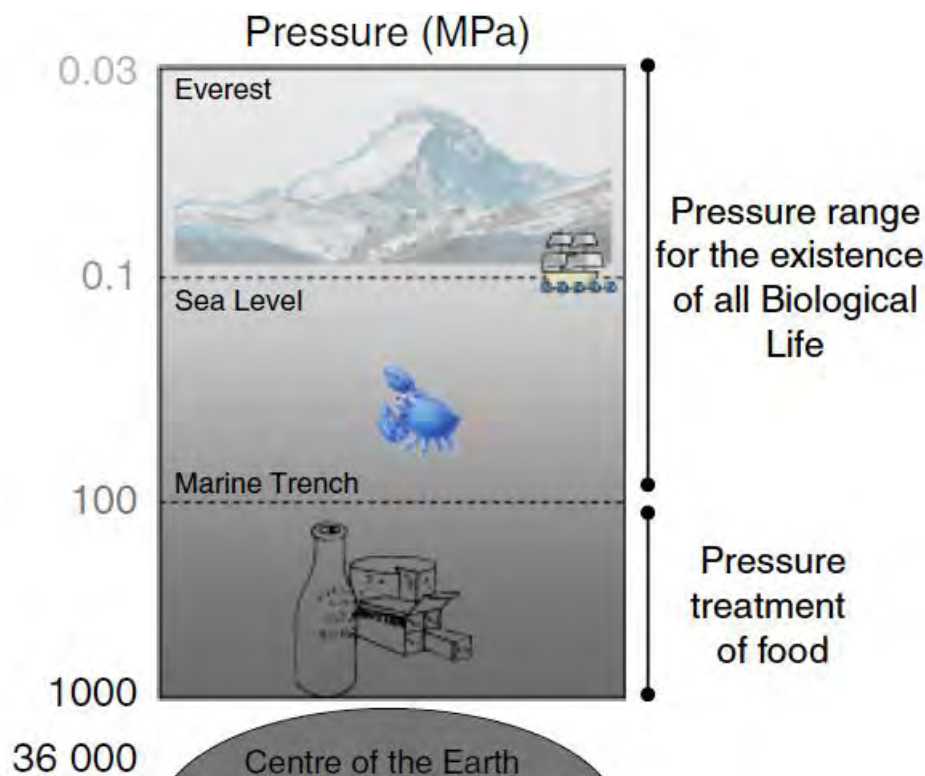
Le High Pressure Processing (ou HPP) est une méthode qui utilise des pressions très élevées pour éliminer les microorganismes. Ainsi dans l'industrie agroalimentaire, des pressions de 800 MPa sont utilisées en routine voir figure 1, mais les pressions les plus souvent utilisées sont comprises entre 200 et 600 MPa. ^(5,6)

Dans la suite de ce document, des pressions comprises entre 80 et 300 MPa seront considérées comme des HP modérées et des pressions comprises entre 300 et 600 MPa comme des HP élevées. ⁽⁷⁾

1.3. Utilisation des HP dans l'agroalimentaire

L'utilisation des HP dans la conservation des produits agroalimentaires est la plus commune. On appelle pasteurisation à froid le traitement des produits réalisé à température ambiante.

Figure 1 : Schématisation des pressions utilisées dans l'industrie agroalimentaire



Source : Considine KM, Kelly AL, Fitzgerald GF, et al (2008) High-pressure processing – effects on microbial food safety and food quality: High-pressure processing. *FEMS Microbiology Letters* 281:1–9

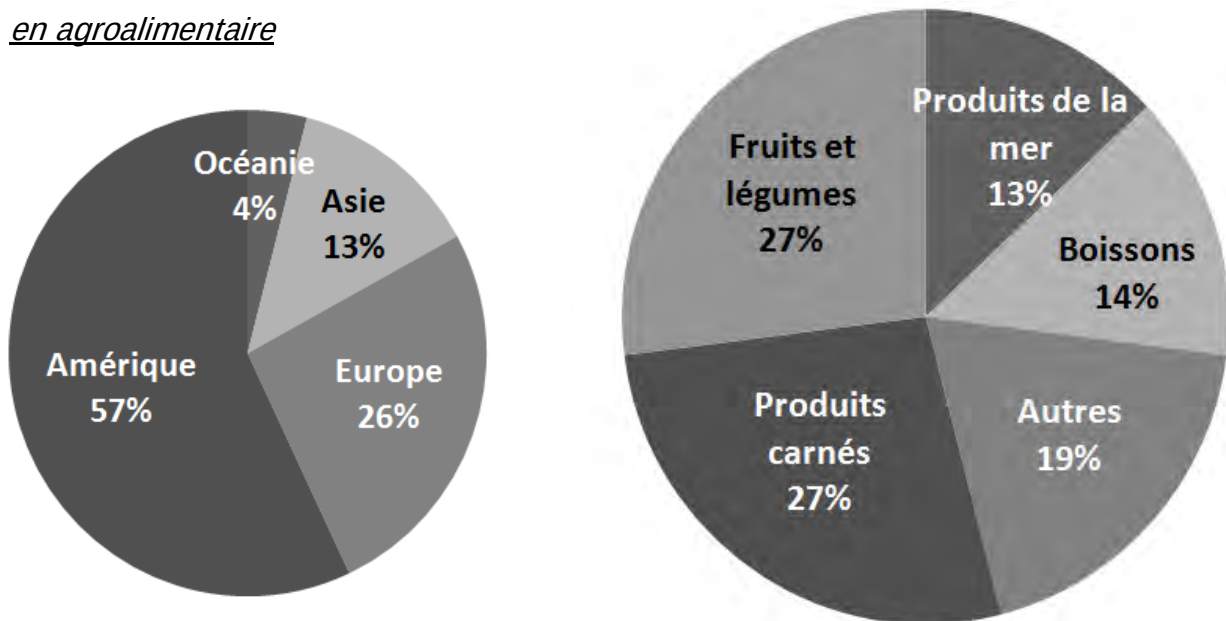
Depuis les années 1990, les HP sont utilisées par les industriels de l'agroalimentaire pour traiter les produits à base de fruits ou de légumes, les produits de charcuterie, les sauces et les produits de la pêche, voir figure 2. Le nombre de produits traités par les HP est en constante augmentation, particulièrement dans le secteur des jus de fruits.

La technologie HP est utilisée dans de nombreux pays dont les Etats-Unis, le Mexique, la Corée du sud, l'Espagne et le Japon. Elle représente plus de 10 milliards de dollars de chiffre d'affaires annuel.

L'augmentation du nombre d'appareils HP est exponentielle, en 2014 on comptait plus de 250 appareils HP de taille industrielle répartis dans plus de 200 entreprises dans le monde, la majorité se trouvant aux Etats-Unis (57% en 2016), traitant plus de 500 000 tonnes de produits alimentaires par an.

La forte augmentation du nombre d'unités HP aux Etats-Unis s'explique par l'autorisation par la FDA de la PATS (pressure-assisted thermal sterilization) en 2009.

Figure 2 : Répartition géographique des appareils HP et principales utilisation en agroalimentaire



Source : Sevenich R (2016) *High pressure processing at ambient and high temperatures and its influence on food processing contaminants, food borne diseases and bacterial spores in model- and real-food systems.*

2. Les appareils HP :

2.1. Fonctionnement

La quasi-totalité des appareils HP ont une configuration horizontale, voir figure 3. L'entrée et la sortie de produits se font par des portes différentes ce qui diminue le risque de mélange entre le produit traité et le produit non traité.

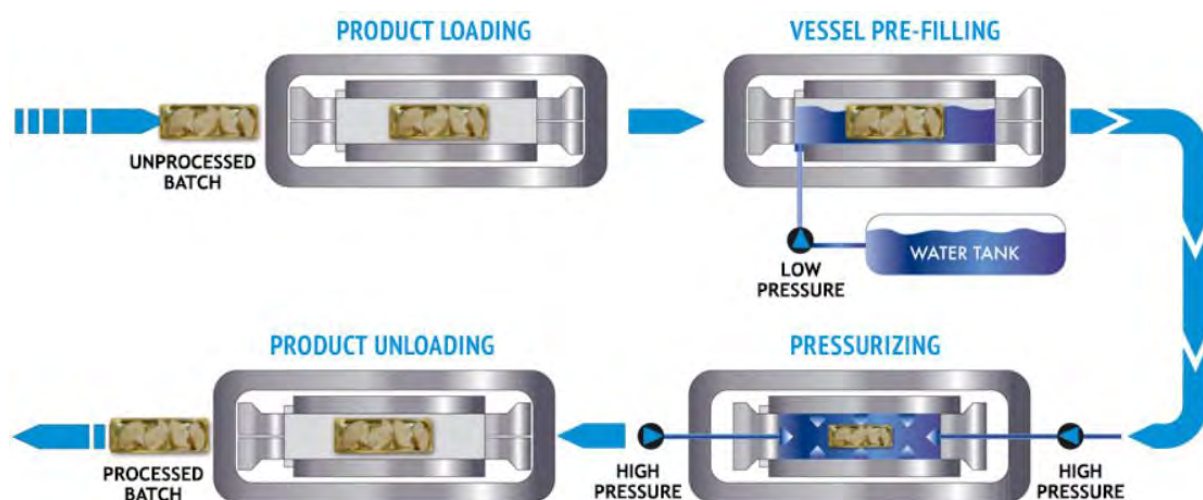
Le produit à traiter est introduit dans le réservoir, d'une capacité de 35 à 350 L, celui-ci doit être capable de supporter des pressions très élevées et est placé dans une pièce entourée par des murs de protection.⁽⁸⁾

Le réservoir est ensuite rempli avec un liquide qui permettra de transmettre au produit à traiter la pression générée par la ou les pompes (le plus gros appareil Hiperbaric en comporte 10). Pour des raisons économiques, les entreprises utilisent

le plus souvent de l'eau qui est récupérée à la fin du cycle de traitement puis réutilisée pour le prochain cycle.

Pour le traitement en vrac de produit liquide, qui sera abordé plus en détail plus loin dans ce document, il est possible de remplir le container avec le liquide à traiter puis d'appliquer directement la pression sur celui-ci sans ajout d'eau dans l'enceinte du réservoir.

Figure 3 : Schématisation d'un procédé de Hautes Pressions industriel (appareil horizontal)



Source : Site internet Hiperbaric - <https://www.hiperbaric.com/fr/hautes-pressions>

Il est possible de modifier la température du fluide de transmission de la pression avec un échangeur à plaques pour réaliser un traitement associant les effets de la pression et de la température.

Une fois la valeur cible de pression atteinte, elle est maintenue pendant le temps nécessaire au traitement. Après l'application de ce couple pression / temps qui correspond au barème de traitement, l'eau est évacuée et le produit traité peut être déchargé.

Un des avantages de la technologie HP est que, contrairement au traitement thermique qui s'effectue par gradient, la pression est appliquée uniformément et presque instantanément à travers le produit et peut être transmise dans toutes les directions, on parle de pression isostatique.⁽⁷⁾

De plus, le HPP s'appliquant sans gradient et indépendamment de la forme et de la taille du produit à traiter, il peut être réalisé sur de gros produit ou directement sur des lots.

2.2. Mode de production discontinue

Le principal inconvénient de la technologie HP est que ce système est prévu pour une utilisation discontinue, ce qui entraîne des pertes de charge et des stocks intermédiaires.⁽⁸⁾

De plus, pour une question de rentabilité, le temps de traitement ne doit pas dépasser 10 minutes pour optimiser le temps de traitement.

La charge et la décharge manuelle des produits entraînent également des coûts supplémentaires de main d'œuvre même si, pour faciliter la récupération des produits, les appareils HP sont équipés de larges ouvertures. Il est également possible de réduire ces coûts en automatisant le chargement et le déchargement des produits.

Le rendement du processus peut aussi être augmenté en plaçant plusieurs machines en série, l'ensemble du système devient alors semi-continu.

Pour traiter les produits pendant 3 minutes à 600 MPa, le plus gros des appareils commercialisés par Hiperbaric (le Hiperbaric 525) a un débit d'environ 2 tonnes par heure, cela n'est pas très élevé car on doit ajouter les temps de montée et de descente en pression à la durée de traitement effectif. La durée totale du cycle est de 6,7 ou 7,6 minutes selon le nombre de pompes intégrées à l'appareil en effet, un nombre plus élevé de pompes permet d'accélérer la montée en pression dans le container, voir tableau 1.⁽⁵⁾

Tableau 1 : Cadence de production des appareils Hiperbaric

Équipements	Nombre de pompe haute pression	Puissance (kW)	Temps du cycle* (minute)	Nombre de cycle /heure	Ratio du remplissage du module	Production** kg/heure
Hiperbaric 55	1	55	6,2	9,7	50%	266
Hiperbaric 120	2	100	6,5	9,2	50%	555
Hiperbaric 135	2	100	6,9	8,7	55%	646
	4	190	5,6	10,8	55%	803
Hiperbaric 300	4	190	7,4	8,1	55%	1 338
	6	280	5,9	10,2	55%	1 678
Hiperbaric 420	6	280	7,7	7,7	60%	1 984
	8	370	6,7	9,0	60%	2 257
Hiperbaric 525	8	370	7,6	7,9	60%	2 487
	10	460	6,7	9,0	60%	2 821

(*) Temps total de cycle pour produits conditionnés sous vide, incluant chargement et déchargement, montée en pression, maintien pendant 2 minutes à 600 MPa, diminution de pression et temps nécessaire pour les opérations sur la machine

(**) Production pour des produits conditionnés sous vide traités à 600 MPa (6.000 bars, 87.000 psi) pendant 2 minutes

Source : Jean-Luc MARTIN (2016) Faisabilité technique et économique des hautes pressions sur les produits de charcuterie Les Cahiers de l'IFIP - Vol 3 - n° 1

2.3. Remplissage

Le taux de remplissage est difficile à optimiser et la cadence du traitement HP est plutôt faible. En effet, le récipient ne peut pas être rempli entièrement avec le produit à traiter mais seulement entre 50 et 60% du volume du réservoir, selon le modèle.⁽³⁾ Ainsi, la taille des lots de produits traités par les HP est généralement plus réduite que celle des produits traités thermiquement.⁽⁷⁾

Cependant le traitement des produits liquides, comme les jus de fruit, fait exception car il peut être réalisé en vrac et de façon continue.

3. La préparation des produits :

3.1. Choix limité de l'emballage

Les produits sont tout d'abord emballés avant de subir le traitement HP. L'emballage doit être étanche et relativement imperméable à l'oxygène et pour pouvoir transmettre la pression au produit, il doit pouvoir se déformer puis récupérer sa forme d'origine.⁽⁷⁾

De plus, pour gagner le plus de temps possible le scellage des produits doit être rapide, c'est pourquoi la technologie HP requiert majoritairement des emballages en

plastique, qui peuvent être plus ou moins souples, et sont le plus souvent en polytéréphtalate d'éthylène (PET) ou en polyéthylène (PE).

Les produits liquides peuvent cependant être traités en vrac, par exemple les coquillages et les crustacés ne nécessitent pas d'être emballés avant leur traitement.

3.2. Conditionnement des aliments

L'effet des HP étant indépendant de la taille du produit traité, il est possible de fournir les distributeurs avec des emballages de grande taille. En revanche, les produits à traiter doivent être dégazés, préemballés dans un emballage étanche et en limitant les espaces de tête.⁽⁸⁾

Les produits sont le plus souvent emballés sous vide mais il est également possible de traiter par les HP des produits conditionnés sous atmosphère modifiée.

Dans certains produits alimentaires, le contrôle des bactéries anaérobies strictes étant un problème majeur de santé publique, il peut être possible d'utiliser des emballages perméables à l'oxygène comme moyen de protection supplémentaire.⁽⁹⁾

3.3. Pré-traitement de l'emballage

Les HP sont idéales pour traiter les produits emballés et prêts à consommer car le HPP débarrasse autant le produit que l'emballage des m.o. pouvant s'y trouver sans qu'il ne soit nécessaire de le stériliser au préalable.

Cela permet d'éviter d'avoir recours au peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) ou à d'autres produits chimiques pour le traitement des emballages.

De plus, le produit étant traité dans son emballage final le risque de recontamination après traitement HP est nul.⁽⁷⁾

3.4. Impact du traitement sur l'emballage

Les produits subissent le traitement HP en étant conditionnés dans leur emballage d'origine. Il est donc normal de se demander si les HP entraînent, comme un traitement thermique, la migration de composés chimiques issus du plastique vers l'intérieur du produit.

Un rapport de Mars 2010 de l'AFSSA (actuelle ANSES) réalisé sur des plats cuisinés conditionnés dans des barquettes rigides en polypropylène et soumis à une pression

de 600 MPa pendant 2 à 5 minutes a conclu que les HP n'induisaient pas la migration de substances nocives dans le produit.⁽¹⁰⁾

Les industriels sont donc exonérés de la constitution et de la validation d'un dossier d'autorisation européen si ces conditions sont respectées, ce qui représente un gain de temps considérable et un avantage économique certain.

Différentes études ont été réalisées sur la migration du 1,2-propanediol dans les plats préparés conditionnés dans un emballage constitué de différentes couches de polyester, de nylon, d'aluminium et de polypropylène. La plupart de ces études ont conclu qu'un traitement HP affecte peu la migration de 1,2-propanediol dans la nourriture mais ils ont observé un détachement des différentes couches de l'emballage, notamment entre l'aluminium et le polypropylène.⁽⁶⁾

La migration des composés de l'emballage est moins affectée par les HP que par les traitements thermiques, le HPP des produits dans un emballage plastique pose donc moins de problèmes que l'autoclavage des conserves par exemple.

3.5. Réduit l'utilisation d'agents nettoyant

L'appareil HP est chargé dans la plupart des cas par des produits emballés, l'intérieur de l'appareil est donc seulement en contact avec les contenants en plastique et l'eau servant de fluide de transmission de la pression.

Les aliments n'étant pas en contact direct avec l'équipement HP ils ne le salissent pas. C'est pourquoi les appareils HP nécessitent beaucoup moins de nettoyages que les lignes de traitement thermique ce qui représente un grand gain de temps, et d'argent car le nettoyage des appareils nécessite d'interrompre la production.

Cela permet également de faire des économies en eau, de réduire l'utilisation d'agents nettoyants chimiques, contribue à la diminution de la quantité d'agents chimiques dans les effluents liquides des entreprises et limite la pollution environnementale.

De plus, les produits ne sont pas non plus souillés par l'équipement HP, puisqu'ils ne le touchent pas directement, cela réduit considérablement le risque de contamination des produits.⁽⁷⁾

4. Les coûts de la technologie HP :

4.1. Investissement initial

De nombreuses normes sont imposées sur le récipient subissant la pression. En effet, les HP entraînent un risque d'explosion, c'est pourquoi les appareils HP sont entourés de murs de protection. Ceci fait que l'équipement HP et son installation représentent les coûts principaux de cette technologie, voir tableau 2.

L'achat initial du matériel représente 75 à 80% de l'investissement initial. En effet le prix d'un appareil HP varie entre 500 000 et 2 500 000 € selon sa taille, la partie la plus coûteuse de cet appareillage étant la cuve capable de supporter les HP.⁽¹¹⁾

Tableau 2 : Répartition du coût en capital d'un système à hautes pressions

Récipient haute pression, fermeture et culasse	50 – 60%
Système de pompage	30 – 35%
Système de contrôle et instrumentation associée	10 – 15%

Source : Jean-Luc MARTIN (2016) *Faisabilité technique et économique des hautes pressions sur les produits de charcuterie Les Cahiers de l'IFIP - Vol 3 - n° 1*

L'investissement élevé que représente la technologie HP est le principal frein à son développement. Pendant les débuts de cette technologie, la non-disponibilité d'équipement de dimensions adaptées à la production industrielle a ralenti sa progression.

L'accessibilité de l'équipement HP s'est considérablement améliorée par le développement de la sous-traitance, des centres techniques et la mise en commun du matériel. Cela a également permis de réduire le prix des produits traités par les HP ces dernières années.⁽⁷⁾

4.2. Coûts de fonctionnement

Ils comprennent le coût en électricité et le coût en eau et ils sont inférieurs à ceux d'un traitement thermique conventionnel.⁽¹²⁾

Un traitement de pasteurisation de 590 MPa pendant 2 minutes réalisé dans une enceinte de 200 litres consomme 10 kWh ce qui correspond à 700 kWh par jour pour une journée de production de 16 heures.

Si on prend le temps de s'arrêter sur ces chiffres, on remarque qu'une journée de 16 heures correspond à 70 cycles de traitement. Celui-ci ne durant que 2 minutes, on voit bien que seule une petite fraction de la journée correspond au barème de traitement HP, la plupart de la journée est dédiée au remplissage et au vidage de l'appareil.

La technologie HP est en revanche économe en eau, puisque environ 80% de l'eau contenue dans la cuve à haute pression est récupérée après chaque cycle après l'ouverture de celle-ci, cela représente une consommation de 1 700 m³ d'eau par an pour une production répartie sur 200 jours/an.⁽⁸⁾

Le coût de fonctionnement d'un appareil HP est plutôt modéré car lorsqu'il est utilisé 16 heures par jour et 300 jours par an il est compris entre 0,14 € par kilo pour un appareil de 55 L et 0,071 € par kilo pour un appareil de 525 L.

Selon une autre source, le coût de fonctionnement d'un appareil HP est compris entre 0,05 et 0,6 \$US par litre ou par kilo de produit ce qui est inférieur à celui d'un traitement thermique.⁽⁷⁾

Tableau 3 : Exemples de coût de fonctionnement en comptabilisant l'amortissement sur 7 ans de l'investissement de l'appareil

Equipement	Débit L/H	Productivité (pour 600 MPa, pendant 2 min)	Prix de l'équipement millions €	Coût de traitement (½ amortissement, ¼ pièces-maintenance, ¼ travail)
Hiperbaric 55 plus petite machine	55	266 kg/H remplissage 50%	0,5	20 centimes / kg
Hiperbaric 525 plus grande machine	525	2,8 T/H remplissage 60%	2,5	7-8 centimes / kg

Source : Jean-Luc MARTIN (2016) *Faisabilité technique et économique des hautes pressions sur les produits de charcuterie Les Cahiers de l'IFIP - Vol 3 - n° 1*

4.3. Coût total

Le coût de la main d'œuvre représente 5 à 10% des coûts de fonctionnement.⁽¹³⁾

Un traitement par les HP représente 0,20 € à 0,08 € de frais supplémentaire par kg de produit fini emballé.⁽⁸⁾

Ce chiffre prend en compte l'amortissement du coût initial sur 7 ans et l'impossibilité de remplir plus de 60% du volume de la cuve⁽¹³⁾, voir tableau 3. Le coût d'un traitement thermique conventionnel est quant à lui de 0,05 \$ / kg.^(11,14)

Un traitement par les HP consomme moins d'énergie qu'un traitement thermique, mais l'appareillage est plus coûteux, les produits traités par les HP sont donc pour l'instant plus chers que les produits traités thermiquement mais ils sont de meilleure qualité. Cette technologie est donc le plus souvent utilisée pour des produits à forte valeur ajoutée tels que le homard ou pour valoriser des produits de meilleure qualité nutritionnelle et gustativement plus proches des produits frais.⁽¹¹⁾

5. Les désavantages de la technologie HP :

5.1. Sur les produits fragiles

Du point de vue du consommateur, la texture de la nourriture a un fort impact sur la vente. En effet, un produit ayant une texture molle ou spongieuse est généralement perçu comme pourrissant ou ayant dépassé sa date limite de conservation.

La structure physique de la plupart des produits à forte teneur en eau n'est pas modifiée après un traitement HP à condition que la pression ne génère pas de forces de cisaillement. Or, la pression étant appliquée uniformément à la surface du produit, celui-ci n'est généralement pas déformé pendant le HPP.⁽¹⁵⁾

Cependant, la texture des produits fragiles contenant de l'air emprisonné comme le pain, les fraises ou les laitues est modifiée par les HP car elles entraînent le déplacement des bulles de gaz que contiennent ces produits.⁽⁷⁾

Cela entraîne l'effondrement des cavités, la déformation et un tassement du produit. De plus, si du liquide s'infiltre dans les poches de gaz situées à la périphérie du produit cela peut entraîner un ramollissement de celui-ci.

Certains scientifiques ont observé que les HP avaient un impact moindre sur les morceaux de fruits que sur les fruits entiers. En effet, les fruits entiers comportent davantage de vacuoles remplies de gaz or celles-ci sont sensibles à la pression. La compression du gaz contenu dans ces vacuoles entraîne des modifications morphologiques, une nécrose tissulaire et des modifications des réactions enzymatiques.⁽¹⁶⁾

Certains changements de textures peuvent être recherchés comme faire fondre de la mozzarella sur des pizzas ou augmenter la fermeté et l'élasticité des jambons secs qui ont tendance à prendre une texture pâteuse.⁽¹⁵⁾

Pour les saucisses de type Francfort, l'utilisation des HP sur la viande fraîche avant le cutterage stabilise l'émulsion, augmente la capacité de liaison à l'eau, diminue l'exsudation et augmente la jutosité du produit fini. Elles permettent ainsi d'augmenter le rendement de cuisson des charcuteries tout en en réduisant l'ajout de sel. La texture des saucisses est plus cohésive et moins ferme ce qui permet d'ajouter moins de polyphosphates pour obtenir la même texture.⁽⁸⁾

5.2. La stérilisation par les HP

La stérilisation des produits est plus difficile à atteindre que leur pasteurisation. Elle nécessite un barème de traitement suffisant pour détruire 6 log de m.o., cela signifie que pour une population initiale de 1000 000 bactéries, il doit subsister à la fin du traitement au maximum une seule bactérie viable.

Pour les traitements thermiques par exemple, un traitement de 3 minutes à 121°C permet d'atteindre une réduction de 12 log de la population de *Clostridium botulinum*.

Les produits alimentaires stérilisés par la chaleur sont habituellement stockés et transportés à température ambiante mais les produits stérilisés par les HP doivent être conservés réfrigérés ou congelés, ce qui entraîne des surcoûts.⁽⁷⁾

En effet, les produits stérilisés par les HP peuvent subir des changements de couleur, d'odeur ou de texture pendant un stockage à température ambiante, qui sont provoqués par l'oxygène restant ou entrant dans l'emballage.

5.3. Vérification de l'efficacité du traitement

Pour prédire la durée de conservation des produits il est nécessaire d'avoir une grande quantité de données fiables pour servir de référence.

Or, la technologie HP étant relativement récente comparée aux traitements thermiques, les données d'efficacité disponibles ne sont pas assez nombreuses et il n'existe donc pas encore de modèles statistiques fiables pour prédire l'efficacité d'un traitement HP.

Il est donc nécessaire de tester l'efficacité des HP pour chaque produit à développer et pour chaque barème envisagé, ce qui entraîne des surcoûts et une perte de temps pour l'industriel.⁽⁷⁾

5.4. Lorsque l'avantage des HP devient un inconvénient

Contrairement aux traitements thermiques, les HP n'affectent pas les liaisons covalentes, elles ne détruisent donc pas les petites molécules. C'est un avantage majeur pour conserver les vitamines et autres composés d'intérêt de santé, mais cela signifie également que les pesticides et les éventuelles toxines présentes dans les produits agricoles sont également conservés.

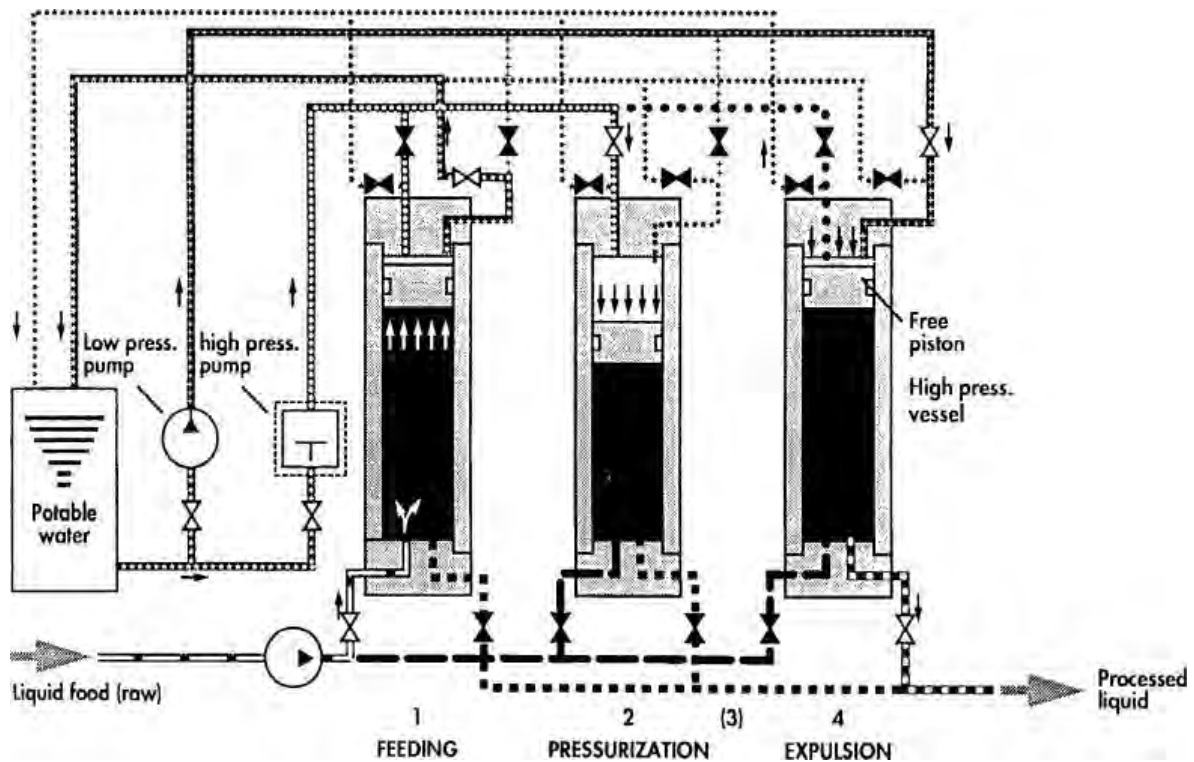
A l'inverse, les éventuels résidus de pesticides présents sur les produits sont éliminés par évaporation ou directement détruits par la chaleur pendant un traitement thermique.⁽⁷⁾

De plus, certains m.o. peuvent produire des toxines lorsqu'ils sont soumis à un stress environnemental. Certains auteurs ont émis l'hypothèse que le HPP induit la production de certaines toxines et se sont intéressés aux effets des HP sur la production de shigatoxines par les *Escherichia coli*.⁽¹⁵⁾

6. Les particularités des produits liquides traités en vrac :

Il est possible de traiter les aliments liquides en système continu avec les HP pour cela, les appareils doivent être agencés de la manière décrite dans la figure 4.

Figure 4 : Fonctionnement d'un appareil HP à traitement continu



Source : Wang C-Y, Huang H-W, Hsu C-P, Yang BB (2016) Recent Advances in Food Processing Using High Hydrostatic Pressure Technology. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 56:527–540.

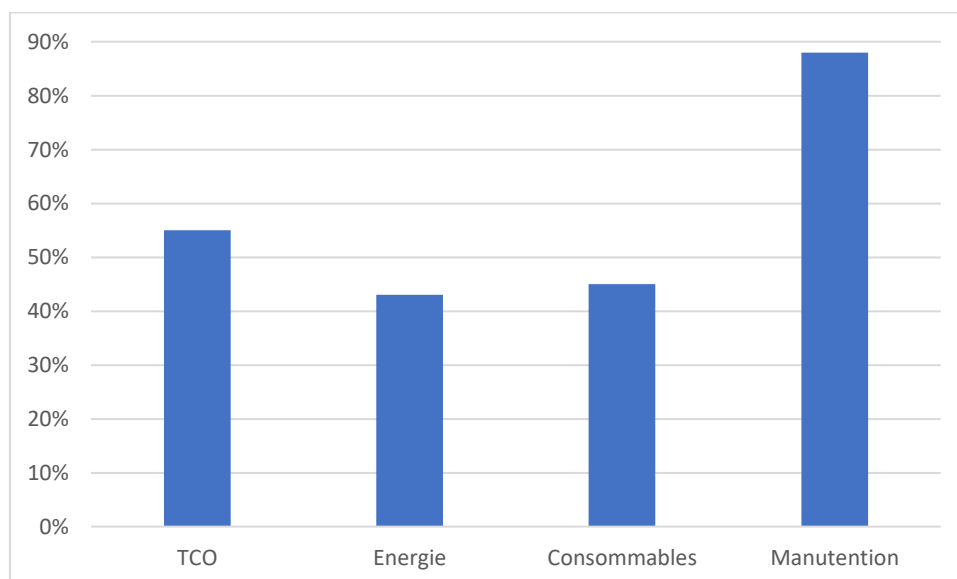
Le produit à traiter sert également de liquide de transmission de la pression, il est donc possible de remplir le réservoir en totalité pour le traitement en vrac des produits liquides, comme les jus de fruit par exemple. Le liquide traité est ensuite dirigé vers une ligne de remplissage aseptique ce qui permet la même diversité d'emballage qu'un traitement UHT.⁽⁴⁾

Ainsi, cette façon de traiter les produits liquides offre de nombreux avantages, voir figure 5, et permet un gain de temps, de main d'œuvre et d'argent car :

- le module peut être rempli jusqu'à 90% (contre 50-60% pour les produits emballés)
- la production est continue
- le chargement et le déchargement des produits sont automatisés
- la consommation en énergie est réduite
- les coûts à moyen et à long terme sont réduits

Figure 5 : Représentation graphique de l'économie faite avec traitement HP continu par rapport à un traitement discontinu

TCO : total cost ownership per liter est le coût total de possession. Il prend en compte les dépenses supplémentaires durant l'ensemble du cycle de vie de l'appareil.



Le traitement HP classique discontinu réalisé sur des produits liquides en bouteille correspond à la valeur 100%

Source : <https://www.hiperbaric.com/en/hpp-technology/equipment/hpp-in-bulk/hiperbaric-1050-bulk/>

Si on compare avec les lignes standards de pasteurisation thermique, la capacité va de 3000 à 30 000 litres de produits traités par heure pour le Pasteurizer BC commercialisé par Tetrapack contre 8000 litres par heure pour le Hiperbaric 1050 Bulk. Traiter les produits liquides en vrac permet donc un gain de productivité considérable par rapport au traitement en lot et est plus rentable qu'un petit appareil de traitement thermique.

III. Effets de la pression sur les constituants de la matière vivante

Les HP peuvent inactiver les m.o. en modifiant les membranes cellulaires, en inactivant des enzymes essentielles et/ou en inhibant la synthèse protéique.⁽¹⁷⁾

L'énergie nécessaire pour comprimer 1 litre d'eau à 400 MPa (19,2 kJ) est légèrement plus faible que celle (20,9kJ) nécessaire pour chauffer 1 litre d'eau de 20°C à 25°C.⁽⁶⁾ Mais comparé à l'énergie nécessaire pour chauffer un solide ou un liquide à 100°C, l'énergie nécessaire pour compresser de 500 MPa est très faible.⁽⁷⁾

Ce faible niveau d'énergie permet de comprendre pourquoi, contrairement aux traitements thermiques, le HPP n'affecte pas les liaisons covalentes et laisse la structure primaire des protéines presque intacte.

Diminution du volume des produits traités

Sous l'effet de la pression, les espaces entre les petites molécules, comme l'eau par exemple, se réduisent, ceci entraîne la diminution du volume occupé par les molécules.

Ainsi, le volume occupé par l'eau diminue provisoirement selon la valeur de la pression exercée :

- 4% à 100 MPa
- 7% à 200 MPa
- 15% à 600 MPa

De plus les molécules d'eau s'infiltreront et rempliront l'intérieur des grosses molécules, qui restent sphériques, ce qui entraîne une diminution de volume total importante.⁽⁷⁾

1. Modification des liaisons intramoléculaires et intermoléculaires :

1.1. Les liaisons covalentes

La structure covalente des biomolécules de bas poids moléculaire ainsi que la structure primaire des macromolécules (protéines, acides nucléiques et polysaccharides) ne sont pas perturbées par des pressions de 200 MPa car les liaisons covalentes ne sont pas compressibles.⁽¹¹⁾

Par exemple, l'effet des HP sur les mycotoxines est limité. Si on essayait d'utiliser les HP pour réduire la concentration en patuline, une mycotoxine produite par plusieurs espèces d'*Aspergillus*, de *Byssoschlamys* et de *Penicillium*, il faudrait traiter le produit

pendant 1 heure à 20°C pour obtenir une réduction de seulement 42% à 300 MPa, de 53% à 500 MPa et de 62% à 800 MPa.⁽¹²⁾

1.2. Les liaisons non covalentes

Les interactions moléculaires non covalentes sont les cibles préférentielles des pressions élevées.⁽¹¹⁾ Ainsi, les HP affectent les liaisons non covalentes, comme les liaisons ioniques ou les liaisons hydrophobes, qui peuvent être rompues ou renforcées.

1.2.1. Les liaisons hydrophobes

La formation de liaisons hydrophobes entre des groupes aliphatiques (longues chaînes hydrocarbonées) s'accompagne d'une augmentation de volume, elles sont donc déstabilisées lorsque la pression augmente.⁽¹¹⁾

La pression altère les interactions hydrophobes, or celles-ci sont essentielles à la stabilité des protéines, des micelles et des lipides.⁽¹⁷⁾

1.2.2. Les liaisons hydrogènes

Les liaisons hydrogènes s'accompagnent d'une légère réduction de volume, elles sont donc renforcées par les HP. La structure secondaire des acides nucléiques et des polysaccharides est majoritairement le résultat de liaisons hydrogènes, elles sont donc plutôt inchangées par la pression.⁽¹⁷⁾

Les structures protéiques de type hélices α et feuillets β formant la structure secondaire des polypeptides persistent également.⁽¹²⁾

La structure en double hélice de l'ADN étant majoritairement le produit de liaisons hydrogènes elle est peu affectée par la pression et reste stable jusqu'à 1000 MPa.⁽¹¹⁾

1.2.3. Les interactions électrostatiques

Les acides nucléiques sont relativement résistants aux HP ainsi que la double hélice de l'ADN, mais les interactions entre les acides nucléiques et les protéines sont principalement de nature électrostatique et sont donc défavorisées par l'élévation de la pression.⁽¹¹⁾

1.3. Etat d'ionisation

En tant que paramètre thermodynamique, la pression modifie l'équilibre de dissociation des acides faibles.⁽¹⁸⁾ Elle augmente l'état d'ionisation des acides et des bases, des sels ainsi que l'auto-ionisation des molécules d'eau. Cela entraîne la variation du pH pendant la durée du barème de traitement.⁽¹⁷⁾

Ces modifications de pH ne peuvent pas être mesurées directement des aliments solides, mais pour les aliments liquides il existe des méthodes de mesures du pH in situ.

En moyenne, le pH des produits diminue de 0,2 à 0,5 unités par palier de 100 MPa. L'état d'ionisation des acides aminés étant dépendant du pH, les HP peuvent causer un déploiement des chaînes protéiques en fonction de leur pHi.

Les variations brutales de pH entraînées par la mise sous pression peuvent générer un stress supplémentaire pour les microorganismes mais le pH des produits acides est en général moins modifié par la pression. Le pH et la pression peuvent donc avoir une action synergique sur l'inactivation des microorganismes et augmenter l'efficacité du traitement HP.

1.4. Hydratation et déshydratation

La solvation des groupes chargés s'accompagne d'une réduction de volume due à l'électrostriction qui correspond à l'alignement compact des molécules d'eau, qui agissent comme des dipôles lorsqu'elles sont soumises au champ électrique (coulomb) des groupes chargés.

A l'inverse de la solvation, la déshydratation de groupes chargés s'accompagne d'une augmentation de volume due aux interactions de coulomb, elle n'est donc pas favorisée par la pression.⁽¹¹⁾

Tableau 4 : Modifications de volume des principales interactions non covalentes

Reaction type	Example	dV [cm ³ mol ⁻¹]
Protonation/* Ionic pair binding	Water dissociation: $H^+ + OH^- \rightarrow H_2O$	+21,3
	Amino groups: $P-NH^{3+} \rightarrow P-NH_2 + H_2O$	+20
	Carboxylic acid: $P-COO^- + H^+ \rightarrow P-COOH$	+10
Hydrogen bond formation	Helix formation	
	L-Lysine	-1,0
	Adenin and Uracil	+1,0
Hydrophobic interaction*	Lipid assemblies	-10
Hydration of polar bonds	n-Propanol $\rightarrow$ n-Propanol + H ₂ O	-4,5
Hydrophobic hydration*	$C_6H_6 \rightarrow C_6H_6 + H_2O$	-22,7
Protein denaturation	Myoglobin (pH 5, 20 °C)	-98,0
Cyclization of C-rings*	C ₃ -C ₁₀ -Rings	-5.5 - -32

* Reactions that might be involved in the pathways of either furan or 3-MCPD formation

Source : Sevenich R (2016) *High pressure processing at ambient and high temperatures and its influence on food processing contaminants, food borne diseases and bacterial spores in model- and real-food systems.*

1.5. Prédiction de l'effet des HP

Anticiper l'effet des HP sur un bioprocédé dans son ensemble est compliqué car il dépend de nombreuses interactions qui se forment ou se rompent de façon simultanée. Mais les données disponibles sur les modifications de volume des principales interactions non covalentes peuvent aider à prédire comment la pression modifie la structure de molécules, voir tableau 4.⁽¹¹⁾

2. Effets des HP sur les protéines :

La pression agit essentiellement sur les interactions responsables de la structure des macromolécules. Les protéines sont les biomolécules les plus sensibles à la pression,

leur stabilité dépend de l'équilibre entre les interactions de stabilisation et de déstabilisation. ^(11,17)

L'exposition à des mHP (de 80 à 300 MPa) n'affecte généralement que les structures quaternaires car elles sont en grande partie dues à des liaisons hydrophobes. ⁽⁶⁾

Les longues chaînes de macromolécules s'allongent sous l'effet des HP et restent parfois plus longues même après le retour à pression atmosphérique.

2.1. Les protéines oligomériques

Des HP modérées (de 200 MPa) n'affectent souvent que la structure quaternaire des protéines et entraînent la dissociation des protéines oligomériques. ⁽⁵⁾

Les protéines oligomériques et les assemblages constitués de plusieurs protéines, comme le virus de la mosaïque du tabac par exemple, se dissocient en sous unités pour des pressions de 100-200 MPa

Cette dissociation pourrait s'expliquer par la diminution de volume résultant de la rupture des liaisons hydrophobes et des liaisons ioniques. Les sous unités ainsi obtenues peuvent subir des modifications de conformation et des dépliement partiels qui les rendent davantage sensibles à l'action des protéases. ⁽¹¹⁾

2.2. La dénaturation des protéines par la pression

L'avantage de la pression pour la dénaturation des protéines est sa réversibilité.

Pour des pressions inférieures à 400 MPa celles-ci peuvent être dénaturées, solubilisées ou peuvent précipiter. Les changements de conformations, les dépliements et les dissociations de sous unités obtenues entre 100 et 300 MPa, sont habituellement réversibles. ⁽¹⁵⁾

La plupart des petites protéines monomériques se déplient de façon réversible à des pressions de 400–800 MPa puis ont tendance à se replier lentement après le relâchement de la pression.

En revanche, les pressions supérieures à 400 MPa peuvent dénaturer les protéines de façon irréversible, même si les niveaux de dénaturation atteints après un traitement HP n'atteignent pas ceux d'un traitement thermique.

De plus, la pression entraîne rarement l'agrégation des protéines ni des modifications de la structure covalente mais on remarque que les protéines ont tendance à gélifier si le taux de compression est lent alors qu'elles précipitent s'il est rapide.⁽⁶⁾

En conclusion, la modification des protéines dépend de la valeur de la pression maximale atteinte, de la rapidité de la montée et de la descente en pression ainsi que de la concentration en protéines.

2.3. Etat partiellement déplié

Dans certains cas, des HP modérées causent un changement de conformation des protéines vers un état stable partiellement déplié.⁽¹⁷⁾

Ces protéines, ayant subi une dénaturation douce, conservent leur structure secondaire et sont appelées « globules fondus ».⁽¹¹⁾

Le déploiement des protéines révèle des régions habituellement repliées et augmente le nombre d'interactions hydrophobes que la protéine est capable de réaliser. Il peut aussi faire apparaître des segments attaquables par les protéases comme la pepsine et permet d'augmenter la digestibilité des protéines.⁽¹⁹⁾

2.4. Volume occupé par une protéine dénaturée

Le changement de volume causé par la dénaturation des protéines comprend la formation et la rupture des liaisons non covalentes, les changements de conformation et les modifications de l'état d'hydratation de la protéine.

La dénaturation protéique s'accompagne du dépliement et du gonflement de la chaîne polypeptidique et donc d'une augmentation de son volume mais la disparition des vides à l'intérieur des protéines causée par la rupture des interactions hydrophobes et électrostatiques entraîne une forte réduction de volume.

C'est pourquoi la différence de volume entre la forme native et la forme dénaturée des protéines est souvent négative, cela signifie la protéine dénaturée occupe un espace plus petit que la protéine native.

En comparaison, l'exposition de nouveaux acides aminés aux molécules d'eau et l'extension de l'hydratation de la protéine fait peu augmenter le volume de la protéine.⁽¹¹⁾

Les modifications de volume causées par la dénaturation protéique peuvent être déterminées en étudiant l'impact de la pression sur la constante d'équilibre des réactions de dépliement et de repliement des protéines ainsi que du volume d'activation de ces réactions.

2.5. Compressibilité des protéines dénaturées par la pression

Les différentes régions d'une protéine ont une compressibilité variable, due aux différents acides aminés qui jouent un rôle dans la stabilité des protéines, dans leur repliement et dans l'assemblage des protéines multimériques.⁽¹¹⁾

La différence de volume a tendance à s'accroître pour des pressions plus élevées car les protéines dénaturées sont davantage compressibles que les protéines natives, c'est pourquoi les protéines dénaturées par la pression sont plus compactes que les protéines dénaturées par la chaleur ou par des agents chimiques.

3. Modification de l'activité enzymatique :

Les HP peuvent apporter 3 sortes de modifications aux réactions chimiques⁽¹¹⁾ :

- modifications de structure de l'enzyme
- modifications du mécanisme de réaction
- modifications d'une étape limitante

L'application de mHP inférieures à 200 MPa peut conférer une thermorésistance accrue à de nombreuses protéines. En général, réaliser des synthèses enzymatiques dans des conditions de pression modérées n'altère pas la stabilité ni la fonctionnalité des enzymes. En effet, celles-ci sont tout d'abord stabilisées par les pressions modérées avant d'être déstabilisées par la pression si celle-ci augmente davantage.⁽¹⁷⁾

Notons que l'on n'observe pas de corrélation entre la thermorésistance des enzymes et leur résistance à la pression ou barorésistance.⁽⁵⁾

3.1. Principes thermodynamiques

Les réactions chimiques dépendent des principes fondamentaux de la thermodynamique, en effet une réaction chimique ne peut avoir lieu que si l'enthalpie libre (G) du système diminue. La variation d'enthalpie libre (ΔG) doit donc être inférieure à 0 et est donnée par la formule suivante :

$$\Delta G_{T,P}(sys) = \Delta H_{sys} - T\Delta S_{sys}$$

T : température
H : enthalpie
S : entropie
U : énergie interne

La variation d'enthalpie (ΔH) d'un système dépend quand à elle de la pression et de la variation de volume, et suit la règle suivante :

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V$$

La variation d'enthalpie permet également de savoir si une réaction est exothermique ($\Delta H > 0$) ou endothermique ($\Delta H < 0$).

Enfin, l'équation suivante montre que l'état d'équilibre d'une réaction dépend de la concentration des différents substrats (A) et produits (B), ainsi que de la température.⁽²⁰⁾

$$\Delta G_{\text{réel}} = \Delta G^{\circ} + RT \ln [B] / [A]$$

3.2. Déplacement de l'équilibre chimique de réaction

La vitesse de réaction est influencée par les modifications de température, de pression et de concentration et l'état d'équilibre d'une réaction est décalé en fonction de leur modification.⁽³⁾

D'après le principe de Le Chatelier, les hautes pressions hydrostatiques favorisent les réactions qui s'accompagnent d'un changement de volume négatif et inhibent les réactions s'accompagnant d'une augmentation de volume.⁽¹⁷⁾

Concrètement, lorsque la pression augmente, l'équilibre de réaction est décalé vers l'état qui occupe le plus petit volume.⁽⁷⁾

Lorsque la variation de volume (dV) d'une réaction chimique ou enzymatique est inférieure à zéro, cela signifie que cette réaction tend vers l'état de plus petit volume, celle-ci est donc favorisée par l'augmentation de la pression.⁽¹¹⁾

Pour certaines conversions enzymatiques, les HP peuvent améliorer directement l'activité catalytique. En effet, si le changement de volume associé à la réaction est négatif, l'augmentation de la pression décale favorablement l'équilibre de la réaction c'est à dire dans le sens de la formation des produits.⁽⁵⁾

3.3. Exemples de réactions

Les HP accélèrent les réactions s'accompagnant d'une diminution de volume, comme l'hydrolyse de l'aniline par l' α -chymotrypsine en micelles inverses dont la vitesse de réaction est multipliée par 7 à une pression de 200 MPa par rapport à sa vitesse à pression atmosphérique.

A l'inverse, une réaction avec une valeur de dV positive, comme l'hydrolyse d'un ester par l' α -chymotrypsine est 10 fois moins rapide à 200 MPa qu'à pression atmosphérique.

A 200 MPa, l'activité peptidase de la carboxypeptidase des levures est diminuée, mais elle présente une augmentation de son activité acyl-transférase permettant la synthèse des protéines. Cela fait que le rendement de la synthèse de peptides par la carboxypeptidase est multiplié par 6 à une pression de 200 MPa.⁽¹¹⁾

3.4. Inactivation des enzymes

L'inactivation des enzymes causée par les HP est principalement due aux réarrangements structuraux et à la modification de leur état d'hydratation.

De plus, la destruction partielle ou totale de la structure tridimensionnelle des grandes chaînes de protéines entraîne la modification de l'activité des enzymes.⁽⁷⁾

La sensibilité des enzymes aux HP est variable, la α amylase de *Bacillus subtilis* par exemple est capable de supporter des pressions de 500 MPa alors que la phosphoglucomutase et l'aconitase de *Listeria monocytogenes* sont inactivées dès 200 MPa. Cependant, on n'observe pas de corrélation entre la survie de *Listeria monocytogenes* et la résistance de ces enzymes aux HP.⁽¹²⁾

3.5. Cas particulier de la réaction de Maillard

Celle-ci se résume en 3 réactions : la condensation d'un acide aminé (groupement amine) et d'un sucre (groupement carbonyle), suivie de réarrangements moléculaires puis de la formation de mélanoidine par polymérisation.⁽⁶⁾

C'est cette étape finale de polymérisation qui est responsable du brunissement des produits. Or, les HP même faibles (5-50 MPa à 50°C) empêchent la réaction de Maillard de se produire ou diminuent la génération de radicaux libres dérivés de la mélanoidine.⁽¹⁷⁾

L'absence de brunissement et de production de ces composés volatils représente un avantage lorsqu'on cherche à conserver les caractéristiques du produit cru. Il est toujours possible de combiner les HP avec un traitement thermique si on souhaite obtenir les caractéristiques d'un produit cuit.⁽⁷⁾

4. Influence du milieu sur l'efficacité des HP :

La résistance d'une souche d'*E. coli* O157:H7 résistante à la pression est différente en fonction du milieu utilisé. Pour un traitement HP de 375 MPa pendant 30 minutes à 20°C on obtient ⁽¹²⁾ :

- 6 réductions log en tampon phosphate
- 2,5 réductions log dans de la viande de volaille
- 1,75 réduction log dans du lait

L'efficacité moindre des HP sur les produits alimentaires oblige parfois à les associer avec un autre traitement antimicrobien.

Davantage de résultats sont disponibles dans les annexes à la fin de ce document.

4.1. Le pH

Il a été montré que la mise sous pression des milieux tampon entraîne une forte variation du pH, ce qui n'est pas le cas en condition réelle sur de la nourriture. Cette forte variation du pH pourrait également expliquer les valeurs élevées d'inactivation obtenues pour les microorganismes traités en milieu tampon.

Une étude a montré que le pH initial d'un jus d'orange affecte les taux d'inactivation de *E. coli* O157 : H7.⁽¹²⁾ En effet, les HP sont plus efficaces sur les aliments acides (pH < 4,6), car un pH faible est défavorable au développement bactérien et rend les microorganismes davantage sensibles aux HP et car les HP peuvent rendre les m.o. moins aptes à supporter un pH faible. Les m.o. tolèrent ainsi une gamme de pH moins large et les cellules endommagées échouent à se réparer et meurent plus rapidement pendant le stockage du produit.⁽¹⁵⁾

L'augmentation de la sensibilité des m.o. au pH peut être causée par l'effet inhibiteur des HP sur les ATPases membranaires. Cette enzyme (mitochondriale chez les eucaryotes et membranaire chez les procaryotes) est responsable de la production d'ATP à partir de la différence de concentration en protons et est essentielle pour la production d'énergie par la cellule.

Des *Lactobacillus plantarum* traités à 250 MPa présentent une activité réduite des ATPases de type F qui sont des enzymes clés pour le maintien de l'équilibre acido-basique des cellules. Ces cellules ont alors une capacité réduite à maintenir le gradient de pH nécessaire à leur survie.⁽¹²⁾

La stérilisation des produits peu acides (pH >4,6) nécessitera, quant à elle, la combinaison d'un traitement HP avec un autre, comme un traitement thermique par exemple.

4.2. Le type de solvant

Les modifications de volumes accompagnant la catalyse enzymatique sont plus marquées dans les milieux organiques qu'en milieu aqueux.⁽¹¹⁾

Elles peuvent être due à des changements dans la conformation des protéines ou à la fixation ou la dissociation des molécules d'eau participant à l'hydratation des groupements fonctionnels des protéines.

Ces deux procédés dépendent des modifications du milieu entourant les enzymes, c'est pourquoi les effets de la pression sur les réactions enzymatiques sont souvent corrélés avec les paramètres quantitatifs du milieu et des solutés.

De plus, la catalyse enzymatique dans un milieu organique est très sensible à l'hydratation des enzymes, or celle-ci dépend de la pression. La catalyse enzymatique est donc très sensible à la pression dans les milieux organiques.

Il est également possible d'améliorer la stabilité des enzymes à la pression et/ou à la chaleur en travaillant avec certains co-solvants ou des milieux de culture organiques. En effet, certaines molécules comme les glucides, les protéines, les lipides et certains sels peuvent provoquer une diminution de l'efficacité des HP.⁽¹⁷⁾

4.3. L'activité de l'eau (A_w) et types de solutés

En règle générale, une A_w faible réduit l'efficacité du traitement HP. En effet lorsque l' A_w est trop faible, les protéines sont plus rigides et donc moins sensibles aux HP.⁽⁶⁾

Une étude a montré que pour des traitements HP de 200 ou de 400 MPa pendant 15 minutes à 25°C, abaisser l' A_w du milieu de 0,04 unités conduit à une diminution de l'effet des HP sur une levure de l'espèce *Rhodotorula rubra*.⁽¹²⁾

Dans d'autres cas, le HPP endommage les m.o. et réduit leur capacité à résister au stress provoqué par une A_w diminuée.

En réalité, la nature du soluté utilisé pour faire diminuer l' A_w est plus importante que la valeur de l' A_w en elle-même.⁽¹⁵⁾

Une forte concentration en sucrose montre un effet baroprotecteur pour des *E. coli* et *Bacillus amyloliquefaciens* et l'effet protecteur du trehalose est encore plus important.^(3,12)

Le sucrose permet aux cellules de conserver une activité métabolique ainsi que l'intégrité de la membrane cellulaire, son effet protecteur est donc plus étendu que celui du NaCl qui ne préserve pas l'activité métabolique de la cellule.⁽³⁾

Pour obtenir le même niveau de protection il faut atteindre une concentration plus importante pour les sels que pour les disaccharides.

Cependant, une étude réalisée sur des bactéries de l'espèce *Bacillus coagulans* a montré que pour une même A_w , le HPP est moins efficace lorsque le milieu contient des sels de NaCl et de CaCl_2 plutôt que des solutés non ioniques comme le sucrose ou le glycérol.⁽¹⁵⁾

4.4. Les sels

Dans une étude, la survie de *Listeria innocua* dans du lait UHT est augmentée par l'ajout d'ions calcium, magnésium, citrate et phosphate. Ils ont donc un effet baroprotecteur. Le calcium stabilise la membrane externe, le magnésium stabilise la structure des ribosomes.⁽¹⁵⁾ Les ions phosphate et sulfate stabilisent les interactions intermoléculaires des macromolécules et des membranes.⁽¹⁸⁾

Ceci explique pourquoi beaucoup de microorganismes sont davantage résistants aux pressions dans certains aliments riches en calcium comme le lait.

En règle générale, les HP sont moins efficaces sur les produits très salés, mais si on compare les effets des différents sels on remarque que les HP sont moins efficaces sur les jambons salés uniquement avec du chlorure de potassium ou du lactate de potassium plutôt qu'avec du chlorure de sodium.

Mais les sels ont d'autres avantages que la seule conservation des aliments. Une étude a montré qu'ajouter du lactate de potassium à de la viande séchée traitée à 600 MPa permet d'améliorer la couleur et la texture de celle-ci.⁽⁷⁾

4.5. Les antimicrobiens

L'efficacité des HP est moins affectée par les facteurs extérieurs que les agents de conservation chimiques dont l'efficacité est moins prévisible car elle varie avec la température, la valeur du pH ou l'humidité. De plus, l'utilisation d'agents chimiques peut conduire à l'augmentation de la résistance des m.o. par un phénomène de sélection naturelle.

Cependant, certains additifs comme l'éthanol, le lysozyme (E1105, classé parmi les conservateurs), l'acide benzoïque ou l'acide sorbique peuvent améliorer l'effet des HP ce qui permet de traiter les produits moins longtemps ou avec des valeurs de pression plus faibles.⁽⁷⁾

Les HP peuvent aussi être plus efficaces lorsqu'elles sont associées à des agents antimicrobiens comme la lacticine 3147, la lactopéroxydase ou la nisine.⁽¹¹⁾

4.6. La technologie Hurdle

La technologie Hurdle se base sur l'association de plusieurs traitements de puissance modérés mais qui permettent lorsqu'ils sont associés d'atteindre les objectifs microbiologiques fixés.

La composition la plus favorable pour assurer une bonne destruction des micro-organismes par les HP dans un produit est :

- une acidité élevée
- une A_w élevée
- une faible concentration en sels
- une teneur faible en lipides et en saccharides

En revanche, sont à éviter les milieux riches apportant aux cellules stressées des acides aminés essentiels et des vitamines, qui ont pour effet d'augmenter leur survie.⁽¹⁵⁾

Et réciproquement, les HP provoquent des dommages aux cellules et augmentent leur sensibilité aux stress environnementaux comme le pH, l' A_w ou la concentration en sel.

La conservation des produits peut donc être améliorée lorsque les HP sont combinées avec les effets du pH, des additifs chimiques, par l'emballage du produit (sous atmosphère modifiée par exemple) ou avec l'effet de la température qui sera détaillée dans le chapitre suivant.⁽⁷⁾

5. Influence de la température sur l'efficacité des HP :

Dans la logique de la technologie Hurdle, il a été proposé d'associer les HP avec un traitement thermique pour stabiliser les conserves alimentaires peu acides. En effet, les HP utilisées seules peuvent causer une inactivation bactérienne importante mais lorsqu'elles sont combinées à l'effet de la chaleur, leur action synergique permet d'obtenir un résultat supérieur à ceux des deux techniques utilisées séparément.

La température appliquée pendant le HPP peut avoir un effet majeur sur la survie bactérienne, surtout lorsqu'on s'éloigne des valeurs de température ambiante (20°C). Pour la pasteurisation et la stérilisation, l'association des HP et de la température est souvent l'option la plus appropriée.

5.1. Impact de la température

La combinaison des HP avec des températures comprises entre 40°C et 50°C permet d'augmenter les taux d'inactivation des souches de cellules végétatives pathogènes résistantes aux HP.

Par exemple, un traitement de 400 MPa pendant 15 minutes à 50°C permet d'atteindre 6 réductions log dans de la volaille et 5 réductions log dans du lait pour des *E. coli* O157 : H7 résistants à la pression.⁽¹²⁾

Pour la conservation des aliments sensibles à la chaleur, il est possible d'appliquer les HP pendant la réfrigération pour améliorer l'inactivation des microorganismes. De plus, une température basse aide à mieux retenir les qualités nutritionnelles des aliments crus et permet de maintenir le produit à des températures faibles pendant le traitement post-récolte, la fabrication, le stockage, le transport et la distribution.⁽⁶⁾ Par exemple un traitement de 10 minutes à 10°C entraîne 3 réductions log à 500 MPa pour *Lactobacillus helveticus* et 4 réductions log pour *Pseudomonas fluorescens* à 450 MPa.⁽¹²⁾

Un traitement de 15 minutes à 450 MPa est plus efficace pour inactiver les *L. innocua* dans du lait de brebis à une température de 2°C qu'un traitement à 25°C. Mais un traitement à 50°C reste plus efficace. Les températures supérieures à 70°C sont quant à elles particulièrement efficaces pour aider à atteindre la stérilisation des produits en inactivant les spores.⁽¹⁵⁾

5.2. Cas particulier des bactéries sporulées acidophiles

Dans le cas particulier des bactéries sporulées acidophiles comme *Alicyclobacillus acidoterrestris*, *Clostridium butyricum* et *Bacillus coagulans* qui sont capables de pousser dans des matrices acides et qui résistent à des températures élevées. Il est nécessaire d'utiliser un pH suffisamment faible pour améliorer l'effet des HP mais pas suffisant pour inhiber la germination des spores.

Les spores sont mises à germer à l'aide d'un premier traitement HP pour les rendre plus sensibles. Les spores germées sont ensuite inactivées par un traitement thermique seul ou associé à un second traitement HP.

5.3. Augmentation de la température due à la pression

Lorsqu'elle est mise sous pression, l'eau pure se réchauffe d'environ 2°C tous les 100 MPa.

Cependant, l'augmentation de la température d'un produit dépend de sa composition. Elle est en moyenne de 3°C tous 100 MPa, mais si le produit contient beaucoup de matières grasses, comme l'huile d'olive par exemple, cette augmentation peut atteindre 9°C tous les 100 MPa, voir tableau 5.

Tableau 5 : Chaleur de compression mesurée pour des aliments à 25°C avant mise sous pression

Food sample	Temperature increase (°C) per 100 MPa
Whole milk	3.2
Tofu	3.1
Mashed potato	3.0
Yoghurt	3.1
Honey	3.2
Beef ground	3.2
Chicken breast	3.1
Salmon	3.0
Egg albumin	3.0
Egg yolk	4.4
Egg whole	3.3
Mayonnaise	7.2–5.3 ^a
Olive oil	8.7–6.3 ^a

^a Substances exhibited decreasing adiabatic heating as pressure increased (Patazca, Koutchma, & Balasubramaniam, 2007; Rasanayagam et al., 2003; Ting et al., 2002).

Source: Georget E, Sevenich R, Reineke K, et al (2015) Inactivation of microorganisms by high isostatic pressure processing in complex matrices: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 27:1–14.

5.4. Stérilisation par les HP associées à la chaleur

En mettant à profit l'augmentation de la température due à la pression vue précédemment, il est possible d'utiliser la chaleur de compression pour atteindre les valeurs du barème de traitement thermique. Par exemple, pour des produits initialement à une température de 90°C, il est possible de leur faire atteindre la température cible de stérilisation de 121°C en augmentant la pression jusqu'à 600 MPa.

Cela permet d'associer l'effet des HP et celui de la température pendant la durée du traitement tout en profitant d'une montée et d'une descente en température rapide.⁽³⁾

C'est le principe de la HPTS (High Pressure Thermal Sterilization) et de la PATS (pressure-assisted thermal sterilization) autorisée aux Etats-Unis par la FDA en 2009. Elle consomme moins d'énergie que la stérilisation en autoclave ou en tunnel et se compose de 6 étapes ⁽⁸⁾ :

- conditionnement sous vide et chargement des produits à traiter
- préchauffage de l'eau de l'enceinte jusqu'à la température cible
- équilibrage du produit à sa température initiale
- compression et montée en température du produit
- décompression et diminution de la température du produit
- refroidissement du produit traité

Lorsque la montée en température du produit est adiabatique, c'est à dire qu'elle se fait sans échange de chaleur entre le produit et l'extérieur, les produits retrouvent leur température initiale après la décompression.

Cependant, en conditions réelles, il y a des échanges de température qui se font au niveau de la paroi du récipient de mise sous pression, on observe alors une modification de la température du produit.

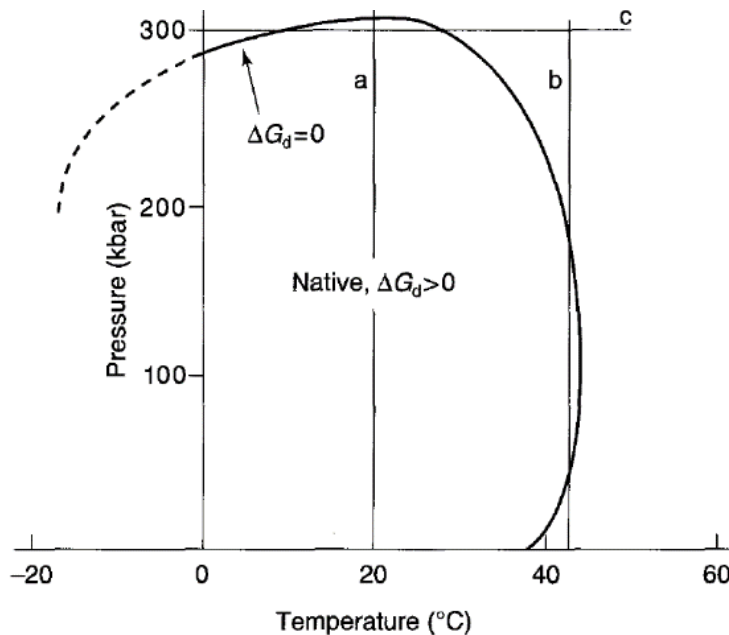
Pour éviter ces modifications de température, les parois doivent être maintenues à la température désirée, par exemple en faisant circuler du liquide à l'intérieur des doubles parois ou en maîtrisant la température du fluide transmettant la pression.

5.5. Stabilité des protéines selon la température et la pression

A pression atmosphérique, il est possible de dénaturer les protéines en utilisant des températures élevées, mais ce procédé, souvent utilisé dans l'industrie agroalimentaire, entraîne une perte d'activité le plus souvent irréversible.

Lorsqu'elles sont soumises aux HP, les protéines se dénaturent pour des valeurs de température plus faibles qu'à pression atmosphérique, voir figure 6.

Figure 6 : *Variation d'enthalpie libre (ΔG_d) de la dénaturation du chymotrypsinogène A en fonction de la température et de la pression*



Source : Mozhaev VV, Heremans K, Frank J, et al (1994) Exploiting the effects of high hydrostatic pressure in biotechnological applications. *Trends in Biotechnology* 12:493–501.

La dénaturation protéique est ainsi minimale à température ambiante, et peut être augmentée par des températures plus élevées ou plus faibles.⁽¹¹⁾

En utilisant des pressions élevées et des températures plus basses, il est même possible d'obtenir une dénaturation protéique réversible.

IV. Utilisation des HP pour détruire les cellules vivantes

On a vu dans la partie "effets de la pression" que les HP ciblent en majorité les protéines, or celles-ci sont les constituants principaux des cellules.

1. Effets cellulaires d'un traitement HP :

A cause de leurs effets sur les protéines, les HP peuvent inhiber les réactions enzymatiques, notamment celles permettant de fournir de l'énergie nécessaire au métabolisme des cellules.⁽¹⁷⁾

Elles peuvent aussi inhiber les réactions impliquées dans les étapes de la réplication, de la transcription et de la synthèse protéique et ainsi perturber les fonctions cellulaires. Certains scientifiques ont émis l'hypothèse que les HP font se rencontrer des endonucléases et l'ADN ce qui provoque sa digestion enzymatique.⁽¹²⁾

Les fonctions cellulaires sont altérées lorsque les enzymes cruciales sont inactivées ou lorsque la sélectivité membranaire est compromise. Les HP inactivent les cellules au long terme lorsqu'elles interrompent les fonctions cellulaires responsables de la reproduction et de la survie.⁽⁷⁾

1.1. Modification des membranes cellulaires

La membrane cytoplasmique est la structure qui est la plus endommagée par l'action des HP et la perméabilisation de la membrane cellulaire est la cause principale d'inactivation des cellules.

Cette augmentation de la perméabilité de la membrane cellulaire est attribuée à la compression de la bicouche de phospholipides et à la cristallisation des acides gras qui la composent.^(15,21)

En cela, l'action des HP sur les membranes est semblable à celui des basses températures, car elles stabilisent l'état cristallin de la matrice lipidique.

Les HP entraînent des modifications physiques qui mènent généralement à la fragilisation des interactions protéines-lipides et peuvent entraîner la libération des protéines membranaires, qu'elles soient transmembranaires ou périphériques.⁽¹¹⁾

L'augmentation de la perméabilité cellulaire provoque la fuite de solutés, de matériel intracellulaire comme l'ATP et de substances absorbant dans les UV.⁽¹⁵⁾

Les HP endommagent la structure de la membrane des m.o. et peuvent y inclure des molécules différentes, perturbant ainsi les phénomènes d'absorption des nutriments et la gestion des déchets cellulaires.⁽⁷⁾

Pour les cellules végétales et les procaryotes, la compression de la membrane cellulaire entraîne son détachement de la paroi cellulaire, cette seconde étant moins déformée par la pression.

1.2. Modification de morphologie

Les HP peuvent entraîner un changement de morphologie de la cellule, par exemple un allongement des cellules. Celui-ci est réversible à des HP faibles mais est irréversible pour des HP élevées.⁽¹⁵⁾

Des travaux réalisés sur des microorganismes pathogènes comme *E. coli* et *Listeria monocytogenes* ont montré que les HP entraînent une activation des gènes impliqués dans l'élongation cellulaire et du développement du septum.

Pour *Saccharomyces cerevisiae*, des pressions de 400 MPa ont entraîné une déformation de la structure cellulaire et des organites cytoplasmique. Elles ont également provoqué une fuite de matériel intracellulaire. A 500 MPa la quasi-totalité du contenu intracellulaire a quitté la cellule et le noyau peut plus être distingué.

Chez *Weissella viridescens*, un traitement HP de 400 MPa pendant 5 minutes à 25°C provoque la création de cavités, visibles au microscope électronique à transmission, entre la membrane cytoplasmique et la paroi cellulaire. Avec un microscope électronique à balayage, il est possible d'apercevoir également des nœuds au niveau de la paroi cellulaire après ce traitement HP.⁽¹²⁾

1.3. Modification des organites

Les HP entraînent la dissociation des ribosomes et une diminution de leur nombre.⁽²²⁾ Ceux-ci sont également déstabilisés par la diminution de la concentration en magnésium due à la fuite de solutés provoquée par l'augmentation de la perméabilité cellulaire et à l'effet de la compression des cellules.⁽¹⁵⁾

Chez les cellules végétales, la pression entraîne aussi la compression des vacuoles gazeuses.

1.4. Modification de la croissance

Un traitement de 400 MPa permet généralement d'inactiver ou de ralentir significativement la croissance des m.o. et donc d'augmenter la durée de conservation des produits.

Le stress provoqué par les HP sur les bactéries se traduit, pendant le stockage des produits traités, par une phase de latence allongée par rapport aux témoins non traités par les HP. Cette phase précède une reprise de la croissance bactérienne qui peut être plus ou moins nette.⁽⁸⁾

1.5. Modification de l'expression des gènes

Des travaux réalisés sur des microorganismes pathogènes comme *E. coli*, *Listeria monocytogenes* et des bactéries lactiques comme *Lactobacillus sanfranciscensis* ont mis en lumière que les cellules peuvent répondre aux HP par la différenciation ou par la transposition.

Ils ont montré que les HP provoquent un stress oxydant et activent la voie de signalisation du stress thermique, la réponse SOS et qu'elles entraînent une up-régulation des gènes de chimiotaxie, du système des phosphotransférase nécessaire à l'assimilation du sucre par les bactéries et du système flagellaire.⁽¹⁵⁾

2. Efficacité contre les cellules eucaryotes :

Les cellules eucaryotes peuvent être inactivées en suivant deux voies principales.

Un traitement HP de l'ordre de 200 MPa provoque la mort cellulaire par la voie de l'apoptose. Alors qu'un traitement réalisé à des pressions supérieures à 300 MPa entraîne généralement la mort des cellules de mammifères par une voie semblable à la nécrose.⁽⁵⁾

2.1. Destruction (ex vivo) des cellules cancéreuses

Une autre application possible des HP est la dévitalisation des segments osseux, atteints par un agent infectieux ou par des cellules tumorales, avant leur réimplantation.

Par exemple un traitement *ex vivo* de 300 MPa pendant 10 minutes réalisé sur un segment d'os atteint par une tumeur a permis d'inactiver totalement l'ensemble des cellules de l'os, dont les cellules cancéreuses, sans affecter la stabilité ou les propriétés biomécaniques de l'autogreffe.

En orthopédie, l'utilisation des HP pour la stérilisation a été considérée plus avantageuse que les alternatives traditionnelles d'autoclavage ou d'irradiation.⁽⁵⁾

3. Inactivation des micro-organismes :

Tous les m.o. n'ont pas la même sensibilité aux HP, mais la plupart des m.o. vivant à pression atmosphérique arrêtent de se développer de façon progressive entre 40 et 50 MPa. Les HP détruisent la plupart des cellules végétatives dont les pathogènes, ainsi que les levures et les moisissures qui peuvent être inactivées à des pressions comprises entre 300 et 600 MPa.⁽⁶⁾ Les bactéries et les virus font l'objet d'un chapitre séparé, et davantage de résultats peuvent être retrouvés en annexe à la fin de ce document.

3.1. Sensibilité des microorganismes en règle générale

- les cellules procaryotes sont plus résistantes que les cellules eucaryotes
- les bactéries sont plus résistantes que les levures et les moisissures
- les endospores sont plus résistantes que les cellules végétatives
- les coques sont plus résistants que les bacilles
- les bactéries à Gram positif sont plus résistantes que celles à Gram négatif

Font exception à ces règles générales : les ascospores des moisissures comme *Byssoschlamys*, *Neosartorya* et *Talaromyces* qui sont généralement très résistantes aux HP.⁽⁸⁾

Les cellules en phase stationnaire de croissance sont généralement plus résistantes aux HP, car leur membrane plasmique aurait des protéines différentes les protégeant des conditions défavorables comme la chaleur, les fortes concentrations en sel et le stress oxydant.^(12,15)

4. Efficacité contre les bactéries :

Parmi les bactéries responsables d'intoxication alimentaire, celles faisant l'objet du plus grand nombre d'études sont : *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Vibrio spp.*, *Salmonella spp.* et *Escherichia coli O157:H7*.⁽¹⁵⁾

4.1. Les bactéries barophiles

De nombreuses bactéries sont capables de pousser lentement à des pressions de 60 MPa, mais au delà de cette valeur la synthèse protéique est bloquée et le cytoplasme se désorganise. Or, plus de 70% de la surface de la Terre est recouverte d'eau, la majeure partie des organismes vivants doivent donc être capables de résister à des pressions hydrostatiques élevées ainsi qu'à des températures basses pour survivre.

Les m.o. piézophiles que l'on retrouve dans les profondeurs des océans ou dans le sol se sont adaptés pour croître à des pressions allant jusqu'à 100 MPa ou plus.

Ces m.o. sont une source d'enzymes résistantes aux HP ainsi qu'une mine d'informations sur les adaptations structurelles nécessaires aux mésophiles pour supporter les HP.⁽⁵⁾

La première bactérie barophile, c'est-à-dire ayant un optimum de croissance pour des pressions supérieures à 40 MPa, a été isolée en 1979 et la caractérisation moléculaire des bactéries pélagiques a commencé dans les années 1980.

La température du fond des océans n'est pas forcément froide. En effet, les fumeurs noirs retrouvés au niveau des dorsales océaniques rejettent de l'eau à 300°C, notons que celle-ci reste à l'état liquide car les pressions hydrostatiques sont très élevées. On retrouve à proximité de ces fumeurs noirs des bactéries extrémophiles capables de pousser à des températures de 105°C et des pressions de 20 à 40 MPa.⁽¹¹⁾

Pour pouvoir croître malgré la pression, les bactéries doivent synthétiser des protéines particulières résistantes à la pression et notamment des porines ainsi que des enzymes restant actives malgré des pressions élevées.

4.2. Les spores bactériennes

Les spores bactériennes sont très résistantes aux HP et il est souvent nécessaire de les faire germer pour rendre les HP efficaces.

La germination peut être provoquée par la chaleur ou bien être directement initiée par les HP, on parlera alors de traitement cyclique.⁽¹¹⁾

La résistance particulière de certaines spores bactériennes à la pression et à la chaleur oblige parfois à associer ces deux paramètres pour atteindre une inactivation satisfaisante.⁽¹⁷⁾

4.3. Résistances accrues de certaines souches non sporulées

Certaines souches bactériennes végétatives sont capables de résister à des pressions supérieures à 800 MPa et font exception à la règle générale de sensibilité des m.o. à l'effet des HP. En effet, certaines souches de *E. coli* sont extrêmement résistantes aux HP malgré le fait que ce sont des bacilles à Gram négatif.^(17,23)

Par exemple, certaines souches de *E. coli* O157 :H7 peuvent survivre à 30 minutes de traitement à 500 MPa.⁽¹²⁾

On peut ainsi ajouter à la règle de résistance des m.o. que la flore mésophile aérobie est la plus sensible aux HP, puis vient la flore lactique et que les *Enterobacteriaceae* sont les plus résistantes aux HP.

5. Efficacité contre les virus :

Les virus sont très sensibles à la pression, par exemple de bons résultats ont été obtenus sur les virus responsables de l'herpès et de l'immunodéficience avec des HP modérées (100–300 MPa).

Il a été proposé d'utiliser les HP *ex vivo* pour faire diminuer les concentrations virales dans le sang des patients souffrant d'une infection virale sévère comme le SIDA.

5.1. Les protéines du manteau viral et de l'enveloppe

Le HPP peut entraîner de légers changements de conformation, dans les protéines du manteau viral et/ou des glycoprotéines de l'enveloppe, qui ont normalement lieu lorsque la particule virale se lie à son récepteur cellulaire.

Le changement de conformation prématuré de ces protéines virales vers l'état actif de fusion les bloque dans une conformation les empêchant de se lier à leur récepteur cellulaire et empêche l'endocytose et donc l'infection virale.⁽⁵⁾

5.2. Suppression de l'infectivité

Par sa capacité à dissocier de façon réversible les protéines oligomériques, l'application d'un traitement HP modéré comme méthode alternative pour l'inactivation des virus a été étudié pour le développement de vaccins viraux.

L'hypothèse de départ est que la dissociation réversible des protéines de la capside virale génère une particule virale incorrectement assemblée, ayant une infectivité réduite, qui conserve la même immunogénicité que le virus non traité.

Cette méthode serait beaucoup plus avantageuse que les méthodes traditionnelles d'inactivation des virus basées sur l'utilisation d'agents chimiques toxiques comme le formol ou l'aziridine ou sur l'irradiation. En effet ces méthodes entraînent la dégradation des épitopes et par conséquent réduisent l'immunogénicité des virus.

Il est tout de même possible d'associer les HP à l'urée pour faciliter le désassemblage à basse température des virus dans les produits biologiques. L'urée est alors utilisée à une concentration de 1M, qui est nettement inférieure à celle utilisée pour les méthodes traditionnelles. Dans ce cas, un traitement HP de 250 MPa, en présence d'urée et à une température de -15°C a permis de supprimer totalement l'infectivité du virus de la fièvre aphteuse sans effet délétère sur la structure de la capside. De plus, son immunogénicité testée sur des lapins est identique à celle du virus non traité. Ce vaccin a donc été proposé comme une alternative au virus traité à l'aziridine utilisé actuellement.

Un traitement HP de 3 heures à 310 MPa et à 4°C a permis d'inactiver complètement une suspension du virus de la fièvre jaune à une concentration de 10^7 UFP. Des souris vaccinées avec ce virus inactivé par les HP ont montré par la suite une protection humorale parfaitement efficace après l'injection d'une dose létale de virus vivant de la souche 17DD.

L'infectivité de souches de VIH-1 conservées en laboratoire peut également être supprimée par un traitement HP de 200 MPa à 0°C par la méthode appelée "freeze pressure generation".⁽⁵⁾

6. Efficacité contre les autres agents pathogènes :

6.1. Plaques amyloïdes

L'utilisation des HP pour dissocier les plaques amyloïdes, agrégats protéiques fibreux associés à plusieurs maladies invalidantes comme la maladie d'Alzheimer, de Parkinson ou l'encéphalopathie spongiforme bovine, a été étudiée.

Cette dernière pathologie implique un prion, et plus précisément d'une protéine qui est passée de la forme PrP^C normale à la forme PRP^{Sc} (Sc pour scrapie) qui cause une maladie proche de la maladie de Creutzfeldt-Jakob.

Ces plaques amyloïdes sont extrêmement thermorésistantes mais l'association d'une température de 60°C avec des HP supérieures à 500 MPa a rendu les isoformes PRP^{Sc} significativement moins infectieux, ce traitement les rend également moins résistants à l'activité de la protéinase K. On suppose que cela est dû à la dissociation des agrégats infectieux.⁽⁵⁾

Les agents transmissibles non conventionnels comme les prions sont cependant extrêmement stables. En effet, pour obtenir l'inactivation complète du prion responsable de l'encéphalopathie spongiforme chez le hamster, il faudrait utiliser des pressions supérieures à 10 000 MPa.

Concrètement, les valeurs de pression nécessaires pour débarrasser un échantillon de ses prions sont le plus souvent trop élevées pour que la technique soit applicable de façon commercialement avantageuse.⁽¹⁷⁾

V. Traitement HP des produits alimentaires

En 2012, on comptabilisait dans le monde entier 350 000 tonnes de produits traités par les HP, dont 28% de produits dérivés de fruit ou de légumes, 26% de produits carnés, 15% de produits de la mer et 14% de jus et de boissons, voir figure 2.⁽²²⁾

En 2015 on comptait plus de 350 enceintes HP de taille industrielle dans le monde, avec plus de la moitié des équipements HP qui se trouvent en Amérique du Nord ou au Mexique.⁽⁸⁾

Cette engouement pour les HP aux Etats-Unis est motivé par la forte prévalence des toxi-infections alimentaires. Les centres responsables du contrôle des maladies (centers for disease control and prevention) estiment que le nombre de toxi-infections s'élève à 70 millions par an, causant 300 000 hospitalisations et 5 000 morts aux Etats-Unis.⁽⁷⁾

L'Europe représente quant à elle le second plus gros marché pour les produits traités par les HP, principalement en Espagne, en Italie, en France et en Grèce. Au sein de l'Union européenne, la première mention d'aliments traités par les HP apparaît le 23 mai 2001 suite à une demande présentée par le groupe Danone à l'AFSSA en décembre 1998, conformément au règlement (CE) n°258/97 sur les nouveaux aliments. Les produits concernés par cette demande sont des préparations de fruits (abricots, ananas, bananes, cerises, figues...) pasteurisés par les hautes pressions.⁽²⁴⁾

1. Les produits dérivés des fruits et des légumes :

Ils représentent une grosse partie des produits traités chaque année par les HP. On les retrouve à l'état de fruits et légumes entiers ou tranchés, de purées, de confitures, de jus ou de soupes.

1.1. Historique

La compagnie Medi-Ya au Japon a lancé, au début des années 90, une gamme de confitures acides traitées par les HP qui a été une des premières applications commerciales de cette technologie.⁽¹⁵⁾

A présent au Japon se sont des confitures, des préparations à base de fruit, des jus de fruits et des gâteaux de riz qui sont traités quotidiennement par les HP.⁽⁶⁾

En France, des jus de fruit traités par la pasteurisation à froid sont disponibles, notamment du jus d'orange et du jus de raisin depuis 1994. Des jus de fruits et de légumes ainsi que des smoothies sont commercialisés sous la marque Ulti et la marque Pampryl.^(12,22,25,26)

La marque Evolution fresh, rachetée par Starbucks en 2011, propose des jus de fruits réfrigérés commercialisés en Californie et en Arizona depuis 1995 et traités par les HP à 500 MPa.

Aux Etats-Unis, la marque Garden Fresh Market propose aux particuliers, aux épiceries et aux restaurants de la sauce salsa, houmous et guacamole, traités par les HP et d'une qualité sensorielle supérieure à celle des produits traités par des techniques conventionnelles.⁽²⁷⁾

1.2. La flore contaminante

Utiliser les HP pour le traitement des produits à base de fruits se montre souvent efficace et elles sont donc largement utilisées. En effet, les fruits sont majoritairement contaminés par des levures et des m.o. sensibles aux HP ce qui explique que les résultats d'inactivation sont plutôt bons même pour des traitements HP à température ambiante.

Les levures ne sont pas associées à des toxi-infections alimentaires mais sont très souvent impliquées dans les dégradations de produits alimentaires et particulièrement des aliments acides issus de la filière fruits et légumes. Il est possible d'utiliser les HP sur les produits à base de fruit pour améliorer leur qualité microbiologique.

Le traitement HP des légumes pose davantage de problèmes car leur pH est généralement plus élevé et car ils sont contaminés par des m.o. sporulés plus résistants aux HP.

1.3. Les traitements HP

Les jus de fruit et les confitures sont généralement traités à 400 MPa pendant 5 minutes à température ambiante. Pour ce barème de traitement, le nombre de levures et de moisissures présentes dans le produit est réduit de façon significative et la durée de conservation à 4°C est prolongée à 30 jours.⁽¹²⁾

Une étude réalisée sur du jus d'ananas a montré que 15 minutes de traitement à 600 MPa et à 80°C permet de réduire de 5,7 log une population de *Byssochlamys nivea*.⁽²⁸⁾

Une réduction de 5 log a également été obtenue par un traitement de 400 MPa à température ambiante (21°C) sur des *Saccharomyces cerevisiae* et des *Aspergillus flavus* dans du jus de pomme et de brocoli.⁽²⁹⁾

1.4. Les produits peu acides et issus de légumes : exemple du jus de carotte

Le jus de carotte est classé parmi les aliments peu acides, son pH est compris entre 6 et 6,5. Sa flore d'altération est naturellement très nombreuse, entre 10⁵ et 10⁶ UFC/ml et se compose au trois quarts de bactéries à Gram négatif appartenant aux genres *Pantoea*, *Erwinia* et *Pseudomonas*.⁽¹²⁾

Soumettre les carottes à un traitement HP permet de détruire les bactéries sensibles mais sélectionne les bactéries sporulées des genres *Paenibacillus* et *Bacillus* qui représentent 84% de la flore après 1 minute de traitement à 20°C à 600 MPa.

Lorsqu'on se concentre sur la flore pathogène, traiter du jus de carotte à 615 MPa et 15°C pendant 2 minutes permet d'inactiver 6,4 log de *Escherichia coli* O157 :H7 et de 5,1 à 7,8 log de *Salmonella*, selon le sérovar concerné.

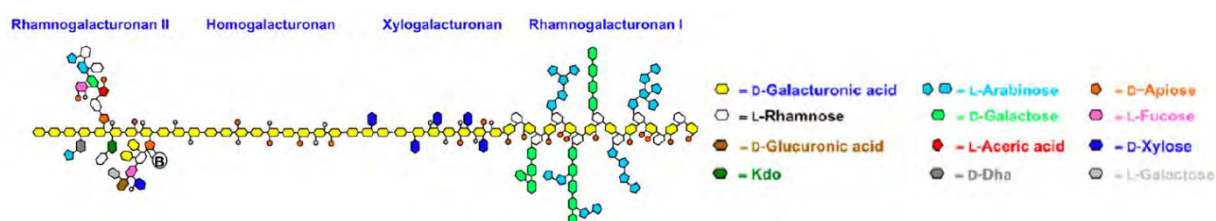
En appliquant la technologie Hurdle sur des spores de *Bacillus licheniformis*, les résultats d'inactivation sont meilleurs lorsque le produit a été acidifié et/ou à 60°C puisqu'elles sont inactivées en moins de 10 minutes.⁽³⁰⁾

1.5. L'apparence

Contrairement au traitement thermique, un traitement HP ne modifiera pas beaucoup la couleur des produits issus de la filière fruits et légumes. Par exemple, un traitement thermique détruit les caroténoïdes contrairement à un traitement HP de 600 MPa pendant 6 minutes à température ambiante. Ils inactivent aussi la lipoxygénase.

En ce qui concerne la texture, elle est principalement due à la pectine qui est un polysaccharide rattaché à la grande famille des glucides. Elle est constituée d'une longue chaîne d'acide D- galacturonique et de ramifications, voir figure 7.

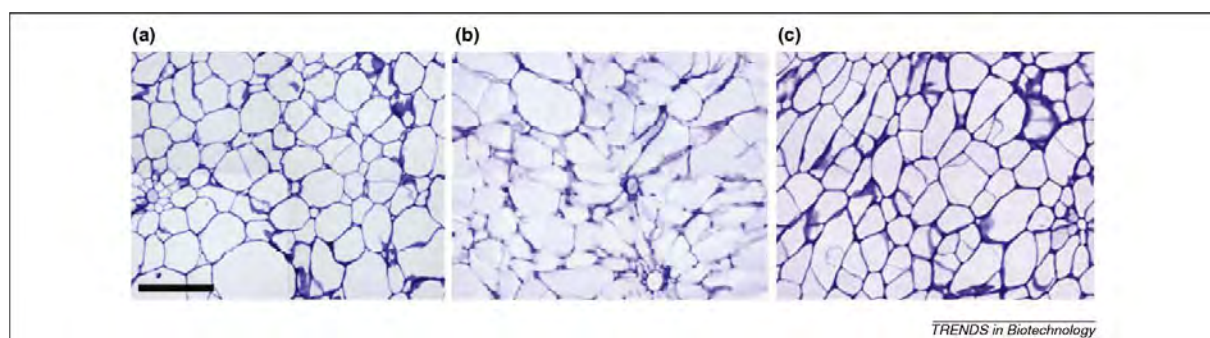
Figure 7 : Structure moléculaire de la pectine



Source : Harholt J, Suttangkakul A, Vibe Scheller H (2010) Biosynthesis of Pectin. *Plant Physiol* 153:384–395.

Lors des traitements thermiques, la pectine des fruits et des légumes est dégradée rapidement, voir figure 8. Cela entraîne une diminution de l'adhésion entre les cellules et le ramollissement des tissus issus de végétaux.

Figure 8 : Effet d'un pré-traitement HP sur la structure de la paroi de tissu de carotte après un traitement thermique



Source : Aertsen A, Meersman F, Hendrickx MEG, et al (2009) Biotechnology under high pressure: applications and implications. *Trends in Biotechnology* 27:434–441.

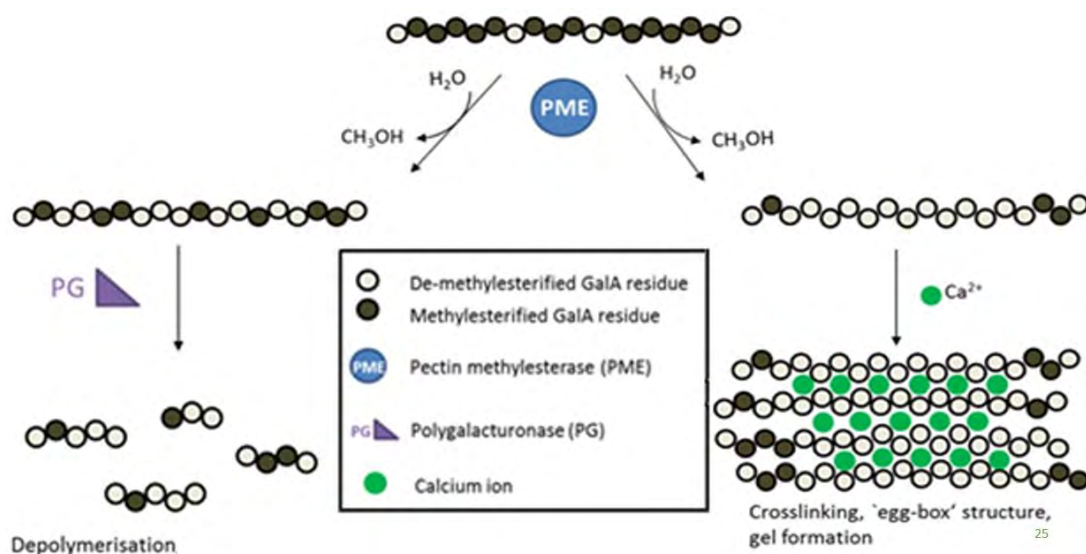
Comme on peut le voir sur ces images de microscopie optique de tissu de carotte, les parois cellulaires sont fortement dégradées après 2 heures de cuisson à 100°C et en l'absence de pré-traitement HP (image b).

En revanche, lorsque les carottes ont été préalablement soumises à une pression de 400 MPa et à 60°C pendant 15 minutes, la paroi des cellules est mieux conservée après la cuisson.

Les enzymes responsables de la modification de la pectine dans les fruits et les légumes sont la pectine méthylestérase (PME) et la polygalacturonase (PG). Lors d'un traitement thermique, la PME est détruite alors que la PG conserve son activité, cela entraîne la segmentation des chaînes de pectine et la diminution de la viscosité des jus et des purées de fruits et de légumes, voir figure 9.

La PME en revanche est plus résistante à la pression que la PG donc traiter les fruits et les légumes par les HP permet de conserver l'étape de déméthoxylation de la pectine métabolisée par la PME tout en supprimant l'étape suivante de dépolymérisation par la PG.⁽⁵⁾

Figure 9 : Déméthoxylation de la pectine



Source : https://mdpi.com/ijms/ijms-19-02878/article_deploy/html/images/ijms-19-02878-g001.png.

Or, Le degré de métoxylation plus faible des polymères de pectine carboxylée leur confère la capacité de fixer les cations divalents comme le calcium. Cela permet d'obtenir un assemblage supramoléculaire de pectine plus rigide qui résistera mieux au traitement thermique. Un pré-traitement par les HP peut donc permettre de fortifier les tissus cellulaires végétaux avant leur traitement thermique et d'éviter leur dégradation pendant le procédé de transformation des fruits et légumes et augmente la viscosité des produits.

2. Les produits de la pêche :

Consommés crus ou peu cuits, les produits de la mer causent une large proportion des toxi-infections alimentaires car ils sont une source potentielle de *Vibrio*, *Salmonella*, *Clostridium*, *Listeria*, *Escherichia coli* et de toxines.

La pasteurisation thermique classique ne peut pas être utilisée sur la plupart des produits de la mer car elle a un effet délétère sur l'apparence et le goût de ces produits. Il n'y a en revanche aucune contre-indication à l'utilisation des HP, qui permettent d'augmenter la durée de conservation de ces produits en détruisant les m.o. qui les contaminent, sans modifier leur goût de façon significative.

2.1. Les huîtres

Les HP ont initialement été utilisées pour éliminer les *Vibrio* spp que l'on peut retrouver dans les huîtres. En effet, elles se consomment crues ou peu cuites et ne peuvent donc pas être traitées par la chaleur. On compte pas moins de cinq espèces de *Vibrio* associées à des problèmes de toxi-infections alimentaires dus à la consommation d'huître qui sont : *V. cholerae*, *V. parahaemolyticus*, *V. vulnificus*, *V. mimicus* et *V. hollisae*.⁽³¹⁾

Un traitement HP à température ambiante de 250 à 350 MPa pendant 1 à 3 minutes suffit pour éliminer ce pathogène particulièrement sensible aux HP. Un traitement HP de 300 MPa pendant 3 minutes à 10°C permet de réduire de 5 log la population de *Vibrio parahaemolyticus* O3: K6 dans des huîtres.⁽¹²⁾

Ainsi, le HPP permet d'améliorer la qualité microbiologique des huîtres et leur durée de conservation à 3 semaines à 4°C et les rendements de production de 25% sans causer de modifications significatives de la qualité sensorielle des huîtres.⁽¹⁵⁾

Des entreprises américaines se sont spécialisées dans le commerce des huîtres traitées par les HP, on retrouve deux sortes de produits radicalement différents. Les huîtres ouvertes et décortiquées sont vendues au poids uniquement pour leur chair et les huîtres de qualité supérieure qui sont, quant à elles, commercialisées dans leur coquille. Ces huîtres sont préalablement entourées par une bande plastique pour

éviter qu'elles ne s'ouvrent pendant le traitement HP.⁽¹²⁾ Une marque américaine appelée Gold Band Oysters® commercialise des huîtres entières traitées par les HP et entourées par une bande en plastique dorée pour les maintenir fermées pendant le jusqu'à leur consommation.⁽³²⁾

2.2. Décorticage des coquillages et des crustacés

Les HP permettent également de faciliter le décorticage des coquillages et des crustacés. En effet, la carapace et la coquille sont peu déformées par les HP alors que la chair qui se trouve à l'intérieur est comprimée, entraînant ainsi détachement de la chair de l'animal.

Les HP permettent aussi de dénaturer le muscle adducteur des coquillages ce qui permet de les ouvrir plus facilement pour utiliser leur chair. Elles augmentent également le rendement de l'extraction de la chair des crustacés.^(7,13)

Au Japon, les HP sont utilisées sur diverses espèces de coquillages comme les moules, les palourdes et les coquilles Saint-Jacques ainsi que sur des crustacés comme les homards, les langoustines et les crabes. Elles permettent de réduire le coût de main d'œuvre et les risques de blessure liés au décorticage manuel, tout en améliorant la qualité microbiologique des produits, ce qui explique le succès de cette technologie.⁽¹⁵⁾

2.3. Les traitements HP

Lorsqu'elles sont utilisées sur du saumon fumé, les HP (250 MPa à 3°C ou à 25°C) permettent d'allonger la durée de conservation à 8 semaines.

Sur des calamars crus, un traitement HP de 200 à 400 MPa permet de ralentir l'activité autolytique, la croissance microbienne et la formation de triméthylamine.

Traiter des crevettes à 435 MPa permet de les raffermir et d'allonger la durée de conservation de 5 jours à 15 jours. Les parasites, comme l'anisakis retrouvé dans la chair des poissons crus, sont quant à eux éliminés à une pression relativement faible.⁽⁷⁾

Parmi les différents produits traités par les HPP en France, on retrouve des filets de poisson sans conservateurs conditionnés crus et en barquette (bar, cabillaud, maquereaux, rouget) et traités à 500 MPa, commercialisés par l'entreprise Delpierre depuis 2015.⁽³³⁾

Les HP permettent également de réduire la formation d'amines biogènes pendant le stockage des produits alimentaires. Du point de vue de la santé publique, 102 cas d'intoxication à l'histamine ont été recensés en France en 2020.⁽¹⁾

3. Les produits carnés :

Le marché européen des produits carnés traités par les HP comprend du jambon cru, du chorizo et différents types de saucisses ainsi que des plats préparés contenant du poulet ou du porc.

Elles ont comme autre avantage de permettre de diminuer la teneur en sel des charcuteries (jambon cru, sec ou fumé) de 1% sans modification de leur goût salé.

3.1. Les traitements HP

Pour respecter les critères de qualité microbiologique et sensorielle imposés, l'IFIP (Institut français du porc) recommande une durée de traitement HP comprise entre 2 et 8 minutes à une pression comprise entre 200 et 800 MPa.⁽⁸⁾

Les tranches de jambon cuit et autres charcuteries peuvent être traitées efficacement par les HP en quelques minutes à 500 MPa. Dans les challenge-tests réalisés sur du jambon sec, un traitement de 500 MPa a permis d'atteindre 5 réductions log pour *Listeria monocytogenes* et sa durée de conservation au réfrigérateur est étendue à 60 jours.

Associer un traitement HP de 600 MPa avec du lactate de potassium permet de réduire davantage la flore bactérienne, d'augmenter la couleur rose, la brillance et la dureté des produits carnés, tout en réduisant leur texture pâteuse et l'adhérence.⁽⁸⁾

3.2. Changement de couleur

Au-delà de 200 MPa, les HP peuvent dénaturer et faire coaguler la myoglobine, ce qui entraîne un blanchiment de la viande crue, faisant croire à tort qu'elle a été cuite. Notons que la congélation protège la viande crue de la perte de couleur provoquée par les HP.⁽⁷⁾

Des pressions supérieures à 500 MPa entraînent une diminution de la proportion d'oxymyoglobine et une augmentation de la proportion de metmyoglobine qui provoque une coloration brune de la viande.

Pour des pressions inférieures à 500 MPa, la teneur en fer non héminique n'augmente pas, mais pour des pressions supérieures la dénaturation de la myoglobine entraîne la libération des ions fer. Or cet ion catalyse des réactions d'oxydation qui accélèrent la détérioration des produits.

Les HP affectent beaucoup moins l'apparence de la viande cuite et des salaisons, elles sont donc plus largement utilisées dans les produits de charcuterie.

Les HP peuvent améliorer la brillance des tranches de charcuterie mais il reste nécessaire de maîtriser cet effet car l'iridescence des produits alimentaires est souvent associée par le consommateur à un développement bactérien et donc à un produit avarié, impropre à la consommation.⁽⁸⁾

3.3. Texture

Les HP peuvent moduler la texture et la rétention en eau de la viande et des produits carnés.⁽⁷⁾

Par exemple pour les boulettes de viande, les HP augmentent la solubilité des protéines myofibrillaires et les liaisons entre les particules de viande ce qui raffermi leur texture globale.⁽¹¹⁾

Cependant, le moment où les HP sont appliquées aux produits joue un rôle majeur dans les effets de celles-ci. Par exemple pour le jambon cuit, le traitement HP de 600 MPa doit être réalisé après la cuisson car sinon il réduit entraîne une trop grande fermeté et une trop grande variation de couleur des jambons et réduit les rendements de cuisson.⁽⁸⁾

3.4. Les produits pré-emballés

La viande commercialisée en tranche ainsi que la viande hachée ont une probabilité élevée d'être contaminée par les pathogènes, c'est pourquoi les HP sont utilisées pour la décontamination des produits en fin de transformation.⁽⁷⁾

Pour les produits de charcuterie cuisinés qui ont un risque de recontamination après fabrication par des pathogènes comme *Listeria monocytogenes*, les HP jouent le rôle d'étape finale de conservation après conditionnement ce qui donne une assurance supplémentaire de la qualité microbiologique du produit fini.⁽¹⁸⁾

Dans la viande de poulet cuite, les HP permettent de détruire *Listeria monocytogenes* et les autres pathogènes non sporulés qui pourraient la contaminer.

4. L'alcool :

4.1. La bière

La bière est la boisson alcoolisée la plus consommée dans le monde et ses propriétés organoleptiques sont améliorées par les HP, sauf par les pressions inférieures à 300 MPa qui ne modifient pas l'amertume de la bière.

Si on compare les effets à long terme de la pasteurisation thermique conventionnelle de la bière blonde avec ceux d'un traitement HP. On remarque que la bière blonde est moins amère et présente un trouble plus important 56 jours après le traitement par les HP (350 MPa à 20°C pendant 3 à 5 minutes) qu'après un traitement thermique de 15 minutes à 60°C.⁽⁷⁾

Ces deux techniques modifient de la même façon le pH, la densité et la couleur de la bière, ainsi que le développement des bactéries lactiques et des bactéries synthétisant de l'acide acétique. Le degré de fermentation et le contenu en éthanol n'est pas modifié par les HP.

Il est possible d'utiliser sur la bière, comme pour les jus de fruits, des pressions comprises entre 400 et 600 MPa. Elles permettent d'éviter les effets négatifs de la chaleur sur les arômes et réduit l'utilisation de sulfites.⁽⁷⁾

Ces barèmes pourraient également être transposés à l'industrie vinicole.

4.2. Le vin

Actuellement, on utilise des sulfites (SO₂) à l'effet conservateur et antioxydant pour contrôler les *Brettanomyces* et éviter la dégradation du vin par les bactéries. Mais les sulfites ont un effet négatif sur la santé humaine, alors qu'un traitement HP est sans effet indésirable connu.

Les techniques traditionnelles pour stabiliser les vins d'un point de vue microbiologique sont la filtration, la pasteurisation classique ou la flash

pasteurisation. Or, celle-ci affectent de façon négative leur qualité sensorielle et réduit la quantité en pigments, en composés volatils et en composés polyphénoliques comme les anthocyanes.

A l'inverse, un traitement HP de 600 MPa pendant 10 minutes à 70°C ne modifie pas la concentration de malvidine-3-O-glucoside qui est l'anthocyane principal du raisin de la variété Dornfelder.

5. Les avantages des produits alimentaires traités par les HP :

Les HP sont un moyen de limiter les modifications indésirables apportées au produits pendant le traitement thermique tels que :

- la perte de couleur
- la perte de saveur
- l'apparition de saveurs désagréables
- la perte de texture
- la perte nutritionnelle

Les méthodes combinant une pression de 600 MPa avec une température comprise entre 60°C et 90°C entraînent la destruction de nombreux m.o., prolongent la durée de conservation des produits et aident à préserver la qualité des produits et leur saveur.

Parmi les différentes méthodes de conservation des aliments (thermique, chimique, irradiation...) les HP sont considérées comme ayant plus de potentiel pour préserver les caractéristiques des aliments.

En effet, les HP n'affectent pas les liaisons covalentes donc les molécules responsables de la valeur nutritionnelle et organoleptique des aliments ne sont pas détruites pendant le HPP. L'utilisation des HP dans l'industrie agroalimentaire permet ainsi de mieux conserver les saveurs et la couleur des aliments ainsi que les molécules d'intérêt de santé comme les vitamines.

C'est pourquoi les aliments traités par les HP peuvent être valorisés comme aliments à haute valeur ajoutée.⁽¹¹⁾

5.1. La flaveur

Les HP diminuent la capacité de fixation en eau des aliments et libèrent les ions sodium fixés aux protéines. Les HP augmentent donc la disponibilité des composants responsables du goût et de l'arôme, ce qui amplifie la perception du goût et la flaveur des aliments.

Ainsi, les HP permettent de réduire l'ajout de sel dans les aliments, ce qui a un effet positif sur l'impact des maladies cardio-vasculaires, sans en affecter le goût ni leur qualité et sans compromettre la sécurité sanitaire des aliments.

En empêchant la réaction de Maillard, responsable de la formation de composés volatils associés à l'odeur et la saveur des produits cuits, un traitement HP permet de conserver la saveur des produits frais et crus.⁽³⁾

On remarque que la saveur des denrées alimentaires emballées prêtes à consommer et des préparations surgelées est altérée lorsque ceux-ci sont réchauffés. Or, un traitement HP réalisé sur le produit fini et emballé permet d'éviter cet inconvénient.⁽⁷⁾

5.2. La conservation

Pendant le stockage des aliments, on peut observer des modifications causées par des réactions d'oxydation dues à des enzymes ou des m.o. inactivées de façon partielle par le traitement HP.⁽⁷⁾

La peroxydase est une enzyme ubiquitaire dans les cellules végétales qui entraîne, avec la polyphénol-oxydase, des changements de couleur, de texture et de goût pendant le stockage des produits à base de légumes.⁽³⁴⁾

Or, la peroxydase est partiellement inactivée par un traitement HP de 400 à 800 MPa, il est donc parfois nécessaire de réfrigérer les produits pendant leur stockage pour compenser cette inactivation partielle des peroxydases et éviter l'apparition d'odeur ou de goût désagréable causé par le rancissement des lipides, la lipolyse des lipides et l'oxydation des acides gras.

5.3. La valeur nutritive

La plupart des produits naturels sont une source de micronutriments et de composés chimiques biologiquement actifs. Or ceux-ci sont le plus souvent détruits par les traitements thermiques classiques.⁽⁷⁾

A l'inverse, les HP permettent de conserver la plupart des nutriments contenus dans les aliments.

De nombreuses vitamines et précurseurs, tels que le β -carotène, la thiamine, la riboflavine, l'acide folique, l'acide ascorbique, le rétinol et les tocophérols résistent à des pressions de 600 à 800 MPa. La biodisponibilité du calcium et du potassium est augmentée par le traitement HP.⁽¹⁷⁾

Les HP permettent donc de préserver, voire d'améliorer, la qualité nutritionnelle des aliments.

5.4. Les aliments santé

Pour finir cette partie sur l'application des HP dans l'agroalimentaire, certains aliments sont naturellement riches en molécules ayant un impact positif sur la santé. Les HP permettent de préserver les molécules d'intérêt des aliments, habituellement détruites par les traitements thermiques, et qui peuvent être mises à profit dans la production d'aliments fonctionnels ou la nutraceutique.

Par exemple, les HP peuvent améliorer la conservation de l'activité antioxydante du gel d'aloès vera, ou l'effet anti-microbien du miel de Manuka, sans effet délétère sur sa qualité.⁽⁷⁾

De plus, les HP permettent de conserver les phytoalexines et la 6-méthoxymelléine qui sont des antimicrobiens que l'on retrouve naturellement dans la carotte.⁽¹²⁾

L'hydrolyse par la myrosinase des glucosinolates présents dans les Brassicaceae permet d'obtenir des isothiocyanates connus pour leur action sur la santé. Par exemple, la glucoraphanine présente dans le jus de brocoli peut être convertie en sulforaphane qui a des propriétés antitumorale et nématocide.

Les peroxydases contenues dans les jus de légumes ont, en plus de leur effet indésirable sur le rancissement des lipides, une activité anti carcinogène. Or elles

résistent à un traitement HP de 600 MPa, et ne sont que partiellement détruites à 800 MPa. Or un traitement de 400 MPa à température ambiante est généralement suffisant pour traiter et stabiliser les produits peu acides, c'est pourquoi l'effet de la peroxydase n'est pas négligeable dans les produits alimentaires dérivés des fruits et des légumes traités par les HP.⁽¹⁷⁾

VI. Autres domaines d'application des HP

Les applications possibles des HP dans les procédés de fabrications sont nombreuses, on compte par exemple : ⁽¹¹⁾

- la modification des protéines
- la modification des changements d'état de la matière
- le dégazage ou la solubilisation du dioxyde de carbone
- l'extraction de certains constituants
- l'agglomération des poudres
- le traitement de surface et imprégnation

1. Biologie cellulaire :

A cause de la force de gravitation, les cellules subissent un stress dû au poids des organismes dont elles font partie. Cela signifie que certaines cellules du corps sont soumises à une pression importante.

Pour se rapprocher des conditions physiologiques de croissance de ces cellules, il est possible de créer des conditions de culture sous pression de manière à améliorer leur développement *in vitro*.

1.1. Synthèse de cartilage hyalin

Le cartilage est un tissu avascularisé, ce qui limite fortement sa capacité de réparation. Le traitement des lésions du cartilage humain nécessite donc la maîtrise de la régénération tissulaire *in vitro*.

Cependant les chondrocytes articulaires, qui synthétisent habituellement le cartilage hyalin, se différencient *in vitro* et se mettent à produire du fibro-cartilage, dépourvu des propriétés biochimiques et structurelles du cartilage hyalin.

La pression supportée par le cartilage dans les articulations synoviales pendant une activité normale atteint 10 MPa. L'application d'une pression mécanique aux chondrocytes en culture semble essentielle pour développer ou maintenir la matrice extracellulaire.

En suivant cette hypothèse, soumettre des chondrocytes à une pression de 10 MPa a permis d'obtenir une matrice de cartilage synthétisée *in vitro* avec des propriétés biomécaniques et biochimiques meilleures que la matrice obtenue à pression atmosphérique. Lorsqu'on compare les caractéristiques de ces deux matrices, la quantité de glycosaminoglycanes et de collagène est plus élevée dans la matrice de collagène obtenue à une pression de 10 MPa.

La réponse cellulaire des chondrocytes aux HP semble induire la synthèse d'un cartilage de meilleur qualité et pouvant se substituer au cartilage articulaire.⁽⁵⁾

1.2. La greffe de peau

La peau est l'organe le plus étendu du corps, elle est constituée de l'épiderme et du derme et protège le corps des variations de température, de la dessiccation et des infections. Or celle-ci peut être lésée au point de nécessiter une reconstitution de peau.

Il est possible de régénérer l'épiderme en mettant en culture des kératinocytes sur une matrice, les plus anciennes étant simplement constituées de collagène elles ont une résistance et une élasticité limitées.

A l'inverse, le derme dé-cellularisé pourrait être la matrice idéale car il possède la structure et les propriétés mécaniques du derme natif. Des études ont été réalisées pour déterminer les pressions permettant d'inactiver les cellules de la peau humaine pour qu'elle soit utilisable pour la reconstruction de peau, mais sans déstabiliser la matrice extracellulaire ni dénaturer excessivement les protéines qui la constitue.

Un traitement HP de 10 minutes à 200 MPa permet d'induire la mort cellulaire par l'inactivation de l'activité mitochondriale et de détruire totalement les cellules de la peau de porc sans endommager la matrice extracellulaire. Le traitement HP des greffes de peau permet d'obtenir une bonne adhésion des cultures d'épiderme sur la matrice obtenue.

Les mêmes auteurs ont également étudié l'utilisation des HP pour détruire les cellules constituant les tissus des valves cardiaques, des vaisseaux sanguins, de la cornée et des os.⁽³⁵⁾

La méthode de dé-cellularisation par les HP représente un avantage par rapport aux méthodes classiques utilisant les solutions hypertoniques, les détergents ou la digestion enzymatique. Elle est plus rapide et permet d'obtenir une meilleure adhésion des cellules épidermiques que le traitement de référence au SDS. En effet celui-ci nécessite plusieurs jours pour l'inactivation cellulaire suivit de plusieurs semaines pour nettoyer les débris cellulaires.

1.3. Ingénierie agronome

Les HP peuvent également être utilisées dans le domaine agronome. Par exemple, il a été montré qu'exposer des graines pendant 15 minutes à une pression de 200 à 400 MPa retarde leur germination.

Des jeunes plants de riz soumis à une pression de 75 MPa pendant 12 heures à permis d'obtenir un meilleur rendement de production.

Les HP pourraient être utilisées pour le « planta genetagging » du riz, car c'est une technique simple et efficace qui ne nécessite pas de culture cellulaire ni d'irradiation. En effet, un élément transposable (transposon) mPing présent dans le génome des plants de riz est mobilisé après un traitement HP 15 à 60 minutes à 100 MPa, ce qui entraîne un phénotype différent.⁽⁵⁾

2. Le traitement du plasma :

2.1. Les enjeux

Les transfusions sanguines peuvent entraîner la transmission de maladies, comme syphilis, le paludisme, l'hépatite virale, la mononucléose infectieuse, le VIH ou la maladie de Chagas. Pour réduire ce risque les dons de sang sont testés et sélectionnés.

Pour chaque don de sang, il faut confirmer l'absence d'anticorps spécifique à l'agent infectieux, cependant ce n'est pas une garantie de l'absence de pathogène. En effet, il existe une période fenêtre entre l'entrée des m.o. dans l'organisme et le début de

la réponse immunitaire, la séroconversion étant causée par la production des anticorps spécifiques.

Pour permettre de diagnostiquer l'infection plus rapidement et donc de réduire le risque de transmission des maladies il est conseillé de réaliser le test des acides nucléiques (NAT) qui permet de détecter des séquences d'acides nucléiques spécifiques à une espèce ou sous espèce de m.o.

Cependant la mise en place d'un test efficace pour la détection des pathogènes est longue et on observe fréquemment un délai de plusieurs années entre l'émergence d'une infection transmissible par transfusion (TTID) et la validation d'une stratégie préventive efficace.⁽²³⁾

2.2. Outils de réduction de la charge microbienne du plasma

Les outils permettant de réduire la charge microbienne représentent une sécurité supplémentaire permettant de réduire le risque de TTID dans certains composants sanguins. Ces outils peuvent être classés dans 3 catégories dont chacune a ses limites :

- les traitements physiques : traitement thermique et nanofiltration
- les traitements chimiques : solvants détergents
- les traitements photochimiques : bleu de méthylène, riboflavine, psoralène

Le HPP pourrait également servir à la décontamination des produits thérapeutiques biologiques tels que le sérum, les produits dérivés du sang et les vaccins. Les guidelines imposent 4 réductions log du nombre de pathogènes présents dans le sang. Cependant il est primordial de trouver le juste équilibre entre l'inactivation des pathogènes et le maintien de l'activité des facteurs de coagulation.⁽²³⁾

2.3. Efficacité sur les bactéries

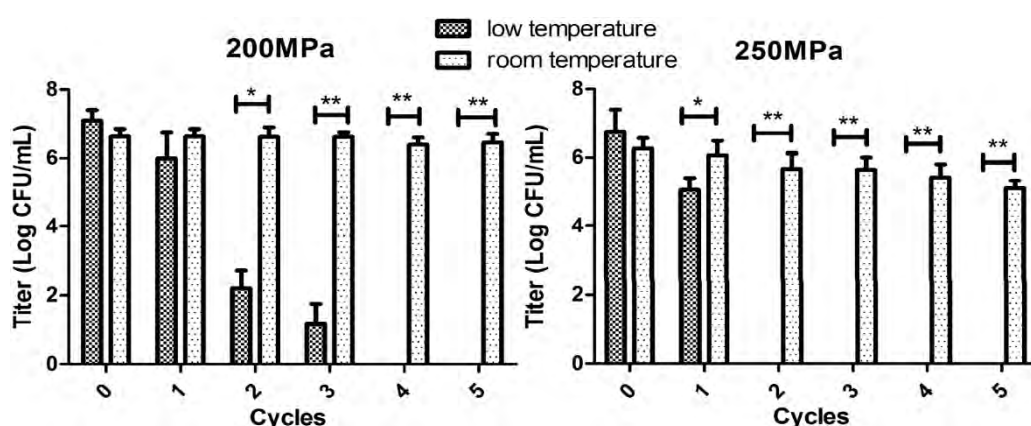
L'efficacité du traitement HP est testée sur quatre espèces bactériennes différentes :

- *Escherichia coli* (bacille Gram+), de la souche SIIA0726
- *Bacillus cereus* (bacille Gram-), de la souche SIIA0554
- *Staphylococcus aureus* (coque Gram+), de la souche SIIA2260
- *Pseudomonas aeruginosa* (coque Gram-), de la souche SIIA2265

Ces souches bactériennes viennent de l'Institut du Sichuan, elles sont résistantes aux antibiotiques et sont représentatives des maladies transmises par le sang rapportées par le ministère de la santé chinois.

Après cinq minutes de traitement à 400 MPa et à température ambiante, le nombre d'*E. coli* commence à diminuer. Cependant, la totalité de l'activité des facteurs V et VIII est perdue dès l'application d'une pression de 300 MPa, il est donc nécessaire de modifier les conditions de traitement.

Figure 10 : Efficacité d'un traitement HP cyclique sur *E. coli*



Source : Yang C, Bian G, Yang H, et al (2016) Development of High Hydrostatic Pressure Applied in Pathogen Inactivation for Plasma.

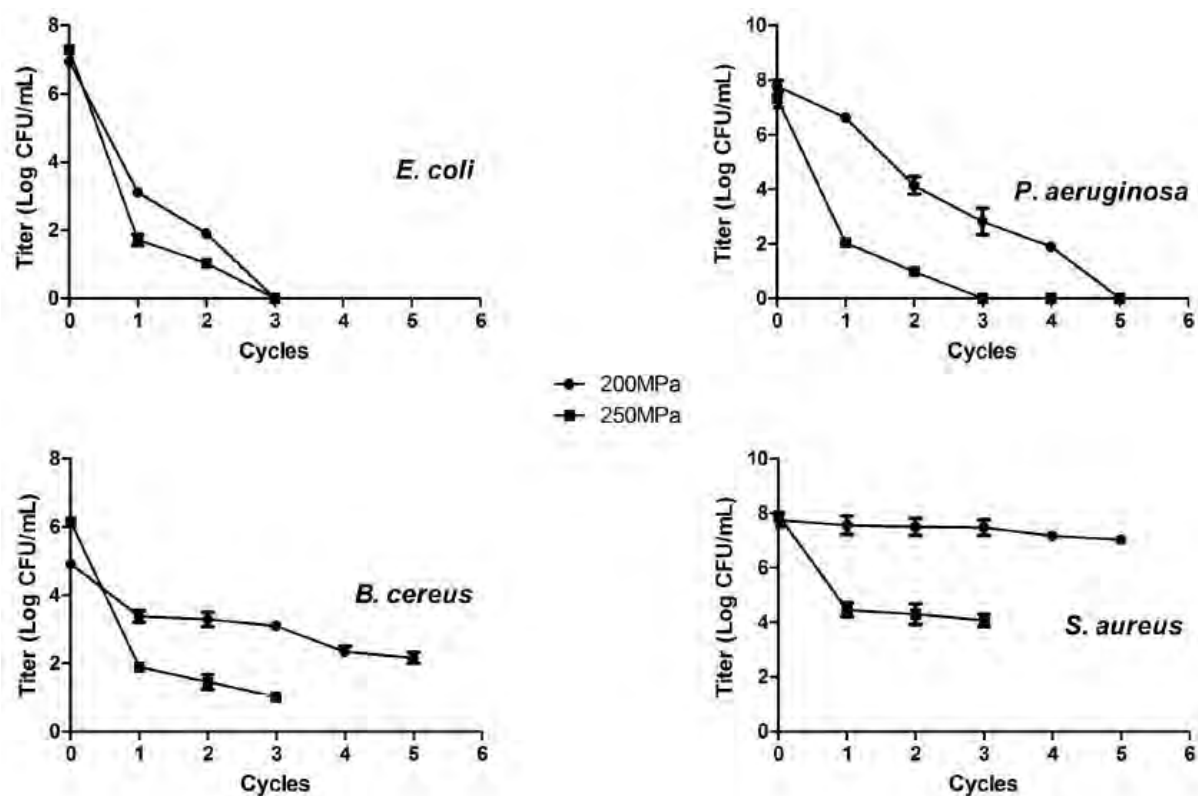
Un traitement HP à une pression de 200 MPa ou de 250 MPa n'est pas efficace à température ambiante sur les bactéries testées. En revanche, de bons résultats ont été obtenus à 0°C, voir figure 10.

A 0°C, les *E. coli* sont inactivés après quelques cycles de une minute, et l'activité du facteur VIII est réduite de seulement 20% et celle du facteur V diminue de 50% après deux cycles à 250 MPa ou après quatre cycles à 200 MPa. ⁽²³⁾

Alors que pour *E. coli* seulement trois cycles de traitement à 200 MPa suffisent à obtenir une inactivation suffisante, on remarque que cinq cycles à 200 MPa ou trois cycles à 250 MPa sont nécessaires pour *Pseudomonas aeruginosa*.

En général, augmenter le nombre de cycles de traitement, à 200 ou 250 MPa, permet d'obtenir de meilleurs résultats d'inactivation sur les bactéries sauf pour *Bacillus cereus* et *Staphylococcus aureus* pour lesquels augmenter le nombre de cycles de traitement à 250 MPa ne permet pas d'obtenir de meilleurs résultats, voir figure 11.

Figure 11 : Efficacité d'un traitement HP cyclique sur les bactéries testées



Source : Yang C, Bian G, Yang H, et al (2016) Development of High Hydrostatic Pressure Applied in Pathogen Inactivation for Plasma.

On remarque que le HPP est plus efficace sur les Gram négatifs (*E. coli* et *P. aeruginosa*) que sur les Gram positifs, et plus efficace sur les bacilles (*E. coli* et *B. cereus*) que sur les coques.

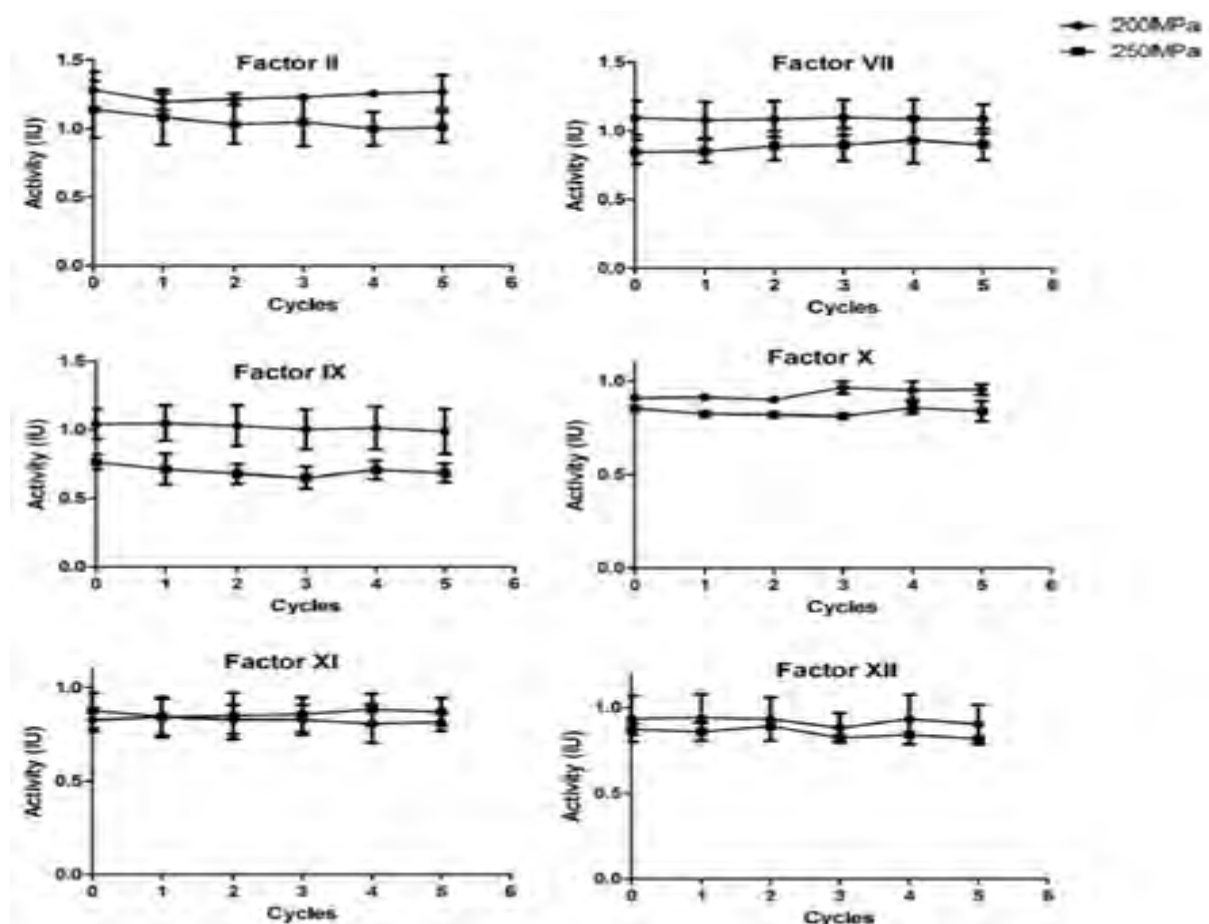
Ceci est en accord avec les règles générales de sensibilité des m.o. vues précédemment. En effet, la complexité de la membrane cellulaire des m.o. influence leur résistance aux HP.

Un autre article a trouvé qu'un traitement cyclique de 5 fois 2 minutes à 300 MPa et à -5°C permet d'inactiver efficacement *S. aureus* dans le plasma puisqu'ils obtiennent 8 réductions log. Mais l'effet de ce traitement sur l'activité des facteurs de la coagulation plasmatique n'a pas été testés.⁽²³⁾

2.4. Les facteurs de la coagulation

Après 5 cycles de traitement à 200 ou 250 MPa à 0°C, les facteurs de coagulation plasmatique II, VII, IX, X, XI et XII conservent plus de 95% de leur activité, voir figure 12.

Figure 12 : Effet d'un traitement HP cyclique sur l'activité des facteurs de coagulation plasmatique



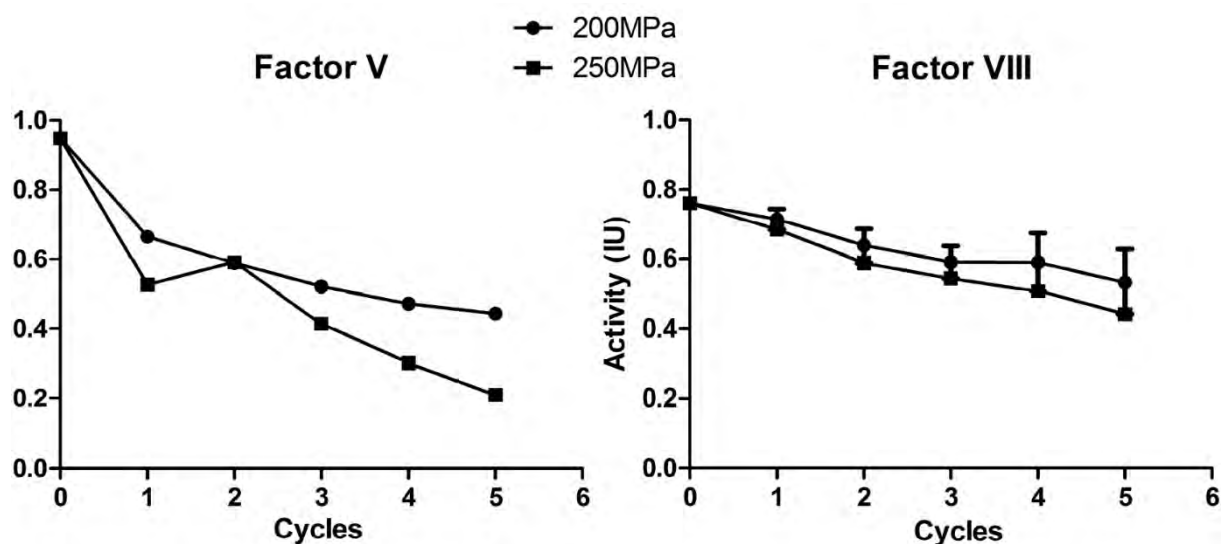
Source : Yang C, Bian G, Yang H, et al (2016) Development of High Hydrostatic Pressure Applied in Pathogen Inactivation for Plasma.

La plupart des technologies de réduction des pathogènes listées en début de chapitre entraînent 20 à 30% de réduction de l'activité du facteur VIII.

D'après le guide de bonnes pratiques chinois il est nécessaire de conserver une concentration totale en protéines supérieure à 50 g/L et une activité minimale de 0,5 UI/ml pour le facteur VIII. En effet, dans les guidelines chinoises (issues du Chinese quality requirement for whole blood and blood components), le facteur VIII est le plus sensible aux traitements conventionnels du sang.

Or, le facteur le plus sensible à la technologie HP est le facteur V, voir figure 13.

Figure 13 : Comparaison de l'effet d'un traitement HP cyclique sur l'activité des facteurs de coagulation plasmatique V et VIII



Source : Yang C, Bian G, Yang H, et al (2016) Development of High Hydrostatic Pressure Applied in Pathogen Inactivation for Plasma.

Lorsqu'on utilise la méthode HP, le maintien de la fonctionnalité du plasma est montré par l'activité de deux facteurs de la coagulation particulièrement labiles ⁽²⁰⁾:

- le facteur V (proaccélérine)
- le facteur VIII (facteur anti hémophilique A ou thromboplastinogène)

Pour conserver au moins 50% d'activité du facteur V on pose limite le nombre de cycles de traitement HP à 0°C à cinq cycles à 200 MPa et de deux cycles à 250 MPa pour améliorer les résultats d'inactivation des pathogènes tout en conservant une activité suffisante des protéines plasmatiques.

2.5. Efficacité sur les virus

L'objectif est de comparer l'efficacité à 0°C d'un traitement HP cyclique de 1 minute par cycle sur différents virus.

Les virus testés sont des souches de référence pour les infections virales transmises par le sang, leurs caractéristiques sont rassemblées dans la tableau 6 :

- le virus responsable de la maladie d'Aujeszky (PRV), souche CCTCC GDV131 cultivé sur cellule Vero
- le virus de l'encéphalomyocardite (EMCV) souche ATCC VR-129B cultivé sur cellule Vero
- le virus responsable de la diarrhée virale bovine (BVDV), souche ATCC VR-1422 sur cultivé des cellules de « turbinata » bovin (BT)
- le virus de la parvovirose porcine (PPV), souche ATCC VR-742 cultivé sur des cellules testiculaires de porcs (ST).

Tableau 6 : Particularités structurales des virus testés

Virus	Strand	Nucleic acid	Lipid envelop
EMCV	ss	RNA	No
PRV	ds	DNA	Yes
BVDV	ss	RNA	Yes
PPV	ss	DNA	No

Source : Yang C, Bian G, Yang H, et al (2016) *Development of High Hydrostatic Pressure Applied in Pathogen Inactivation for Plasma.*

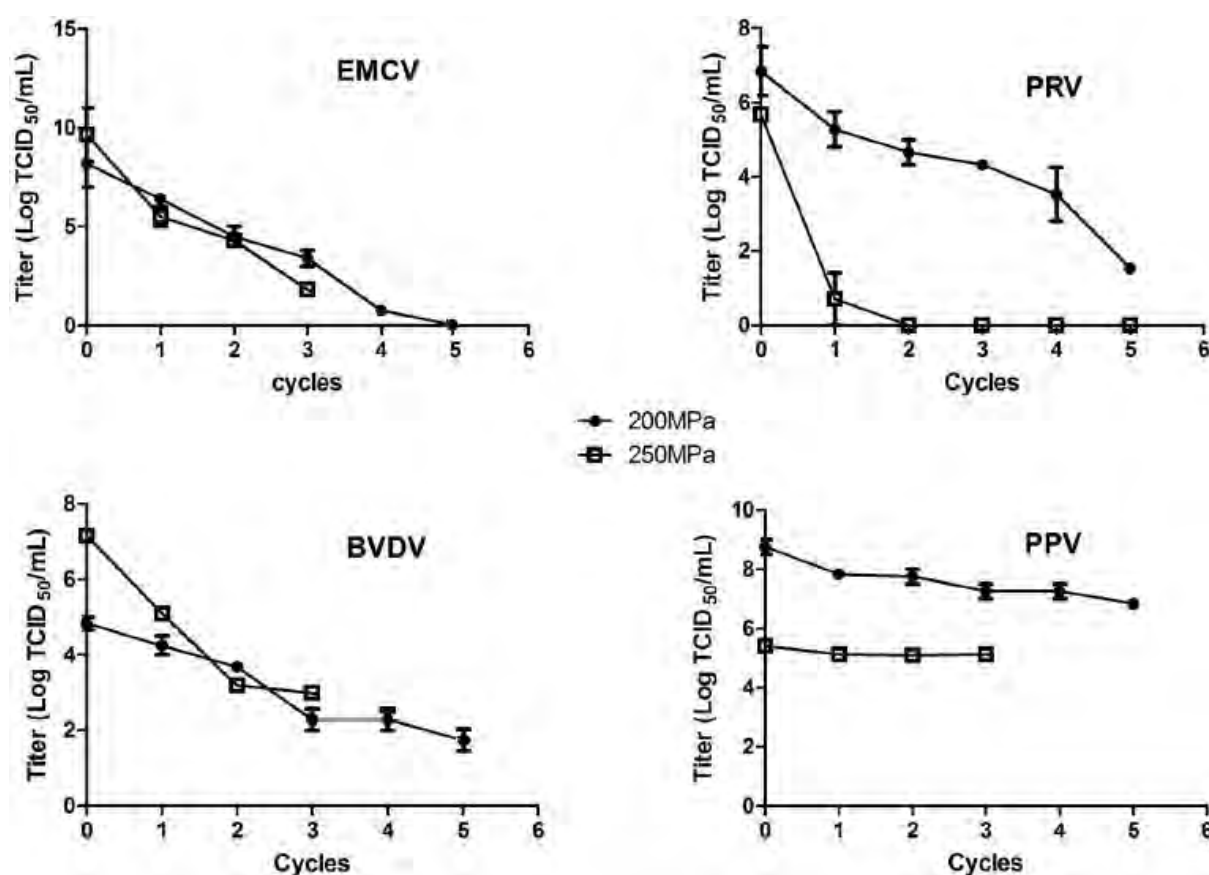
Un traitement HP cyclique entraîne des changements de volumes répétés (contraction puis expansion) qui causent la dissociation des sous-unités virales et augmente de 2 log les résultats d'inactivation du bactériophage lambda. ⁽²³⁾

Les résultats obtenus pendant cette étude sont présentés dans la figure 14.

Après 5 cycles de 1 minute à 200 MPa et 0°C, on observe une réduction de 8,2 log pour EMCV, de 3,1 log pour BVDV et de 3,8 log pour PRV.

Après 2 cycles de 1 minute à 250 MPa et 0°C, on observe une réduction de 5,4 log pour EMCV, 4 log pour BVDV et 5,7 log pour PRV.

Figure 14 : Efficacité d'un traitement HP cyclique sur les virus testés



Source : Yang C, Bian G, Yang H, et al (2016) Development of High Hydrostatic Pressure Applied in Pathogen Inactivation for Plasma.

Les virus enveloppés tels que le BVDV et le PRV semblent être inactivés efficacement par les pressions choisies (200 et 250 MPa). En revanche, ce traitement HP ne permet pas d'inactiver le PPV même après 5 cycles à 250 MPa. Un autre article a trouvé qu'il est possible d'inactiver le PPV par un traitement cyclique de 552 MPa mais pour cette valeur de pression, l'activité des facteurs de la coagulation plasmatique est fortement réduite.

Le PPV sert de virus modèle pour prédire le comportement du parvovirus B19 humain qui est un virus non enveloppé à ADN simple brin. La résistance de PPV pourrait être due à sa très petite taille, à l'absence d'enveloppe ou à l'assemblage particulier des protéines de sa capsid qui sont très fermement entrecroisées.⁽²³⁾

2.6. Congélation du plasma

Congeler le plasma peut être un bon moyen pour améliorer la sécurité de celui-ci. En effet, les bactéries se multiplient difficilement lorsque la température est inférieure à 0°C c'est pourquoi on reporte peu de contaminations bactériennes dans le plasma congelé. De plus, congeler le plasma permet d'améliorer l'efficacité du traitement HP et d'inactiver davantage de m.o. ⁽²³⁾

3. Fermentation microbienne en bioréacteur :

La vitesse d'une réaction enzymatique suit la loi d'Arrhenius, celle-ci s'écrit ainsi :

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

avec k : constance de vitesse

Ea : énergie d'activation

R : constante des gaz parfaits

T : température

Elle permet de se rendre compte que la vitesse d'une réaction enzymatique augmente le plus souvent avec la température et qu'elle est plus sensible aux variations de température lorsque l'énergie d'activation (Ea) est élevée.

Cependant les enzymes, comme toutes les protéines, sont sensibles à la chaleur, une température trop importante entraîne ainsi une diminution voire une perte de l'activité enzymatique.

Améliorer la thermorésistance des enzymes est donc un moyen d'accélérer la conversion des substrats et d'atteindre de nouvelles conditions optimales de réaction pour obtenir un meilleur taux de réaction global.

Or, l'application de pressions inférieures à 200 MPa permet de conférer une thermorésistance accrue à de nombreuses protéines.

3.1. Amélioration de la résistance des m.o.

Pour plusieurs souches bactériennes, il a été observé des concomitances entre la résistance aux HP et la tolérance à d'autres sortes de stress. Les réponses physiologiques aux HP sont mal connues mais dans certains cas, il est possible d'utiliser les HP à des valeurs sublétales pour stresser les cellules et les rendre ainsi

plus résistantes à d'autres facteurs. Par exemple, pour améliorer la survie des probiotiques, il est possible d'appliquer un pré-traitement HP de 10 minutes à 100 MPa sur une culture *Lactobacillus rhamnosus* (souche GG) pour lui conférer une meilleure tolérance à la chaleur.

De plus, un mécanisme de résistance croisée permet davantage, au mutant de *Lactobacillus sanfanciscensis* résistant aux HP, de résister aux stress que subissent habituellement les ferments lactiques au cours de la fabrication de produits laitiers.⁽⁵⁾

3.2. Augmentation de la vitesse de réaction

Dans des bioréacteurs soumis à la pression, il est possible de réaliser la production de gaz, l'estérification énantiosélective de l'ibuprofène par les lipases, la synthèse de peptides d'intérêt pharmacologique par la thermolysine et la synthèse de polyols comme la phénylalanine méthyl ester servant de précurseur dans la formation d'aspartame.^(11,17)

Pour les amylases du malt d'orge, la température optimale d'activité catalytique à pression atmosphérique est de 55 à 60°C alors qu'elle est comprise entre 60 et 65°C à 100 et 150 MPa. La température plus élevée permet d'augmenter la vitesse de réaction et d'obtenir une activité catalytique supérieure de 16% à 25%.

Notons également que la fermentation du glucose en éthanol par *Saccharomyces cerevisiae* est 3 fois plus rapide à 10 MPa et a un meilleur rendement qu'à pression atmosphérique.⁽⁵⁾

3.3. Modification des rendements de réaction

Pour optimiser les procédés de production, il faut tout d'abord être capable de détecter et d'isoler les enzymes dont l'activité est fortement favorisée par une augmentation de la pression.

Pour *Clostridium thermocellum*, la pression modifie considérablement le rendement des produits de la fermentation de la cellobiose. En effet, pour une pression de 17 MPa, le ratio entre éthanol et acétate est 60 fois plus élevé qu'à pression atmosphérique. Les acides organiques comme l'acétate sont donc produits en

quantité réduite alors que la production d'éthanol est fortement augmentée lorsque la pression augmente.

La thermolysine produite par *Bacillus thermoproteolyticus* a la capacité de produire un peptide servant de précurseur à l'aspartame qui est un édulcorant artificiel. Or, pour une pression de 150 MPa, la formation de précurseur de l'aspartame par cette enzyme est presque 6 fois plus importante qu'à pression atmosphérique.⁽⁵⁾

3.4. Enzyme engineering

Il arrive que la thermorésistance provoquée par les HP reste insuffisante pour permettre d'augmenter de façon satisfaisante la vitesse de réaction. Il est donc parfois nécessaire d'améliorer artificiellement la stabilité des enzymes à la chaleur.

L'utilisation des HP pour la fermentation microbienne peut être limitée par le fait que la croissance des m.o. est suboptimale lorsqu'ils sont soumis à la pression. En effet, ces conditions de culture stressantes demandent davantage d'énergie pour la maintenance des cellules ce qui affecte négativement les rendements de production.

La pression entraîne une modification des enzymes et peut moduler l'activité enzymatique et la spécificité des protéases. C'est pourquoi l'étude des m.o. piézophiles contribue à la création d'enzymes résistantes aux HP et des m.o. ayant des performances améliorées dans des conditions de HP et une meilleure résilience. Ainsi, des progrès significatifs ont pu être obtenus sur la résistance aux HP pour un nombre croissant de m.o. mésophiles.⁽¹⁷⁾

4. Modification des macromolécules :

Le repliement des protéines par les HP est efficace et peut s'appliquer à beaucoup de domaines. Cette méthode est utilisable dans les protocoles automatisés à haut débit utilisés dans la recherche en génomique structurale, qui dépendent beaucoup de l'efficacité de la purification et de la cristallisation d'un grand nombre de protéines recombinantes de structure et de fonction inconnue.

Les HP peuvent également être utilisées lors de la production à large échelle de protéines thérapeutiques.⁽⁵⁾

4.1. Dissociation des agrégats et des corps d'inclusion

Une des applications possibles de l'effet des HP sur les protéines est la dissociation *in vitro* des agrégats de protéines et des corps d'inclusion qui sont souvent formés pendant l'expression hétérologue de protéines recombinantes utilisées dans l'industrie pharmaceutique. Ces agrégats composés de protéines incorrectement repliées et inactives et peuvent être défaits à une pression de 200 MPa.

L'avantage des HP est qu'elles permettent simultanément de solubiliser les protéines et de provoquer leur repliement correct sans dénaturation préalable et de façon relativement indépendante de leur concentration. C'est pourquoi, avec les HP, il est possible de réaliser des réactions de repliement à des concentrations protéiques plus élevées qu'avec les autres méthodes basées sur l'utilisation des agents chaotropiques comme l'urée, les sels de guanidine ou le perchlorate de lithium.

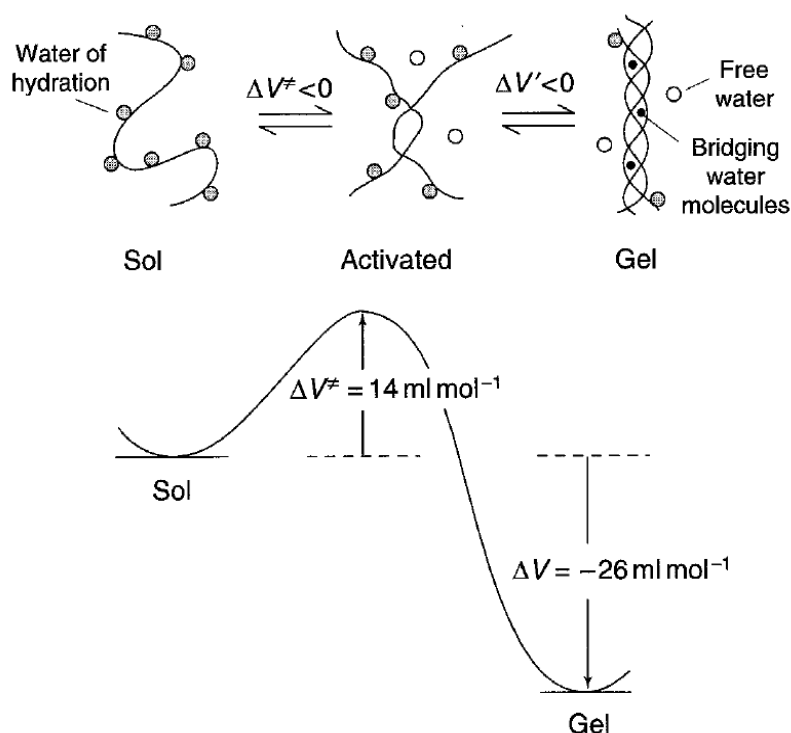
Le rendement en protéines recombinantes est meilleur avec la méthode HP et permet de traiter des agrégats, produits par des procaryotes ou par des eucaryotes, qui sont habituellement difficiles à dissocier avec les méthodes classiques.⁽¹⁷⁾

De plus, les solutions concentrées d'urée ou de chlorure de guanidium modifient les groupes fonctionnels des acides aminés et causent une modification trop importante de la structure des protéines, les empêchant alors de reprendre leur structure active. L'utilisation des HP (400 à 500 MPa) plutôt que des dénaturants chimiques permet également de minimiser le dépliement des protéines tout en permettant de les transformer chimiquement, avec des dérivés ferrocènes par exemple, avant de les replier.⁽¹¹⁾

4.2. Gels protéiques et de polysaccharides

Dans le domaine de la cosmétologie et de la pharmacologie, il est intéressant de produire des gels homogènes de protéines et/ou de polysaccharides. La formation d'un gel est schématisée dans la figure 15.

Figure 15 : Représentation de la transition entre les formes solubles et polymérisées des principales protéines et polysaccharides



Source : Mozhaev VV, Heremans K, Frank J, et al (1994) Exploiting the effects of high hydrostatic pressure in biotechnological applications. *Trends in Biotechnology* 12:493–501.

Des études ont été faites sur les effets de la pression sur les polymères synthétiques répondant à la température, car les gels obtenus sous pression et les émulsions de protéines floculées ont des propriétés rhéologiques particulières et peuvent servir de matrice pour la libération prolongée de principes actifs.⁽¹⁷⁾

La transition sol-gel des polysaccharides, aussi appelée gélification, présente un diagramme de phase similaire à celui des protéines. Dans des conditions de pression élevées, la température de gélification est souvent réduite ce qui permet de produire des gels à température ambiante. Ainsi, une pression de 200 MPa permet de diminuer la température de fusion des carraghénanes et les HP permettent de diminuer la température de gélification de l'amidon.⁽⁸⁾

Les HP entraînent une modification des propriétés gélifiantes et épaississantes des sucres de type amidon ou alginate et peuvent aussi permettre de modifier les propriétés des biopolymères obtenus. Par exemple, la production de cellulose

bactérienne par *Gluconacetobacter xylinus* (anciennement *Acetobacter xylinum*) à une pression de 30-60 MPa permet d'obtenir une matrice polysaccharidique de plus haute densité que sous pression atmosphérique.⁽⁵⁾

Les HP améliorent la souplesse des gels qui sont également plus résistants tout en ayant une meilleure digestibilité. La rétrogradation des gels d'amidon pendant leur stockage est ralentie, ce qui leur confère une meilleure stabilité.⁽¹¹⁾

Les gels protéique formés par les HP apparaissent plus transparents et brillants, ceci est dû au réarrangement des molécules d'eau autour des résidus d'acides aminés.

L'eau joue un rôle majeur dans la transition sol-gel des solutions de protéines et de polysaccharides. En effet, les gels sont stabilisés par les liaisons hydrogènes qui se forment entre les polymères, par exemple entre les fonctions alcool en position 2 et 6 des galactoses constituant les carraghénanes ou avec les résidus polaires des acides aminés des protéines.⁽⁶⁾

La formation de ces nouvelles liaisons hydrogène s'accompagne de la libération de l'eau d'hydratation des groupes polaires, la transition sol-gel peut ainsi entraîner une augmentation du volume total. En revanche, pour certains gels, les molécules d'eau servent à former des ponts hydrogènes entre les différentes molécules, on observera une forte diminution du volume total qui compense l'augmentation de volume provoqué par la gélification et entraîne une diminution de volume, voir tableau 7.

Tableau 7 : Variation de volume entre les formes solubles et polymérisées des principales protéines et polysaccharides

Sample	ΔV_m (ml/mol cross-links ⁻¹) ^c
κ -Carrageenan in 35 mM KCl	+36.3
ι -Carrageenan in 30 mM KCl	+8.5
Agarose at 1 kbar	-2.6
Gelatin at 1 kbar	-25.7
Ovalbumin at pH7	+0.37
Soy protein at pH7.8	+0.98

Source : Mozhaev VV, Heremans K, Frank J, et al (1994) Exploiting the effects of high hydrostatic pressure in biotechnological applications. *Trends in Biotechnology* 12:493–501.

4.3. Extraction assistée par les HP

Les HP peuvent améliorer l'extraction de composés d'intérêt de santé et peuvent être une alternative à l'extraction par la chaleur pour les produits thermosensibles.⁽⁵⁾

La désagrégation des assemblages lipides-protéines par les HP permet d'extraire les protéines membranaires sans avoir à ajouter de surfactants et permettant ainsi de conserver la conformation native des protéines isolées par cette méthode. Ainsi, il a été possible d'utiliser les HP pour isoler la protéine kinase C et d'autres protéines de complexes lipidiques, pour préparer des antigènes érythrocytaires extraits de globules rouges des groupes A ou B ou pour extraire des protéines antigéniques de cellules tumorales.⁽¹¹⁾

5. Immunologie :

Lorsqu'on compare l'immunogénicité des vaccins obtenus avec les HP par rapport à ceux obtenus par des méthodes conventionnelles, on peut citer le virus de la fièvre de la vallée de Rift appartenant au genre *Phlebovirus*. Celui-ci est inactivé par un

traitement HP de 30 minutes à 275 MPa et 25°C et présente une meilleure immunogénicité que celle du virus traité par le formaldéhyde.⁽¹⁷⁾

5.1. Vaccins contre les cellules cancéreuses

La multiplication des recherches dans le domaine des vaccins contre les cellules malignes a provoqué un regain d'intérêt pour la méthode HP.⁽¹⁷⁾

En effet, la nécrose induite par les HP, provoquée par la gélification du cytoplasme, permet d'obtenir une particule cellulaire robuste qui semble conserver son immunogénicité humorale. Parce qu'elles conservent leur antigénicité, les cellules tumorales entières tuées par les HP ont été proposées comme vaccin tumoral.⁽⁵⁾

5.2. Informations supplémentaires sur la structure des virus

Une meilleure connaissance structurelle de ses mécanismes est possible avec l'utilisation de la cristallographie macromoléculaire sous les HP. Par exemple, une pression de 330 MPa a permis d'obtenir la structure en haute résolution de cristaux du virus de la mosaïque du niébé.⁽⁵⁾

5.3. Immunoabsorption

En règle générale, les protéines monomériques ne se dénaturent pas pour des pressions inférieures à 400 MPa alors que les complexes protéiques se dissocient dès 100 MPa. Ainsi, les interactions antigène-anticorps se rompent sans dénaturation pour des pressions comprises entre 100 et 400 MPa.

Dans le cas des tests immunologiques de type ELISA (enzyme-linked immunosorbent assay), une pression de 200 MPa permet de dissocier l'albumine, sans affecter la capacité des anticorps liés à se lier aux antigènes une fois la pression relâchée.

La possibilité de recycler les ligands en utilisant les HP peut être mise à profit dans les procédés de séparation utilisant l'immunoabsorption.⁽¹¹⁾

De plus, le dépliement des protéines provoqué par les HP peut permettre de révéler des épitopes supplémentaires et ainsi d'augmenter l'immunogénicité des protéines, des virus et des m.o. traités.

6. Lyse enzymatique assistée par les HP :

Les HP permettent d'atteindre un état intermédiaire stable de fusion et exposent des épitopes qui étaient précédemment cachés ce qui augmente l'immunogénicité des macromolécules.^(5,13)

6.1. Mise au jour de nouveaux sites d'hydrolyse

Un des inconvénients à l'utilisation d'agents chimiques pour hydrolyser les macromolécules est qu'il est impossible d'atteindre les sites d'hydrolyse cachés à l'intérieur de la structure des protéines ou des glucides. C'est pourquoi il est intéressant de déplier les macromolécules à l'aide des HP.

Les substrats macromoléculaires comme l'amidon ou les protéines sont partiellement dépliés et/ou gélatinisés sous l'effet de la pression. Des pressions comprises entre 400 et 800 MPa peuvent être utilisées dans les procédés de protéolyse, elles permettent de révéler de nouveaux sites de protéolyse ce qui accélère l'action des protéases.⁽¹¹⁾

Cet effet est particulièrement intéressant pour améliorer la fonctionnalité des hydrolysats de lactosérum.

En effet, les changements de conformation induit par les HP permettent aux protéases d'atteindre des sites d'hydrolyse habituellement inaccessibles et génèrent des hydrolysats avec des masses moléculaires différentes. Or, la fonctionnalité des hydrolysats de lactosérum dépend de la distribution des masses moléculaires et des propriétés spécifiques des peptides générés.

Ainsi, des hydrolysats de protéines de lactosérum obtenu après un traitement à la pepsine à 400 MPa ont montré une excellente stabilité à la chaleur et des meilleures propriétés émulsifiantes.⁽⁵⁾

6.2. Digestibilité et allergénicité

La modification de la conformation des macromolécules par un traitement HP peut permettre de diminuer leur pouvoir immunogène ou de supprimer des épitopes. Les HP peuvent également réduire l'allergénicité des produits alimentaires en détruisant les allergènes ou en modifiant leur structure.⁽³⁾

Un traitement HP permet ainsi de réduire la quantité d'allergènes dans les aliments comme les œufs, le lait, les cacahuètes, le soja, les pommes, le riz et le blé.⁽⁷⁾

La protéolyse partielle des protéines du lactosérum assistée par les HP permet de favoriser la dégradation de la lactoglobuline de réduire l'allergénicité du lait et ainsi d'augmenter la digestibilité du lait infantile.

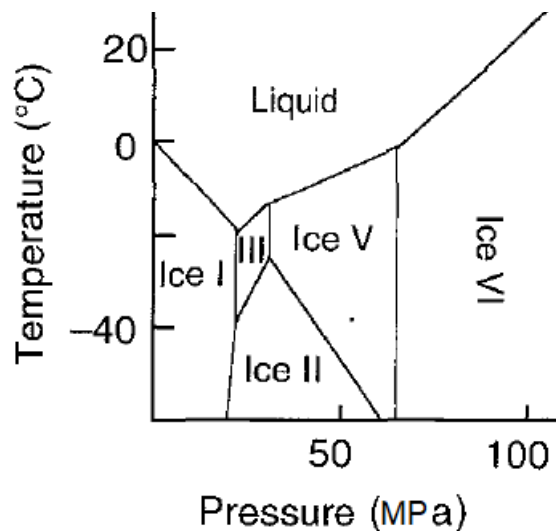
L'allergie au riz est un problème de santé publique dans les pays asiatiques où il représente l'apport majeur en glucides complexes. C'est pourquoi la compagnie japonaise Echigo-Seika commercialise un riz précuit hypoallergénique dont le procédé de production pourrait également être appliqué au blé et à l'orge. Un des trois allergènes connus du céleri est détruit par un traitement de 600 MPa à 20°C.⁽¹¹⁾

7. La congélation (et la décongélation) sous HP :

7.1. L'état de l'eau dépend de la pression (et de la température)

Si on regarde le diagramme de phases de l'eau, voir figure 16, on constate que la valeur de la pression influence l'état de l'eau. En effet, lorsque la pression est élevée mais inférieure à 650 MPa, l'eau reste à l'état liquide pour des températures plus basses qu'à pression atmosphérique. Ainsi, il est possible de maintenir l'eau à l'état liquide au-dessous de 0°C en la soumettant à des pressions élevées.⁽¹⁷⁾

Figure 16 : Diagramme de phase de l'eau pure en fonction de la température et de la pression



Source : Mozhaev VV, Heremans K, Frank J, et al (1994) Exploiting the effects of high hydrostatic pressure in biotechnological applications. *Trends in Biotechnology* 12:493–501

7.2. Congélation rapide

Pour une pression de 210 MPa, l'eau reste liquide à la température de -20°C, il est donc possible de refroidir les aliments tout en les maintenant sous pression.⁽⁷⁾

Un produit refroidi à une température comprise entre -10°C à -20°C maintenu à une pression de 100 à 400 MPa se congèlera presque instantanément lorsque la pression sera relâchée. En effet, lorsque la pression redescend à la pression atmosphérique, le point de solidification passe de -20°C à 0°C, l'eau passe alors par un état instable sur-refroidi puis génère une grande quantité de très petits cristaux de glace distribués dans l'ensemble du produit.⁽¹¹⁾

Les cristaux de glace formés très rapidement sont de plus petite taille ce qui provoque moins de dommages aux cellules.⁽⁶⁾

On observera moins de dommages structurels sur des produits congelés à l'aide de la pression que sur des produits congelés à pression atmosphérique grâce à de l'air à -30°C ou avec de l'azote liquide. Les dommages tissulaires étant réduits, la qualité globale du produit est améliorée.⁽⁷⁾

Cette technique pourrait être utilisée sur les médicaments biologiques fragiles.

7.3. Décongélation assistée par les HP

De même, soumettre un produit congelé à une forte pression permet de le décongeler presque instantanément.⁽¹¹⁾

Cette particularité peut être mise à profit pour la conservation des médicaments biologiques, des produits dérivés du sang, des cellules et des organes. En effet, une étude avait montré que la décongélation assistée par les HP améliore la survie des cellules de conjonctive humaine congelées après une congélation lente.⁽¹⁷⁾

La décongélation assistée par les HP permet également de réduire les pertes en éléments solubles.

7.4. Stockage à des températures inférieures à zéro

Les propriétés de l'eau sous pression rendent également possible le stockage des produits biologiques à des températures négatives sans que ceux-ci ne soient congelés et donc ne subissent les dommages liés aux cristaux de glace. Pour cela, il est nécessaire que le produit soit mis sous pression à 100 MPa ou à 200 MPa avant l'abaissement de la température, et que la pression soit maintenue pendant la totalité du stockage et libérée après l'augmentation de la température.⁽¹⁷⁾

Cette méthode permet de conserver des produits à des températures négatives sans pour autant qu'il y ait formation de glace et évite ainsi les problèmes causés par les cristaux de glace. Cependant, elle augmente considérablement le coût énergétique du stockage.⁽⁷⁾

8. Cadre réglementaire des denrées alimentaires traitées par les HP :

Les procédés de fabrication incluant les HP, pour remplacer les traitements thermiques, sont considérés comme innovants mais relativement peu utilisés.⁽³⁶⁾

8.1. Règlement « novel food »

D'un point de vue réglementaire, la consommation d'aliments traités par HP était négligeable au sein de l'Union européenne avant le 15 mai 1997. C'est pourquoi les aliments traités par les HP peuvent être considérés comme des « nouveaux aliments » et dépendre du règlement européen (UE) 2015/2283, abrogeant le

règlement (CE) n° 258 /97 du Parlement européen et du Conseil et le règlement (CE) n° 1852/2011 de la Commission.

De par leur nature, les aliments traités par les HP semblent correspondre à la septième catégorie « denrées alimentaires résultant d'un procédé de production qui n'était pas utilisé pour la production de denrées alimentaires dans l'Union avant le 15 mai 1997 ». Cependant, pour appartenir à cette catégorie le procédé de production doit entraîner « des modifications significatives dans la composition ou la structure d'une denrée alimentaire, lesquelles affectent sa valeur nutritionnelle, son métabolisme ou sa teneur en substances indésirables ».⁽³⁷⁾

8.2. Mise sur le marché

Les demandes d'autorisation de mise sur le marché des « nouveaux aliments » sont envoyées à la Commission européenne, ceux-ci sont ensuite ajoutés à la liste des nouveaux aliments autorisés dans l'Union Européenne, établie par le règlement d'exécution (UE) 2017/2470 de la Commission européenne. Y figurent les préparations pasteurisées à base de fruits produites au moyen d'un traitement à haute pression ainsi que les exigences sur la nature et le stockage des fruits, le pH l'Aw et le °Brix des préparations. De plus, la mention « pasteurisées par traitement à haute pression » doit figurer après le nom de tout produit pour lequel ce procédé est utilisé.⁽³⁸⁾

Les demandes d'autorisation de mise sur le marché des « nouveaux aliments » doivent être adressées à la Commission européenne et le règlement (UE) 2017/2470 est régulièrement mis à jour. Ainsi, on dénombre 76 ajouts entre le 20 mars 2018 et le 13 janvier 2022. Mais parmi ces nombreuses modifications, seule celle du 23 juillet 2018 concerne des produits traités par les HP.⁽³⁹⁾

En effet, l'autorisation de mise sur le marché des « nouveaux aliments » est beaucoup plus contraignante que celle classique obtenue via la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF).

8.3. Statut des aliments traités par les HP

Ces dernières années, la DGCCRF a saisie l'ANSES à plusieurs reprises pour déterminer si des aliments répondent à la définition des « nouveaux aliments » telle qu'elle est donnée dans le règlement européen (UE) 2015/2283.

Notamment, des comités d'experts de l'ANSES ont estimé que pour un traitement HP réalisé dans une enceinte à température ambiante (ou plus froide) et une durée de 3 à 5 minute, des barèmes de pression compris entre 500 et 600 MPa « n'entraînent pas de modification significative de la valeur nutritive, du métabolisme ou de la teneur en substances indésirables des aliments ».⁽¹⁰⁾

Ces aliments ne sont pas considérés légalement comme des « nouveaux aliments », et peuvent être commercialisés sans avoir à préciser le procédé de pasteurisation. Ceci explique pourquoi les produits traités par les HP sont difficiles à identifier et que le règlement (UE) 2017/2470 ne concerne que très peu d'aliments traités par les HP.

VII. Conclusion

Les HP permettent d'éviter des dommages causés par les fortes températures et de conserver la valeur nutritionnelle et sensorielle des produits. Elles représentent un investissement coûteux mais l'existence de centres de sous-traitance permet de la rendre accessible pour les entreprises qui débutent avec de faibles volumes de production.

Pour beaucoup de produits, les HP permettent d'atteindre les mêmes critères de sécurité des aliments que la pasteurisation thermique, tout en répondant à la demande des consommateurs de produits plus frais et moins transformés et avec moins d'additifs.⁽⁴⁰⁾

En ce qui concerne les spores qui sont un problème majeur pour la sécurité microbiologique des aliments, un traitement en deux temps associant chaleur et pression permettrait de faire germer les spores puis de les détruire. Une des solutions pour la filière fruits et légumes serait d'intégrer la technologie HP à des précédés de fabrication habituels comme le blanchiment. De plus des travaux récents sont particulièrement encourageants pour la problématique posée par les spores.^(41,42)

L'absence de modèle prédictif sur l'effet des HP et les interactions entre la composition du produit et de l'emballage freine l'expansion de la technologie HP.

Chaque nouvelle situation nécessite d'être validée par des essais sur la matrice ciblée, c'est pourquoi des recherches dans ce domaine pourrait faciliter l'utilisation des HP par les entreprises.⁽⁴³⁾

Pour finir sur les perspectives d'évolution des HP, on peut noter que les HP font partie des technologies de conservation très intéressantes. L'évaluation de son attractivité prend en compte la faisabilité de sa mise en œuvre, la maturité de la technologie, son impact macroéconomique et environnemental. et comparées aux autres technologies innovantes car elles ont un impact environnemental plus faible que les micro-ondes, le chauffage ohmique et la lumière pulsée.⁽⁴⁴⁾

VIII. Bibliographie

1. Surveillance des toxi-infections alimentaires collectives. Données de la déclaration obligatoire, 2020. [Internet]. [cité 25 janv 2022]. Disponible sur: <https://www.santepubliquefrance.fr/maladies-et-traumatismes/maladies-infectieuses-d-origine-alimentaire/toxi-infections-alimentaires-collectives/documents/bulletin-national/surveillance-des-toxi-infections-alimentaires-collectives.-donnees-de-la-declaration-obligatoire-2020>
2. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à une demande d'avis relatif à une demande d'autorisation de mise sur le marché d'un nouvel aliment ou d'un ingrédient alimentaire : procédé de pasteurisation assisté par hautes pressions pour la transformation de foies gras. [Internet]. 2016 [cité 25 janv 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/ESPA2015SA0249.pdf>
3. Sevenich R. High pressure processing at ambient and high temperatures and its influence on food processing contaminants, food borne diseases and bacterial spores in model- and real-food systems. 2016.
4. Patterson MF, Quinn M, Simpson R, Gilmour A. Sensitivity of Vegetative Pathogens to High Hydrostatic Pressure Treatment in Phosphate-Buffered Saline and Foods. *J Food Prot.* 1995;58(5):524-9.
5. Aertsen A, Meersman F, Hendrickx MEG, Vogel RF, Michiels CW. Biotechnology under high pressure: applications and implications. *Trends Biotechnol* Juill. 2009;27(7):434-41.
6. Rastogi NK, Raghavarao KSMS, Balasubramaniam VM, Niranjan K, Knorr D. Opportunities and Challenges in High Pressure Processing of Foods. *Crit Rev Food Sci Nutr* Janv. 2007;47(1):69-112.
7. Wang C-Y, Huang H-W, Hsu C-P, Yang BB. Recent Advances in Food Processing Using High Hydrostatic Pressure Technology. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 11 mars 2016;56(4):527-40.
8. Martin J-L. Faisabilité technique et économique des hautes pressions sur les produits de charcuterie. 2016;20.
9. Linton M, Connolly M, Houston L, Patterson MF. The control of *Clostridium botulinum* during extended storage of pressure-treated, cooked chicken. *Food Control* Mars. 2014;37:104-8.
10. Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'évaluation de l'impact d'un traitement de pascalisation (hautes pressions) sur des plats cuisinés | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 9 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/avis-de-l%E2%80%99agence-fran%C3%A7aise-de->

s%C3%A9curit%C3%A9-sanitaire-des-aliments-relatif-%C3%A0-
l'E2%80%99%C3%A9valuation-de-l-33

11. Mozhaev VV, Heremans K, Frank J, Masson P, Balny C. Exploiting the effects of high hydrostatic pressure in biotechnological applications. *Trends Biotechnol.* déc 1994;12(12):493-501.
12. Patterson MF. Microbiology of pressure-treated foods. *J Appl Microbiol.* 2005;98(6):1400-9.
13. Yamamoto K. Food processing by high hydrostatic pressure. *Biosci Biotechnol Biochem.* 3 avr 2017;81(4):672-9.
14. Pereira RN. Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. *Food Res Int.* 2010;8.
15. Considine KM, Kelly AL, Fitzgerald GF, Hill C, Sleator RD. High-pressure processing – effects on microbial food safety and food quality: High-pressure processing. *FEMS Microbiol Lett Avr.* 2008;281(1):1-9.
16. Arroyo G, Sanz PD, Préstamo G. Effect of high pressure on the reduction of microbial populations in vegetables. *J Appl Microbiol.* 1997;82(6):735-42.
17. Masson P, Tonello C, Balny C. High-Pressure Biotechnology in Medicine and Pharmaceutical Science. *J Biomed Biotechnol.* 2001;1(2):85-8.
18. Georget E, Sevenich R, Reineke K, Mathys A, Heinz V, Callanan M. Inactivation of microorganisms by high isostatic pressure processing in complex matrices: A review. *Innov Food Sci Emerg Technol Févr.* 2015;27:1-14.
19. Demazeau G, Rivalain N. The development of high hydrostatic pressure processes as an alternative to other pathogen reduction methods. *J Appl Microbiol.* 2011;110(6):1359-69.
20. Habak D. NOTIONS DE THERMODYNAMIQUE ET DE BIOENERGETIQUE. :13.
21. Bajovic B, Bolumar T, Heinz V. Quality considerations with high pressure processing of fresh and value added meat products. *Meat Sci.* nov 2012;92(3):280-9.
22. Bello E, Martínez G, Ceberio B, Rodrigo D, López A. High Pressure Treatment in Foods. *Foods.* 2014;3(3):476-90.
23. Yang C, Bian G, Yang H, Zhang X, Chen L, Wang J. Development of High Hydrostatic Pressure Applied in Pathogen Inactivation for Plasma. Bönig H, éditeur. *PLOS ONE.* 2016;11(8).
24. EUR-Lex - 32001D0424 - FR [Internet]. Journal officiel n° L 151 du 07/06/2001 p. 0042 - 0043; OPOCE; [cité 10 févr 2022]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32001D0424&qid=1644486249686&from=FR>

25. Buzrul S, Alpas H, Largeteau A, Demazeau G. Inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in kiwifruit and pineapple juices by high hydrostatic pressure. *Int J Food Microbiol.* 2008;124(3):275-8.
26. Trujillo AJ, Capellas M, Saldo J, Gervilla R, Guamis B. Applications of high-hydrostatic pressure on milk and dairy products: a review. *Innov Food Sci Emerg Technol Déc.* 2002;3(4):295-307.
27. Avure HPP Pasteurisation - Viandes, fruits, jus de fruits | JBT FoodTech - JBT [Internet]. FoodTech. [cité 10 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.jbtc.com/foodtech/fr/products-and-solutions/products/high-pressure-processors/hpp-applications/>
28. R FEH, A R, V C, J S, S M. *Byssoschlamys nivea* inactivation in pineapple juice and nectar using high pressure cycles. *J Food Eng Déc.* 2009;95(4):664-9.
29. High pressure and foods—fruit/vegetable juices. *J Food Eng Déc.* 2006;77(3):386-98.
30. Tola YB, Ramaswamy HS. Combined effects of high pressure, moderate heat and pH on the inactivation kinetics of *Bacillus licheniformis* spores in carrot juice. *Food Res Int.* 2014;62:50-8.
31. Berlin DL, Herson DS, Hicks DT, Hoover DG. Response of Pathogenic *Vibrio* Species to High Hydrostatic Pressure. *Appl Env Microbiol.* 1999;65(6):2776-80.
32. Greg Voisin. Gold Band Oysters Will Work For Food Video - Oyster Cut [Internet]. 2012 [cité 10 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=MmXwYhk0cQs>
33. Nos savoir-faire - Delpierre [Internet]. [cité 9 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.delpierre.com/nos-savoir-faire/>
34. Fang L, Jiang B, Zhang T. Effect of combined high pressure and thermal treatment on kiwifruit peroxidase. *Food Chem Août.* 2008;109(4):802-7.
35. Liem PH, Morimoto N, Mahara A, Jinno C, Shima K, Ogino S. Preparation of Inactivated Human Skin Using High Hydrostatic Pressurization for Full-Thickness Skin Reconstruction. Yamamoto M.
36. EUR-Lex - 31997R0258 - FR [Internet]. Journal officiel n° L 043 du 14/02/1997 p. 0001 - 0006; OPOCE; [cité 14 févr 2022]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:31997R0258&from=FR>
37. RÈGLEMENT (UE) 2015/ 2283 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL - du 25 novembre 2015 - relatif aux nouveaux aliments, modifiant le règlement (UE) no 1169/ 2011 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant le règlement (CE) no 258/ 97 du Parlement européen et du Conseil et le règlement (CE) no 1852/ 2001 de la Commission. :22.

38. RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2017/ 2470 DE LA COMMISSION - du 20 décembre 2017 - établissant la liste de l'Union des nouveaux aliments conformément au règlement (UE) 2015/ 2283 du Parlement européen et du Conseil relatif aux nouveaux aliments. :130.
39. TEXTE consolidé: 32017R2470 — FR — 03.02.2022 [Internet]. [cité 14 févr 2022]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:02017R2470-20220203&qid=1644844843371&from=FR>
40. Actualités L-LS. Alimentation : les clients prennent le pouvoir [Sial 2018] [Internet]. lsa-conso.fr. [cité 7 févr 2022]. Disponible sur: <https://www.lsa-conso.fr/sial-2018-les-consommateurs-veulent-donner-du-sens-a-leur-alimentation,298171>
41. Liu Y, Zhang Z, Chen LE, Bi KE, Yang J, Zhang B, et al. High Pressure Thermal Sterilization and ϵ -Polylysine Synergistically Inactivate *Bacillus subtilis* Spores by Damaging the Inner Membrane. *J Food Prot.* 1 mars 2022;85(3):390-7.
42. Setlow P, Christie G. What's new and notable in bacterial spore killing! *World J Microbiol Biotechnol.* 5 août 2021;37(8):144.
43. Pérez-Lamela C, Franco I, Falqué E. Impact of High-Pressure Processing on Antioxidant Activity during Storage of Fruits and Fruit Products: A Review. *Mol Basel Switz.* 30 août 2021;26(17):5265.
44. Les innovations technologiques, leviers de réduction du gaspillage dans le secteur agro-alimentaire. 2015.
45. Bayındırlı A, Alpas H, Bozoğlu F, Hızal M. Efficiency of high pressure treatment on inactivation of pathogenic microorganisms and enzymes in apple, orange, apricot and sour cherry juices. *Food Control Janv.* 2006;17(1):52-8.
46. Linton M, McCLEMENTS JMJ, Patterson MF. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in Orange Juice Using a Combination of High Pressure and Mild Heat. *J Food Prot.* 1999;62(3):277-9.
47. Hartyáni P, Dalmadi I, Knorr D. Electronic nose investigation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* inoculated apple and orange juice treated by high hydrostatic pressure. *Food Control Juill.* 2013;32(1):262-9.
48. Silva FVM, Tan EK, Farid M. Bacterial spore inactivation at 45–65 °C using high pressure processing: Study of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice. *Food Microbiol.* 2012;32(1):206-11.
49. Dogan C, Erkmén O. High pressure inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* inactivation in broth, milk, and peach and orange juices. *J Food Eng Mars.* 2004;62(1):47-52.

50. Zimmermann M, Schaffner DW, Aragão GMF. Modeling the inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores in tomato pulp from the combined effect of high pressure and moderate temperature. 2013.
51. Ramaswamy HS, Shao Y, Bussey J, Austin J. Screening of twelve *Clostridium botulinum* (group I) spores for high-pressure resistance at elevated-temperatures. *Food Bioprod Process*. 2013;91(4):403-12.
52. Zhu S, Naim F, Marcotte M, Ramaswamy H, Shao Y. High-pressure destruction kinetics of *Clostridium sporogenes* spores in ground beef at elevated temperatures. *Int J Food Microbiol*. 2008;126(1):86-92.
53. Evelyn SFVM. Modeling the inactivation of psychrotrophic *Bacillus cereus* spores in beef slurry by 600MPa HPP combined with 38–70°C: Comparing with thermal processing and estimating the energy requirements. *Food Bioprod Process*. 2016;99:179-87.
54. Règlement d'exécution (UE) 2018/ de la Commission du 23 juillet 2018 portant rectification du règlement d'exécution (UE) 2017/2470 établissant la liste de l'Union des nouveaux aliments. :133.

IX. Sources images

Page 15 : <https://www.hiperbaric.com/fr/hautes-pressions>

Page 57 : https://mdpi.com/ijms/ijms-19-02878/article_deploy/html/images/ijms-19-02878-g001.png

X. Annexes

Table des annexes

<u>RESULTATS D'INACTIVATION DANS LES JUS ET PUREES DERIVES DE FRUITS OU DE LEGUMES :</u>	98
<u>Tola YB, Ramaswamy HS. Combined effects of high pressure, moderate heat and pH on the inactivation kinetics of <i>Bacillus licheniformis</i> spores in carrot juice. Food Res Int. 1 août 2014;62:50-8</u>	98
<u>Bayındırlı A, Alpas H, Bozoğlu F, Hızal M. Efficiency of high pressure treatment on inactivation of pathogenic microorganisms and enzymes in apple, orange, apricot and sour cherry juices. Food Control. janv 2006;17(1):52-8</u>	
99	
<u>Linton M, McCLEMENTS MJ, Patterson MF. Inactivation of <i>Escherichia coli</i> O157:H7 in Orange Juice Using a Combination of High Pressure and Mild Heat. J Food Prot. 1 mars 1999;62(3):277-9</u>	101
<u>Hartváni P, Dalmadi I, Knorr D. Electronic nose investigation of <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> inoculated apple and orange juice treated by high hydrostatic pressure. Food Control. juill 2013;32(1):262-9</u>	102
<u>Silva FVM, Tan EK, Farid M. Bacterial spore inactivation at 45–65 °C using high pressure processing: Study of <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> in orange juice. Food Microbiol. 1 oct 2012;32(1):206-11</u>	103
<u>Doğan C, Erkmen O. High pressure inactivation kinetics of <i>Listeria monocytogenes</i> inactivation in broth, milk, and peach and orange juices. J Food Eng. mars 2004;62(1):47-52</u>	104
<u>Zimmermann M, Schaffner DW, Araújo GMF. Modeling the inactivation kinetics of <i>Bacillus coagulans</i> spores in tomato pulp from the combined effect of high pressure and moderate temperature. 2013</u>	105
<u>RÉSULTATS D'INACTIVATION EN TAMPON À PH = 7 :</u>	106
<u>Patterson MF, Quinn M, Simpson R, Gilmour A. Sensitivity of Vegetative Pathogens to High Hydrostatic Pressure Treatment in Phosphate-Buffered Saline and Foods. J Food Prot.</u>	106
<u>Ramaswamy HS, Shao Y, Bussey J, Austin J. Screening of twelve <i>Clostridium botulinum</i> (group I) spores for high-pressure resistance at elevated-temperatures. Food Bioprod Process. 1 oct 2013;91(4):403-12</u>	107
<u>RÉSULTATS D'INACTIVATION DANS LES PRODUITS CARNÉS :</u>	108
<u>Bajovic B, Bolumar T, Heinz V. Quality considerations with high pressure processing of fresh and value added meat products. Meat Sci. nov 2012;92(3):280-9</u>	108
<u>Zhu S, Naim F, Marcotte M, Ramaswamy H, Shao Y. High-pressure destruction kinetics of <i>Clostridium sporogenes</i> spores in ground beef at elevated temperatures. Int J Food Microbiol. 15 août 2008;126(1):86-92</u>	109
<u>Evelyn, Silva FVM. Modeling the inactivation of psychrotrophic <i>Bacillus cereus</i> spores in beef slurry by 600MPa HPP combined with 38–70°C: Comparing with thermal processing and estimating the energy requirements. Food Bioprod Process. 1 juill 2016;99:179-87</u>	109
<u>RESULTATS D'INACTIVATION DANS LE LAIT (PH = 6,6) :</u>	110
<u>Buzrul S, Alpas H, Largeteau A, Demazeau G. Inactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Listeria innocua</i> in kiwifruit and pineapple juices by high hydrostatic pressure. Int J Food Microbiol. 10 juin 2008;124(3):275-8</u>	110
<u>Doğan C, Erkmen O. High pressure inactivation kinetics of <i>Listeria monocytogenes</i> inactivation in broth, milk, and peach and orange juices. J Food Eng. mars 2004;62(1):47-52</u>	111

[*Zhu S, Naim F, Marcotte M, Ramaswamy H, Shao Y. High-pressure destruction kinetics of Clostridium sporogenes spores in ground beef at elevated temperatures. Int J Food Microbiol. 15 août 2008;126\(1\):86-92.....111*](#)

[REGLEMENTATION DES NOVEL FOOD : 112](#)

[RÈGLEMENT D'EXÉCUTION \(UE\) 2018/1023 DE LA COMMISSION du 23 juillet 2018 portant rectification du règlement d'exécution \(UE\) 2017/2470 établissant la liste de l'Union des nouveaux aliments.....112](#)

[RÈGLEMENT \(UE\) 2015/2283 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 25 novembre 2015.....114](#)

Les variations dans les résultats obtenus dans les différentes études rassemblées dans les tableaux suivants peuvent s'expliquer par une différence entre :

- les espèces
- les souches
- le milieu de culture pour dénombrement
- le milieu de sporulation (pour les espèces sporulées)
- les variations de température
- les variations de pH

*Résultats d'inactivation dans les jus et purées dérivés de fruits ou
de légumes :*

*Tola YB, Ramaswamy HS. Combined effects of high pressure, moderate heat and pH
on the inactivation kinetics of Bacillus licheniformis spores in carrot juice. Food Res
Int. 1 août 2014;62:50-8*

<i>Espèce</i>	Matrice	pH	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Bacillus licheniformis</i>	carotte	6,2	400	8	60	3
<i>Bacillus licheniformis</i>	carotte	6,2	500	8	60	3
<i>Bacillus licheniformis</i>	carotte	6,2	600	7	50	3
<i>Bacillus licheniformis</i>	carotte	4,5	400	6	60	3
<i>Bacillus licheniformis</i>	carotte	4,5	600	5	50	3
<i>Bacillus licheniformis</i>	carotte	4,5	500	5	60	3
<i>Bacillus licheniformis</i>	carotte	6,2	600	2	60	3
<i>Bacillus licheniformis</i>	carotte	4,5	600	2	60	3

(30)

Bayındırlı A, Alpas H, Bozoğlu F, Hızal M. Efficiency of high pressure treatment on inactivation of pathogenic microorganisms and enzymes in apple, orange, apricot and sour cherry juices. Food Control. janv 2006;17(1):52-8

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	pH	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Staphylococcus aureus</i>	485	abricot	3,8	250	5	30	4,1
<i>Staphylococcus aureus</i>	485	orange	3,76	250	5	30	4,3
<i>Staphylococcus aureus</i>	485	griotte	3,3	250	5	30	4,3
<i>Salmonella enterica enterica Enteritidis</i>		abricot	3,8	250	5	30	4,8
<i>E. coli O157 :H7</i>	933	abricot	3,8	250	5	30	4,9
<i>E. coli O157 :H7</i>	933	orange	3,76	250	5	30	5,1
<i>Salmonella enterica enterica Enteritidis</i>		orange	3,76	250	5	30	5,3
<i>E. coli O157 :H7</i>	933	griotte	3,3	250	5	30	5,3
<i>Salmonella enterica enterica Enteritidis</i>		griotte	3,3	250	5	30	5,5

(45)

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	pH	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Staphylococcus aureus</i>	485	pomme	3,5	350	5	40	6,8
<i>Staphylococcus aureus</i>	485	abricot	3,8	350	5	40	6,9
<i>E. coli O157 :H7</i>	933	griotte	3,3	350	5	40	7,1
<i>Staphylococcus aureus</i>	485	orange	3,76	350	5	40	7,3
<i>E. coli O157 :H7</i>	933	abricot	3,8	350	5	40	7,3
<i>Staphylococcus aureus</i>	485	griotte	3,3	350	5	40	7,4
<i>E. coli O157 :H7</i>	933	orange	3,76	350	5	40	7,4
<i>E. coli O157 :H7</i>	933	pomme	3,5	350	5	40	7,7
<i>Salmonella enterica enterica Enteritidis</i>		pomme	3,5	350	5	40	7,8
<i>Salmonella enterica enterica Enteritidis</i>		abricot	3,8	350	5	40	8

(45)

Linton M, McCLEMENTS MJ, Patterson MF. Inactivation of Escherichia coli O157:H7 in Orange Juice Using a Combination of High Pressure and Mild Heat. J Food Prot. 1 mars 1999;62(3):277-9

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	pH	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>E. coli</i> O157 :H7	NCTC 12079	orange	3,9	400	5	20	2,7
<i>E. coli</i> O157 :H7	NCTC 12079	orange	3,9	400	5	30	4,2
<i>E. coli</i> O157 :H7	933	abricot	3,8	250	5	30	4,9
<i>E. coli</i> O157 :H7	933	orange	3,76	250	5	30	5,1
<i>E. coli</i> O157 :H7	NCTC 12079	orange	3,9	500	5	20	5,6
<i>E. coli</i> O157 :H7	NCTC 12079	orange	3,9	500	5	30	6,9
<i>E. coli</i> O157 :H7	NCTC 12079	orange	3,9	550	5	20	7
<i>E. coli</i> O157 :H7	NCTC 12079	orange	3,9	550	5	30	7

(46)

Hartyáni P, Dalmadi I, Knorr D. Electronic nose investigation of Alicyclobacillus acidoterrestris inoculated apple and orange juice treated by high hydrostatic pressure. Food Control. juill 2013;32(1):262-9

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	DSMZ 2498	pomme	200	10	60	3
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	DSMZ 2498	pomme	400	9	50	3
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	DSMZ 2498	orange	400	9	60	3
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	DSMZ 2498	pomme	600	9	50	3
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	DSMZ 2498	orange	600	9	50	3
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	DSMZ 2498	pomme	400	8	60	3
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	DSMZ 2498	pomme	600	8	60	3
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	DSMZ 2498	orange	600	8	60	3

(47)

Silva FVM, Tan EK, Farid M. Bacterial spore inactivation at 45–65 °C using high pressure processing: Study of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in orange juice. Food Microbiol. 1 oct 2012;32(1):206-11

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	pH	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	NZRM 4099	orange	3,8	600	10	65	3

(48)

Dogan C, Erkmen O. High pressure inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* inactivation in broth, milk, and peach and orange juices. J Food Eng. mars 2004;62(1):47-52

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	pH	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	pêche	5,2	300	5	25	1,7
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	pêche	5,2	400	5	25	3,3
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	orange	3,6	300	5	25	3,8
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	pêche	5,21	600	5	25	4,4
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	orange	3,55	400	5	25	6,2
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	orange	3,55	600	5	25	7,3

(49)

Zimmermann M, Schaffner DW, Aragão GMF. Modeling the inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores in tomato pulp from the combined effect of high pressure and moderate temperature. 2013

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	pH	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Bacillus coagulans</i>	ATCC 7050	tomate	4,3	550	9	60	3
<i>Bacillus coagulans</i>	ATCC 7050	tomate	4,3	600	8	60	3

(50)

Résultats d'inactivation en tampon à pH =7 :

Patterson MF, Quinn M, Simpson R, Gilmour A. Sensitivity of Vegetative Pathogens to High Hydrostatic Pressure Treatment in Phosphate-Buffered Saline and Foods. J Food Prot.

Espèce	Souche	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>E. coli</i> O 157 :H7	H1071	phosphate 0,1M	600	5	20	6
<i>E. coli</i> O 157 :H7	H631	phosphate 0,1M	600	5	20	5
<i>Listeria monocytogenes</i>	2433	phosphate 0,1M	400	5	20	4,6
<i>Listeria monocytogenes</i>	2433	phosphate 0,1M	375	5	20	3,2
<i>Listeria monocytogenes</i>	2433	phosphate 0,1M	375	5	20	3,1
<i>Listeria monocytogenes</i>	2433	phosphate 0,1M	350	5	20	2,5
<i>E. coli</i> O 157 :H7	NCTC 12079	phosphate 0,1M	600	5	20	1,9
<i>Listeria monocytogenes</i>	Scott A	phosphate 0,1M	375	5	20	0,9
<i>Listeria monocytogenes</i>	NCTC 11994	phosphate 0,1M	375	5	20	0,5

(4)

Ramaswamy HS, Shao Y, Bussey J, Austin J. Screening of twelve *Clostridium botulinum* (group I) spores for high-pressure resistance at elevated-temperatures. Food Bioprod Process. 1 oct 2013;91(4):403-12

Espèce	Souche	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Clostridium botulinum</i>	GAOIOIAJO	phosphate 0,1M	900	1,8	100	3
<i>Clostridium botulinum</i>	CK2-A	phosphate 0,1M	900	2	100	3
<i>Clostridium botulinum</i>	A6	phosphate 0,1M	900	2	100	3
<i>Clostridium botulinum</i>	GA0108BEC	phosphate 0,1M	900	2	100	3
<i>Clostridium botulinum</i>	HO9504A	phosphate 0,1M	900	2,6	100	3
<i>Clostridium botulinum</i>	PA9508B	phosphate 0,1M	900	5,4	100	3
<i>Clostridium botulinum</i>	MRB	phosphate 0,1M	900	6,9	90	3
<i>Clostridium botulinum</i>	IBI-B	phosphate 0,1M	800	8,1	90	3
<i>Clostridium botulinum</i>	MRB	phosphate 0,1M	800	8,7	90	3
<i>Clostridium botulinum</i>	13983B	phosphate 0,1M	900	10	90	3

(51)

Résultats d'inactivation dans les produits carnés :

Bajovic B, Bolumar T, Heinz V. Quality considerations with high pressure processing of fresh and value added meat products. Meat Sci. nov 2012;92(3):280-9

Espèce	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Listeria monocytogenes</i>	volaille	500	1	40	3,8
<i>Campylobacter jejuni</i>	porc	300	10	25	6
<i>Campylobacter jejuni</i>	volaille	375	10	25	6
<i>Yersinia enterocolitica</i>	porc	300	10	25	6
<i>Lactobacillus sakei</i>	jambon cuit	500	10	40	4
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	bœuf	200	20	20	5
<i>Staphylococcus aureus</i>	jambon cuit	500	10	40	1,3

(21)

Zhu S, Naim F, Marcotte M, Ramaswamy H, Shao Y. High-pressure destruction kinetics of *Clostridium sporogenes* spores in ground beef at elevated temperatures. Int J Food Microbiol. 15 août 2008;126(1):86-92

Espèce	Souche	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Clostridium sporogenes</i>	ATCC 7955	bœuf	900	1,9	100	3
<i>Clostridium sporogenes</i>	ATCC 7955	bœuf	800	3,1	100	3
<i>Clostridium sporogenes</i>	ATCC 7955	bœuf	700	4,6	100	3
<i>Clostridium sporogenes</i>	ATCC 7955	bœuf	900	6,9	90	3
<i>Clostridium sporogenes</i>	ATCC 7955	bœuf	800	9,9	90	3

(52)

Evelyn, Silva FVM. Modeling the inactivation of psychrotrophic *Bacillus cereus* spores in beef slurry by 600MPa HPP combined with 38–70°C: Comparing with thermal processing and estimating the energy requirements. Food Bioprod Process. 1 juill 2016;99:179-87

Espèce	Souche	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Bacillus cereus</i>	ICMP 12442	bœuf	600	9	60	3

(53)

Résultats d'inactivation dans le lait (pH = 6,6) :

Buzrul S, Alpas H, Largeteau A, Demazeau G. Inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* in kiwifruit and pineapple juices by high hydrostatic pressure. *Int J Food Microbiol.* 10 juin 2008;124(3):275-8

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Listeria innocua</i>	ATCC 33090	Lait cru entier	600	5	22	3,7
<i>Listeria innocua</i>	ATCC 33090	Lait cru entier	600	5	22	3,5
<i>Listeria innocua</i>	ATCC 33090	Lait cru entier	550	5	22	2,4
<i>Listeria innocua</i>	ATCC 33090	Lait cru entier	550	5	22	2,4
<i>Escherichia coli</i>	ATCC 11775	Lait entier	500	5	22	1,4
<i>Listeria innocua</i>	ATCC 33090	Lait cru entier	500	5	22	1,3

(25)

Dogan C, Erkmen O. High pressure inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* inactivation in broth, milk, and peach and orange juices. J Food Eng. mars 2004;62(1):47-52

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	Lait cru entier	600	5	25	4,8
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	Lait cru entier	400	5	25	2,5
<i>Listeria monocytogenes</i>	4a KUEN 136	Lait cru entier	300	5	25	1,9

(49)

Zhu S, Naim F, Marcotte M, Ramaswamy H, Shao Y. High-pressure destruction kinetics of *Clostridium sporogenes* spores in ground beef at elevated temperatures. Int J Food Microbiol. 15 août 2008;126(1):86-92

<i>Espèce</i>	Souche	Matrice	Pression (MPa)	Temps de traitement (min)	Température (°C)	Destruction (Log UFC)
<i>Clostridium sporogenes</i>	ATCC 11437	Lait UHT	900	2,2	100	3
<i>Clostridium sporogenes</i>	ATCC 11437	Lait UHT	800	2,4	100	3
<i>Clostridium sporogenes</i>	ATCC 11437	Lait UHT	700	3	100	3

(52)

Règlementation des novel food :

RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2018/1023 DE LA COMMISSION du 23 juillet 2018
portant rectification du règlement d'exécution (UE) 2017/2470 établissant la liste de
l'Union des nouveaux aliments

Tableau 1 : Nouveaux aliments autorisés

Nouvel aliment autorisé	Catégorie de denrées alimentaires spécifiée	Exigences en matière d'étiquetage spécifique supplémentaire	Autres exigences
Préparations pasteurisées à base de fruits produites au moyen d'un traitement à haute pression	Types de fruits : abricots, ananas, bananes, cerises, figues, fraises, framboises, mandarines, mangues, melons, mûres, myrtilles, noix de coco, pamplemousses, pêches, poires, pommes, prunes, raisins, rhubarbes	L'indication « pasteurisées par traitement à haute pression » figure après le nom des préparations de fruits proprement dites, ainsi que sur tout produit pour lequel ce procédé est utilisé	

(54)

Tableau 2 : Spécifications

Nouvel aliment autorisé	Spécifications		
Préparations pasteurisées à base de fruits produites au moyen d'un traitement à haute pression	<i>Paramètre</i>	<i>Objectif</i>	<i>Remarques</i>
	Stockage des fruits avant le traitement à haute pression	Au minimum 15 jours à – 20 °C	Fruits récoltés et stockés selon les principes de bonnes pratiques agricoles et de fabrication en matière d'hygiène
	Addition de fruits	De 40 à 60 % de fruits décongelés	Fruits homogénéisés et ajoutés à d'autres ingrédients
	pH	3,2 à 4,2	
	°Brix	7 à 42	Garanti par l'addition de sucres
	A _w	< 0,95	Garanti par l'addition de sucres
	Stockage final	60 jours au maximum à + 5 °C au maximum	Équivalent au régime de stockage des produits transformés par un procédé classique

(54)

RÈGLEMENT (UE) 2015/2283 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL

du 25 novembre 2015

Article 3

Définitions

1. Aux fins du présent règlement, les définitions figurant aux articles 2 et 3 du règlement (CE) no 178/2002 s'appliquent.

2. En outre, on entend par:

a) «nouvel aliment», toute denrée alimentaire dont la consommation humaine était négligeable au sein de l'Union avant le 15 mai 1997, indépendamment de la date d'adhésion à l'Union des États membres, et qui relève au moins d'une des catégories suivantes:

i) les denrées alimentaires avec une structure moléculaire nouvelle ou délibérément modifiée, dès lors que cette structure n'a pas été utilisée en tant qu'aliment ou dans un aliment au sein de l'Union avant le 15 mai 1997;

ii) les denrées alimentaires qui se composent de micro-organismes, de champignons ou d'algues, ou qui sont isolées ou produites à partir de micro-organismes, de champignons ou d'algues; 11.12.2015 FR Journal officiel de l'Union européenne L 327/7

iii) les denrées alimentaires qui se composent de matériaux d'origine minérale, ou qui sont isolées ou produites à partir de matériaux d'origine minérale;

iv) les denrées alimentaires qui se composent de végétaux ou de parties de végétaux, ou qui sont isolées ou produites à partir de végétaux ou de parties de végétaux, excepté lorsque les denrées ont un historique d'utilisation sûre en tant que denrées alimentaires au sein de l'Union, et qu'elles se composent d'une plante ou d'une variété de la même espèce, ou sont isolées ou produites à partir d'une plante ou d'une variété de la même espèce obtenue par: — des pratiques de multiplication traditionnelles utilisées pour la production de denrées alimentaires dans l'Union avant le 15 mai 1997, ou — des pratiques de multiplication non traditionnelles qui n'étaient pas utilisées pour la production de denrées alimentaires dans l'Union avant le 15 mai 1997, lorsque ces pratiques n'entraînent pas de modifications significatives de la

composition ou de la structure de la denrée alimentaire affectant sa valeur nutritionnelle, son métabolisme ou sa teneur en substances indésirables;

v) les denrées alimentaires qui se composent d'animaux ou de leurs parties, ou qui sont isolées ou produites à partir d'animaux ou de leurs parties, à l'exception des animaux obtenus par des pratiques de reproduction traditionnelles qui ont été utilisées pour la production de denrées alimentaires dans l'Union avant le 15 mai 1997, et pour autant que les denrées alimentaires provenant de ces animaux aient un historique d'utilisation sûre en tant que denrées alimentaires au sein de l'Union;

vi) les denrées alimentaires qui se composent de cultures cellulaires ou tissulaires dérivées d'animaux, de végétaux, de micro-organismes, de champignons ou d'algues, ou qui sont isolées ou produites à partir de cultures cellulaires ou tissulaires dérivées d'animaux, de végétaux, de micro-organismes, de champignons ou d'algues;

vii) les denrées alimentaires résultant d'un procédé de production qui n'était pas utilisé pour la production de denrées alimentaires dans l'Union avant le 15 mai 1997, qui entraîne des modifications significatives dans la composition ou la structure d'une denrée alimentaire, lesquelles affectent sa valeur nutritionnelle, son métabolisme ou sa teneur en substances indésirables;

viii) les denrées alimentaires qui se composent de nanomatériaux manufacturés, tels qu'ils sont définis au point f) du présent paragraphe;

ix) les vitamines, les minéraux et les autres substances utilisés conformément à la directive 2002/46/CE, au règlement (CE) no 1925/2006 ou au règlement (UE) no 609/2013, dans les cas où: — un procédé de production qui n'était pas utilisé pour la production de denrées alimentaires dans l'Union avant le 15 mai 1997, tel qu'il est visé au point a) vii) du présent paragraphe, a été mis en œuvre, ou — ils contiennent des nanomatériaux manufacturés, tels qu'ils sont définis au point f) du présent paragraphe, ou sont constitués de tels nanomatériaux;

x) les denrées alimentaires utilisées exclusivement dans des compléments alimentaires au sein de l'Union avant le 15 mai 1997, lorsqu'elles sont destinées à être utilisées dans des denrées alimentaires autres que des compléments alimentaires tels qu'ils sont définis à l'article 2, point a), de la directive 2002/46/CE

(37)

RESUME en français

Le traitement par les hautes pressions est une technologie de pasteurisation innovante ne nécessitant pas de chaleur. Son coût énergétique est faible et il consomme peu d'eau ce qui permet de réduire l'impact environnemental des entreprises.

La pression impacte principalement les liaisons non covalentes et son effet est maximal sur les macromolécules, elle permet notamment de dissocier les agrégats protéiques. Son effet sur les cellules est influencé par la nature de la matrice.

Utilisées initialement sur les produits agroalimentaires, dans la filière fruits et légumes, les produits de la mer et les produits carnés, les HP permettent d'obtenir les mêmes niveaux de sécurité microbiologique que la pasteurisation thermique.

L'utilisation des HP s'est ensuite étendue dans les domaines de la santé. Par exemple en cancérologie et en immunologie, pour le traitement du plasma, la création de vaccins viraux ou l'optimisation de la synthèse enzymatique en bioréacteur.

English : High Hydrostatic Pressure to control the microbiological risk in the food industry and applications in healthcare

The high-pressure processing is an innovative technology of pasteurization which do not require heat. Its energy cost is low, consumes few water and reduces the environmental impact of the companies.

The pressure impacts mainly the noncovalent bonds, its effect is higher on the macromolecules and dissociates the protein aggregates. Its effect on living cells is influenced by the matrix they are in.

Initially used on food products, like fruits and vegetables, seafood and meat products. The HPP reaches the same levels of microbiological safety than thermal pasteurization.

The use of HP has then spread to the field of healthcare. In oncology, immunology, the treatment of plasma, the creation of viral vaccines or the optimization of enzymatic synthesis in bioreactors.

DISCIPLINE administrative : Pharmacie

MOTS-CLES :

Biotechnologies ; High Pressure Processing ; Pasteurisation ; Alimentation ; Santé

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE :

Directeur de thèse : Bergé Mathieu