

RECHERCHE • TECHNOLOGIE • APPLICATIONS

Génie des procédés

Emulsions alimentaires et foisonnement

sous la direction de

Jack Legrand

 Hermès

Lavoisier

Emulsions alimentaires et foisonnement

© 2013, Lavoisier, Paris

www.editions.lavoisier.fr

ISBN 978-2-7462-3203-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite" (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans cet ouvrage sont utilisés à des fins d'identification et sont des marques de leurs détenteurs respectifs.

Emulsions alimentaires et foisonnement

théorie et applications

sous la direction de
Jack Legrand

hermes
Science
—publications—

Lavoisier

Liste des auteurs

Marc ANTON
INRA
Nantes

Audrey ARNOULD
INRA
Nantes

Thomas CROGUENNEC
Agrocampus Ouest
Rennes

Anne DESRUMAUX[†]
GEPEA
ONIRIS
Nantes

Gholamreza DJELVEH
Institut Pascal
ENSCCF
Clermont-Ferrand

Jean-Paul DOULIEZ
INRA
Nantes

Anne-Laure FAMEAU
INRA
Nantes

Bérénice HOUINSOU HOUSSOU
INRA
Nantes

Valérie LECHEVALIER
Agrocampus Ouest
INRA
Rennes

Anne-Claude LEFEBVRE
CRITT Santé Bretagne
Rennes

Jack LEGRAND
GEPEA
Université de Nantes
Saint-Nazaire

Catherine LOISEL
GEPEA
ONIRIS
Nantes

Christelle LOPEZ
Agrocampus Ouest
INRA
Rennes

Françoise NAU
Agrocampus Ouest
INRA
Rennes

Catherine SCHORSCH
Danone Research
Centre National Daniel Carasso
Palaiseau

Francis THÉVENET
NEXIRA
Rouen

Christophe VIAL
Institut Pascal
Université Blaise Pascal
Clermont-Ferrand

Table des matières

Avant-propos	13
Catherine LOISEL et Jack LEGRAND	
Chapitre 1. Formulation des émulsions et des mousses alimentaires	15
Catherine LOISEL et Anne-Claude LEFEBVRE	
1.1. Emulsions et mousses alimentaires : définitions	15
1.1.1. Microstructure des émulsions et mousses.	17
1.1.2. Démarche de formulation	20
1.2. Formation des émulsions et des mousses	21
1.2.1. Principales étapes de la réalisation d'une émulsion	21
1.2.2. Application à la réalisation de sauces et de crèmes dessert	23
1.2.3. Principales étapes de la réalisation d'une mousse	27
1.3. Phénomènes de déstabilisation des émulsions et des mousses	29
1.3.1. Déstabilisation des émulsions.	29
1.3.2. Déstabilisation des mousses.	39
1.4. Ingrédients et additifs dans la formulation des émulsions et des mousses.	41
1.4.1. Les protéines.	42
1.4.2. Les agents émulsifiants non protéiques	54
1.4.3. Les agents texturants glucidiques	62
1.4.4. Les matières grasses : un rôle-clé	74
1.4.5. Les sucres	78
1.5. Méthodologie de la formulation de produits alimentaires.	80
1.5.1. Définition des objectifs du projet : le cahier des charges fonctionnel	82
1.5.2. La sélection de la stratégie expérimentale	83

1.5.3. Phase de <i>screening</i> des facteurs	85
1.5.4. Phase d'optimisation	86
1.5.5. Phase de validation	87
1.6. Conclusion	93
1.7. Bibliographie	94

Chapitre 2. Tensioactifs, mousses et émulsions 99

Anne-Laure FAMEAU, Audrey ARNOULD, Bérénice HOUINSOU HOUSSOU
et Jean-Paul DOULIEZ

2.1. Introduction.	99
2.2. Propriétés des tensioactifs	100
2.2.1. Définition d'un tensioactif.	100
2.2.2. Différentes classes de tensioactifs	101
2.2.3. Micellisation	103
2.2.4. Balance hydrophilie-lipophilie	109
2.2.5. Agrégats formés par les tensioactifs	111
2.3. Assemblages d'acides gras et propriétés tensioactives associées	115
2.3.1. Généralités sur les acides gras	115
2.3.2. Solubilité des acides gras	116
2.3.3. Dispersion des acides gras dans l'eau	117
2.3.4. Les vésicules d'acides gras	119
2.3.5. Micelles d'acides gras	121
2.3.6. Bicouches lipidiques et tubes d'acides gras.	124
2.4. Les émulsions	128
2.4.1. Définition.	128
2.4.2. Paramètres énergétiques de la formation des émulsions	128
2.4.3. Stabilité des émulsions.	134
2.4.4. Les émulsifiants	138
2.4.5. Interactions colloïdales.	139
2.4.6. Emulsions obtenues à partir d'assemblages d'acides gras	142
2.5. Les mousses	143
2.5.1. Définition.	143
2.5.2. Structure d'une mousse	143
2.5.3. Formation d'une mousse.	145
2.5.4. Déstabilisation des mousses.	147
2.5.5. Stabilisation des mousses	152
2.5.6. Caractérisation et étude des mousses aux différentes échelles.	155
2.5.7. Des mousses de plus en plus innovantes	156
2.5.8. Les premières mousses thermosensibles à base d'acides gras	158

2.6. Conclusion	159
2.7. Bibliographie	159
Chapitre 3. Procédés d'émulsification	167
Anne DESRUMAUX et Jack LEGRAND	
3.1. Introduction	167
3.2. Stabilité des émulsions	168
3.2.1. Considérations énergétiques	168
3.2.2. Mécanismes de déstabilisation réversibles	169
3.2.3. Mécanismes de déstabilisation irréversibles	173
3.2.4. Conclusion	176
3.3. Mécanismes physiques de la formation d'une phase dispersée	177
3.3.1. Mécanismes de fractionnement	177
3.3.2. Le phénomène de coalescence	184
3.4. Les différents procédés d'émulsification	188
3.4.1. Introduction	188
3.4.2. Les systèmes agités	189
3.4.3. Les systèmes statiques	193
3.4.4. Les homogénéisateurs hautes pressions	202
3.4.5. Critères de choix pour les émulsificateurs	208
3.5. Nomenclature	209
3.6. Bibliographie	212
Chapitre 4. Foisonnement des émulsions alimentaires	217
Christophe VIAL et Gholamreza DJELVEH	
4.1. Procédé de foisonnement et émulsions foisonnées	217
4.2. Généralités sur le foisonnement des émulsions	220
4.2.1. Objectifs et difficultés	220
4.2.2. Lien avec la formulation	222
4.3. Approche macroscopique du procédé de foisonnement	225
4.3.1. Principe	225
4.3.2. Les paramètres de contrôle	228
4.3.3. Mise en œuvre de l'opération de foisonnement	234
4.4. Le foisonnement au cœur de la production d'une émulsion foisonnée	246
4.4.1. Exemples d'applications industrielles	246
4.4.2. Analyse expérimentale de l'influence des paramètres d'action	251
4.5. Analyse du procédé de l'opération de foisonnement	264

4.5.1. Procédé discontinu <i>versus</i> procédé continu	265
4.5.2. Approche énergétique à l'échelle du foisonneur	269
4.5.3. Approche mécanique à l'échelle du foisonneur	272
4.5.4. Approche mécanique à l'échelle de la bulle	278
4.5.5. Extension au cas du foisonnement	287
4.5.6. Conclusion	289
4.6. Perspectives de développement	290
4.6.1. Une technologie encore sous-exploitée : les mélangeurs statiques	290
4.6.2. Une technologie pionnière : les techniques membranaires	292
4.6.3. Autres développements technologiques en cours	295
4.6.4. Développements théoriques en cours	295
4.7. Bibliographie	298
Chapitre 5. Les émulsions laitières	309
Christelle LOPEZ et Thomas CROGUENEC	
5.1. Introduction	309
5.2. Propriétés physico-chimiques de la matière grasse laitière	310
5.2.1. Composition de la matière grasse laitière	310
5.2.2. Les globules gras du lait	315
5.2.3. Cristallisation et propriétés thermiques de la matière grasse laitière	321
5.2.4. Instabilités des émulsions laitières	326
5.3. Les émulsions laitières : principales étapes technologiques de fabrication et applications	331
5.3.1. Les laits et crèmes de consommation	331
5.3.2. Produits laitiers fermentés : exemple du yaourt	343
5.3.3. Les fromages	347
5.3.4. Les crèmes glacées	349
5.3.5. Les beurres	353
5.4. Conclusion	358
5.5. Bibliographie	360
Chapitre 6. Fabrication des mousses laitières	367
Catherine SCHORSCH	
6.1. Introduction	367
6.2. Les mousses dans l'agro-alimentaire : de la tradition à l'industrialisation	369
6.2.1. Exemples et intérêt pratique	369

6.2.2. Définition et caractéristiques d'une mousse	369
6.2.3. Les enjeux de l'industrialisation des mousses	370
6.3. Les mousses laitières : du lait aux desserts lactés	371
6.3.1. Exemples de mousses laitières	372
6.3.2. Formulation des mousses laitières : quels ingrédients ?	373
6.3.3. Le choix des espèces stabilisantes	376
6.3.4. Procédés de fabrication d'une mousse laitière	378
6.3.5. Le foisonnement : phase-clé de la fabrication d'une mousse laitière.	381
6.4. Les deux secrets de la stabilité des mousses laitières	384
6.4.1. La stabilisation de l'interface gaz/liquide	386
6.4.2. La structuration de la phase continue	390
6.5. Le contrôle de la qualité des mousses	396
6.5.1. Contrôles physiques des mousses laitières	396
6.5.2. Contrôles sensoriels des mousses laitières	399
6.6. Conclusion	399
6.7. Bibliographie.	400
Chapitre 7. Les émulsions pour boissons	403
Francis THÉVENET	
7.1. Introduction.	403
7.2. Formulations	404
7.2.1. Emulsifiants hydrosolubles	404
7.2.2. Stabilisants liposolubles	408
7.2.3. Colorants	410
7.2.4. Acidifiants	411
7.2.5. Conservateurs	412
7.3. Procédé de fabrication d'une émulsion aromatique	412
7.3.1. Préparation de la phase aqueuse	414
7.3.2. Préparation de la phase huileuse	414
7.3.3. Réalisation de la pré-émulsion	414
7.3.4. Homogénéisation sous pression	415
7.4. Mécanisme de stabilisation d'une émulsion pour boisson	416
7.5. Mécanisme de déstabilisation d'une émulsion pour boisson	418
7.6. Méthodes de contrôle de la stabilité des émulsions	419
7.7. Formules spécifiques	422
7.7.1. Boissons claires type cola	422
7.7.2. Emulsions troublantes neutres	423
7.8. Conclusion	424
7.9. Bibliographie.	425

Chapitre 8. Les émulsions et les mousses à base d'œufs	427
Marc ANTON, Valérie LECHEVALIER et Françoise NAU	
8.1. Introduction : les propriétés techno-fonctionnelles des constituants de l'œuf.	427
8.2. Les constituants de l'œuf.	429
8.2.1. Le jaune d'œuf	429
8.2.2. Le blanc d'œuf	435
8.3. Les émulsions à base de jaune d'œuf.	441
8.3.1. Quelques définitions	441
8.3.2. Rôle des émulsifiants.	443
8.3.3. Rôle des constituants du jaune	445
8.3.4. Importance des interactions protéines-phospholipides	448
8.3.5. Mécanisme proposé.	449
8.4. Les mousses à base de blanc d'œuf.	453
8.4.1. Mécanismes de formation et stabilité des mousses	453
8.4.2. Le blanc d'œuf : une solution d'agents tensio-actifs	456
8.5. Conclusion	465
8.6. Bibliographie.	465
Index	479

Avant-propos

De nombreux aliments se présentent sous forme d'émulsions simples ou foisonnées, notamment le lait et ses dérivés (crème, beurre, etc.), la margarine, la mayonnaise, les mousses salées ou sucrées, etc. On trouve également des émulsions à certains stades intermédiaires de la production des aliments, par exemple les pâtes pour gâteaux. Il existe donc une grande diversité dans les émulsions alimentaires, tant au niveau de leurs propriétés physico-chimiques qu'à celui de leurs caractéristiques organoleptiques. Ceci est le résultat d'une forte interaction entre les ingrédients et les procédés de mise en œuvre dans ce que l'on pourrait appeler, le génie de la formulation, correspondant à l'expression anglo-américaine « product engineering ». Le génie de la formulation intègre différentes sciences nécessaires à la maîtrise de la qualité des produits, parmi lesquelles la biochimie, le génie des procédés, la physico-chimie et la rhéologie. L'ouvrage traite des différents aspects des émulsions et des mousses en agroalimentaire, en abordant les généralités concernant la formulation et les caractéristiques des ingrédients utilisés pour obtenir les propriétés d'usage requises (stabilité, fermeté, etc.) pour une émulsion ou une mousse. De même, les procédés mis en œuvre sont décrits de manière générale en relation avec les mécanismes recherchés (mélange, fractionnement, homogénéisation, etc.). Pour illustrer, les exemples traités sont liés aux filières des boissons, du lait et des œufs.

Le premier chapitre décrit les différents ingrédients, leur rôle sur la formation et la stabilité des émulsions et des mousses, ainsi qu'une méthodologie de formulation appliquée à des exemples de développement de produit. Le deuxième chapitre présente les différents types de tensioactifs, intégrant les assemblages d'acides gras, et leur fonctionnalité dans les émulsions et les mousses. La stabilité, les phénomènes de formation et les procédés d'émulsification sont abordés dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre traite des différents aspects du foisonnement d'une

émulsion, notamment les paramètres caractéristiques, les paramètres d'action, les exemples typiques et les procédés mis en jeu dans cette opération. Le cinquième chapitre traite des émulsions laitières, qui sont des émulsions naturelles de type huile dans l'eau à la base de nombreux produits laitiers. Ce chapitre est suivi de celui sur les mousses laitières industrielles portant sur la formulation et les étapes-clés de fabrication. Le chapitre 7 aborde les émulsions pour boissons, qui sont formulées pour permettre l'incorporation d'arômes généralement hydrophobes. Le dernier chapitre est consacré au rôle des constituants de l'œuf dans la formation et la stabilité des émulsions et mousses.

Hommage

Cet ouvrage a été écrit en hommage à Anne Desrumaux, disparue en 2006. Elle avait 36 ans. Après une thèse soutenue en 1996 à l'Université technologique Compiègne sous la direction du Professeur Jean-Marie Bouvier, elle avait été recrutée en 1997 comme Maître de conférences à Ecole nationale d'ingénieurs des techniques des industries agricoles et alimentaires (ENITIAA), devenue depuis ONIRIS. Son activité de recherche était rattachée au laboratoire GEPEA, Laboratoire de génie des procédés – environnement – agroalimentaire, UMR 6144 CNRS – Université de Nantes – Ecole des Mines de Nantes – ONIRIS. Dès son arrivée, elle a lancé, au sein du laboratoire, le thème de recherche sur les procédés d'émulsification par hautes pressions dynamiques en agroalimentaire, en mettant en œuvre une approche pluridisciplinaire, indispensable pour la compréhension des interactions formulation/procédé/produit. Elle a en particulier travaillé sur les mécanismes mis en jeu lors de l'émulsification par homogénéisation très hautes pressions, sur les modifications des constituants alimentaires sous l'effet de conditions thermomécaniques sévères et sur les interactions procédés/produits dans le cadre des émulsions foisonnées. Au cours de ses activités, elle a formé plusieurs doctorants (Juliane Floury, Hakim Bouaouina, Constanza Vecera, Najet Mahmoudi, Emeline Talansier), qui font carrière dans l'enseignement supérieur ou dans l'industrie. Ses activités remarquables lui ont permis de passer son Habilitation à diriger des recherches en 2005. Nous avons commencé à préparer cet ouvrage ensemble, en choisissant les thèmes permettant d'illustrer les émulsions et les mousses en agroalimentaires, et les auteurs les plus pertinents pour les aborder. Le temps a passé depuis, mais Anne Desrumaux est restée associée à cet ouvrage. Nous l'avons écrit pour elle, pour rendre hommage à sa grande compétence scientifique et à sa grande humanité.

Catherine LOISEL
Jack LEGRAND

L'agroalimentaire est très riche en produits conditionnés sous forme d'émulsions ou de mousses, comme le lait et ses dérivés, la margarine ou la mayonnaise. Il existe une grande diversité dans les émulsions alimentaires, tant au niveau de leurs propriétés physico-chimiques que de leurs caractéristiques organoleptiques. Ceci est le résultat d'une forte interaction entre les ingrédients et les procédés de mise en œuvre dans ce que l'on pourrait appeler « le génie de la formulation ». Celui-ci intègre les différentes sciences nécessaires à la maîtrise de la qualité des produits, parmi lesquelles la biochimie, le génie des procédés, la physico-chimie et la rhéologie.

Cet ouvrage traite des différents aspects des émulsions et des mousses en agroalimentaire, en abordant les généralités concernant la formulation et les caractéristiques des ingrédients utilisés pour obtenir les propriétés d'usage requises. Pour illustrer le propos, les exemples traités sont liés aux filières des boissons, du lait et des œufs.

Le coordonnateur

Professeur de génie des procédés à l'université de Nantes, Jack Legrand est spécialiste des procédés agroalimentaires et de valorisation des micro-organismes photosynthétiques. Il a créé et dirige depuis 2002 le Laboratoire de Génie des Procédés Environnement Agroalimentaire (GEPEA).