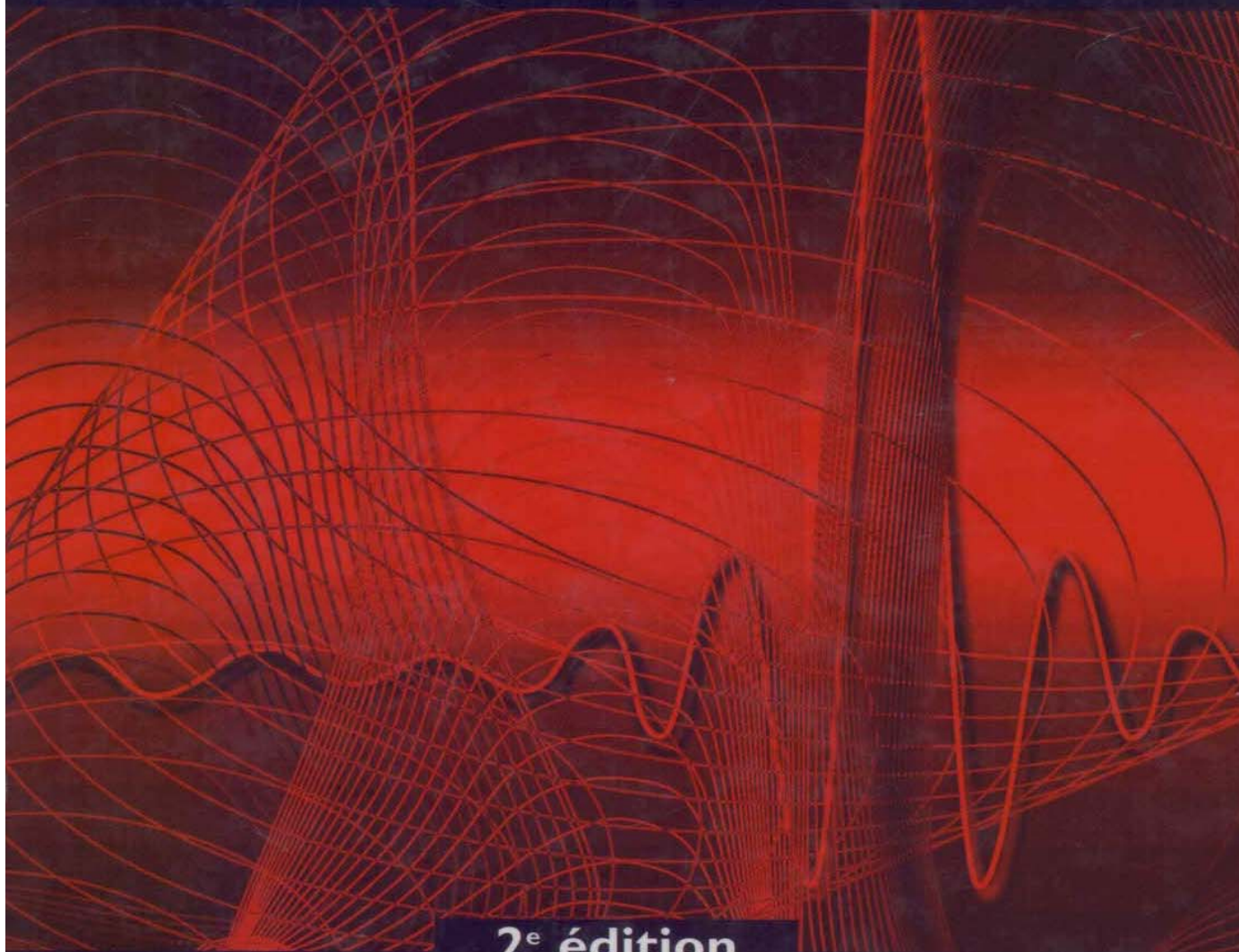




COLLECTION
SCIENCES & TECHNIQUES
AGROALIMENTAIRES

Dominique Bertrand • Éric Dufour
coordonnateurs



2^e édition

La spectroscopie infrarouge

et ses applications analytiques

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Table des matières

Avant-propos de la 1 ^{re} édition	III
Avant-propos de la 2 ^e édition	V

Première partie

Les méthodes d'analyse rapide dans les industries agroalimentaires

Chapitre 1

Les méthodes d'analyse rapide dans les industries agroalimentaires

(Dominique Bertrand)	3
1. Introduction	3
1.1. Les méthodes d'analyse rapide	5
1.2. Les méthodes spectroscopiques	7
1.2.1. Régions spectrales d'intérêt analytique	8
1.2.2. Place de la spectroscopie infrarouge parmi les méthodes d'analyse rapide des aliments	11
2. Histoire du développement analytique de la spectroscopie infrarouge	14
2.1. Les premières théories de la lumière	15
2.2. Théorie moderne de la lumière	17
2.3. Établissement des bases théoriques de la spectroscopie	19
2.3.1. Étude des raies des spectres atomiques	19
2.3.2. Mécanique quantique	20
2.4. Développement des techniques spectroscopiques	21
2.5. Développement des applications analytiques	23
2.6. Développement de la chimiométrie	25

3. Plan de l'ouvrage	26
Références bibliographiques	27

Deuxième partie

Introduction à la spectroscopie infrarouge

Chapitre 2

Introduction à la spectroscopie infrarouge (Gilbert Lachenal)	31
1. Nature et propriétés des radiations infrarouges	31
1.1. Propriétés des ondes électromagnétiques	32
1.2. Constantes optiques	34
1.3. Notions d'optique appliquées à la propagation d'une onde	34
1.4. Nature quantique de la lumière	36
2. Mécanique quantique	36
2.1. Fonction d'onde	37
2.2. Notion d'opérateur	37
2.3. Établissement de l'équation de Schrödinger	38
2.4. Équation de Schrödinger indépendante du temps	41
2.5. Approximation de Born-Oppenheimer	42
2.6. Théorie des perturbations	42
2.7. Distribution de Boltzmann	43
3. Spectroscopie vibrationnelle	43
3.1. Développement des modèles vibrationnels	43
3.1.1. Oscillateur harmonique	44
3.1.2. Oscillateur harmonique quantifié	46
3.1.3. Applications du modèle harmonique	48
3.1.4. Oscillateur anharmonique	49
3.1.5. Oscillateur anharmonique quantifié	51
3.1.6. Applications du modèle anharmonique	52
3.2. Vibration – Rotation	54
3.3. Interprétation générale des bandes d'absorption	56
3.4. Molécule polyatomique	56
3.4.1. Degrés de liberté	56
3.4.2. Symétrie et table de caractères	57
3.4.3. Calcul des niveaux d'énergie	64
3.4.4. Conséquence de l'anharmonicité	65
3.4.5. Modes normaux et résonance	67
3.5. Résonances	68
3.5.2. Résonance de Darling-Dennison	69
3.5.3. Interaction de Coriolis	70
3.6. Limites de la modélisation par les modes normaux	70
3.7. Modes locaux	71
3.8. Limites des modes locaux	73
Références bibliographiques	74

Troisième partie

Spectre des constituants
majeurs des aliments

Chapitre 3

Règles générales d'attribution des bandes spectrales (Paul Robert

et Éric Dufour)	80
1. Chaînes hydrocarbonées	80
2. Fonction hydroxyle	84
3. Fonction carbonyle	86
4. Fonction azotée	90
Références bibliographiques	92

Chapitre 4

Spectroscopie de l'eau (Dominique Bertrand)

	94
1. La molécule d'eau	94
1.1. Aspect quantique	94
1.1.1. Rappel théorique	94
1.1.2. Modèle quantique et orbitales de l'eau	96
2. Spectroscopie vibrationnelle de l'eau	98
2.1. Aspect théorique : spectre de la vapeur d'eau	98
2.2. Spectres de l'eau à l'état liquide	100
3. Effet de l'environnement sur le spectre de l'eau	102
3.1. Température	102
3.2. Présence de soluté et hydratation de substrats complexes	103
Références bibliographiques	104

Chapitre 5

Protéines (Éric Dufour et Paul Robert)

	107
1. Généralités sur la structure des protéines	107
1.1. De la séquence en acides aminés à la conformation	108
1.2. Caractéristiques et classification	109
2. Structure secondaire des protéines	111
2.1. Liaison peptidique	111
2.2. « Briques » de la structure secondaire	113
2.2.1. Hélices	113
2.2.2. Feuillettes	114
2.2.3. Autres structures	114
2.3. Motifs et domaines	114
3. Signaux des protéines dans l'infrarouge	115
3.1. Absorption de la liaison peptidique dans le moyen infrarouge	116
3.2. Absorption de la liaison peptidique dans le proche infrarouge	117
3.3. Absorption des chaînes latérales dans le moyen infrarouge	119
3.4. Absorption des chaînes latérales dans le proche infrarouge	121
4. Vibrations et structure secondaire des peptides et des protéines	121
4.1. Dans le moyen infrarouge	121

4.1.1. Hélices	122
4.1.2. Feuilletés	123
4.1.3. Autres structures	123
4.2. Dans le proche infrarouge	125
5. Problèmes liés à l'acquisition des spectres de protéines dans le moyen infrarouge ...	126
5.1. Vapeur d'eau	126
5.2. Méthodes de soustraction du signal de l'eau liquide	127
5.3. Cellules porte-échantillon de type « réflexion totale atténuée »	129
6. Prédiction de la structure secondaire des protéines	130
6.1. Méthode de prédiction utilisant la déconvolution par transformée de Fourier	130
6.2. Méthode de prédiction utilisant la dérivée seconde	131
6.3. Méthodes de prédiction basées sur l'analyse factorielle des spectres	132
7. Étude de la structure tertiaire et de la dynamique des protéines	133
8. Étude de la structure et des interactions des protéines dans les matrices alimentaires	133
Références bibliographiques	137

Chapitre 6

Lipides (<i>Alain Riaublanc, Dominique Bertrand et Éric Dufour</i>)	142
1. Caractéristiques biochimiques et physiques des lipides	142
1.1. Rappel sur la biochimie des lipides	142
1.1.1. Acides gras	142
1.1.2. Lipides complexes	145
1.2. Propriétés physiques des lipides	146
1.2.1. Triglycérides	146
1.2.2. Phospholipides	146
2. Étude spectrale	149
2.1. Moyen infrarouge	149
2.1.1. Attributions des principaux groupements chimiques des lipides	149
2.1.2. Modifications du spectre induites par l'état physique	154
2.2. Étude spectrale dans le proche infrarouge	158
3. Applications	160
3.1. Dosage des lipides	160
3.2. Indice d'iode et insaturation	161
3.3. Isomérisation cis-trans	162
3.4. Oxydation	162
3.5. Taux de solide	164
3.6. Authentification	165
3.7. Structure des triglycérides dans les fromages	168
Conclusion	171
Références bibliographiques	171

Chapitre 7

Glucides (<i>Jacqueline Maalouly et Benoît Jaillais</i>)	175
1. Caractéristiques biochimiques et physiques des glucides	175
1.1. Rappel sur la biochimie	175
1.1.1. Osés ou monosaccharides	176

1.1.2. Oligosaccharides	179
1.1.3. Polysaccharides digestibles/non digestibles	180
1.1.4. Hétérosides (glycoprotéine, glycolipide)	183
1.2. Propriété physicochimique des oses	183
1.3. Propriétés chimiques des glucides	183
2. Étude spectrale	184
2.1. Moyen infrarouge	184
2.1.1. Fonction alcool	185
2.1.2. Fonction éther	186
2.1.3. Autres fonctions	186
2.1.4. Revue bibliographique des sucres analysés en moyen infrarouge	187
2.1.5. Exemples de spectres de glucides purs dans le moyen infrarouge	189
2.1.6. Effet de la polymérisation (amidon, cellulose) et de la cristallinité	199
2.1.7. Effet du chauffage sur le spectre de l'amidon	200
2.1.8. Spectres moyen infrarouge de produits d'origine naturelle	202
2.1.9. Exploration des données et extraction de bandes caractéristiques des glucides en moyen infrarouge	202
2.2. Proche infrarouge (PIR)	205
2.2.1. Fonction alcool et liaison hydrogène	205
2.2.2. Revue bibliographique des sucres analysés en proche infrarouge	207
2.2.3. Exemples de spectres de glucides purs dans le proche infrarouge	209
2.2.4. Spectres proche infrarouge de produits d'origine naturelle	215
2.2.5. Exploration des données et extraction des bandes caractéristiques des glucides en proche infrarouge	217
2.3. Liaison entre proche et moyen infrarouge	218
2.3.1. Spectroscopie de corrélation 2D	218
2.3.2. Analyse du produit externe	218
3. Application	219
3.1. Dosage du sucre dans les betteraves sucrières	219
3.1.1. Introduction	219
3.1.2. Matériel et Méthodes	220
3.1.3. Analyse chimiométrique	220
Conclusion	227
Références bibliographiques	227

Quatrième partie

La mesure spectrale

Chapitre 8

Acquisition et traitement du signal spectrophotométrique

(Marc Meurens)	233
1. Mesure de la transmission	233
1.1. Relation linéaire simple	235
1.2. Relation linéaire multiple	236
2. Diffusion de la lumière	237

3. Mesure de la réflexion	238
4. Réflexion diffuse	239
4.1. Théorie de Kubelka-Munk	240
4.2. Raccourcissement du chemin optique	241
5. Réflexion totale atténuée	242
6. Amplification spectrale	243
Références bibliographiques	244

Chapitre 9

Instrumentation (<i>Dominique Bertrand et Vincent Baeten</i>)	248
1. Éléments constitutifs d'un système	248
1.1. Sources lumineuses	248
1.1.1. Sources thermiques	248
1.1.2. Diodes émettrices de lumière	250
1.1.3. Lasers et diodes à laser	251
1.2. Détecteurs photosensibles	252
1.2.1. Détecteurs thermiques	252
1.2.2. Détecteur à semi-conducteurs	253
1.2.3. Photoacoustique et détecteurs sonores	254
2. Principes des appareils	255
2.1. Instruments séquentiels	255
2.1.1. Systèmes à filtres optiques interférentiels	255
2.1.2. Systèmes à monochromateurs	262
2.2. Appareils multiplexés	265
2.2.1. Spectromètres multiplexés non dispersifs	266
2.2.2. Spectromètres multiplexés dispersifs	271
2.2.3. Spectromètres mettant en jeu plusieurs sources lumineuses	275
2.3. Les systèmes multicanaux et d'imagerie	277
2.3.1. Spectromètres multicanaux	277
2.3.2. Imagerie multispectrale et hyperspectrale	280
2.3.3. Imagerie hyperspectrale	285
3. Accessoires et dispositifs spéciaux	293
3.1. Cellules de mesure	293
3.2. Fibres optiques	294
3.2.1. Définition des caractéristiques optiques	294
3.2.2. Matériaux constitutifs	295
3.2.3. Mise en œuvre	296
3.3. Cellules de réflexion totale atténuée	298
3.3.1. Généralités	298
3.3.2. Dispositifs utilisant la réflexion totale atténuée	299
Références bibliographiques	301

Cinquième partie
Chimiométrie appliquée
à la spectroscopie infrarouge

Chapitre 10

Introduction à la chimiométrie (<i>Dominique Bertrand et El Mostafa Qannari</i>)	309
Introduction	309
1. Notation et généralité sur les données spectrales	312

Chapitre 11

Méthodes exploratoires (<i>Dominique Bertrand, Philippe Courcoux et El Mostafa Qannari</i>)	317
1. Observation directe des spectres et statistiques élémentaires	317
2. Analyse en composantes principales	319
2.1. Présentation géométrique de l'ACP	320
2.2. L'ACP vue comme une rotation d'un repère orthonormé	321
2.2.1. Démarche générale	321
2.2.2. Centrage des données et rotation dans l'espace	323
2.2.3. Contraintes imposées par l'ACP	324
2.2.4. Individus supplémentaires	326
2.2.5. Partitionnement de la somme des carrés de X	326
2.2.6. Mise en œuvre de l'ACP	326
2.3. Critère de maximisation de l'inertie	327
2.4. Intérêt de l'analyse en composantes principales en spectroscopie	328
2.4.1. Signification spectrale des vecteurs propres	328
2.4.2. Examen des cartes factorielles	331
2.4.3. Condensation de l'information	334
3. Méthodes de classification non supervisée	334
3.1. Méthodes de classification hiérarchique	335
3.1.1. Indice de dissimilarité entre individus	335
3.1.2. Règle d'agrégation entre classes	336
3.1.3. Algorithme	336
3.2. Exemples d'application de la classification hiérarchique	338
3.2.1. Premier exemple – Étude de produits de mouture du blé dur	338
3.2.2. Deuxième exemple – Étude de la variabilité génétique de la luzerne par SPIR	340
3.3. Partitionnement par la méthode d'agrégation autour des centres mobiles	342
3.3.1. Principe de la méthode	342
3.3.2. Illustration de la méthode	342
3.3.3. Variantes de la méthode	343

Chapitre 12

Méthodes prédictives (<i>Évelyne Vigneau, El Mostafa Qannari, Benoît Jaillais, Gérard Mazerolles et Dominique Bertrand</i>)	347
1. Régression linéaire	347

1.1. Régression linéaire simple	347
1.2. Régression linéaire multiple	353
1.3. Interprétation géométrique du modèle de régression	355
1.4. Sélection de variables	356
1.5. Alternatives à la régression linéaire multiple	359
1.5.1. Ridge regression	360
1.5.2. Régression en composantes principales	362
1.5.3. La régression par analyse des valeurs latentes	364
2. Méthode PLS	366
2.1. Principe de base	366
2.2. PLS2	372
3. Discrimination	373
3.1. Notations de base	374
3.2. Analyse factorielle discriminante	374
3.3. Analyse discriminante PLS	378
3.4. Approches d'affectation paramétriques	378
3.4.1. Analyse discriminante quadratique (ADQ)	378
3.4.2. Analyse discriminante linéaire (ADL)	379
3.4.3. Adaptations de l'ADQ au cas des données spectrales	379
3.5. Affectation non paramétrique	380
4. Analyse de tableaux multiples	380
4.1. Méthodes fondées sur l'exploitation des matrices de corrélations ou de covariances	382
4.1.1. Analyse par corrélogramme	382
4.1.2. 2D correlation spectroscopy	383
4.1.3. Outer product analysis	386
4.2. Méthodes reposant sur l'analyse de cube de données	387
4.3. Méthodes reposant sur la création de variables canoniques associées à chacun des tableaux	391
4.3.1. Analyse canonique	391
4.3.2. Analyse procustéenne	392
4.3.3. Analyse en composantes communes et poids spécifique	397

Chapitre 13

Méthodes du domaine de l'intelligence artificielle (*Dominique Bertrand*) — 403

1. Algorithmes génétiques	403
1.1. Présentation générale des algorithmes génétiques appliqués à la sélection de variables	404
1.1.1. Définition des paramètres de l'algorithme	404
1.1.2. Création d'une population initiale de chromosomes	405
1.1.3. Évaluation de l'adaptation de chaque chromosome	405
1.1.4. Sélection de deux organismes dans la population	405
1.1.5. Reproduction	405
1.1.6. Mutation	406
1.1.7. Réactualisation de la population	406
1.2. Exemples d'application	406
2. Réseaux neuronaux	408

2.1. Réseau neuronal multicouche	408
2.1.1. Neurone élémentaire	408
2.1.2. Système à trois couches	410
2.1.3. Développements et exemples d'application	413
2.2. Apprentissage non supervisé par les réseaux de neurones de Kohonen	417
2.2.1. Principe du réseau de Kohonen	417
2.2.2. Exemples d'applications	418
2.2.3. Reconnaissance de l'origine et de la modification des amidons	419
3. Méthodes fondées sur le concept de noyau	420
3.1. Fonctions radiales de base	421
3.1.1. Notion de prédiction locale	421
3.1.2. Régression sur les fonctions à noyau	423
3.2. Support vector machine regression	424

Chapitre 14

Prétraitement des données spectrales (<i>Dominique Bertrand et Évelyne Vigneau</i>)	428
1. Amélioration du signal	428
1.1. Normalisation et réduction des variations d'intensité des spectres	428
1.2. Lissage et convolution	430
1.3. Correction de la ligne de base et soustraction spectrale	431
1.3.1. Ligne de base	431
1.3.2. Soustraction spectrale	433
1.4. Dérivation	434
1.5. Multiplicative scatter correction	436
1.6. Conclusion	439
2. Condensation des données et élimination de la redondance	439
2.1. Sélection a priori de variables ou de spectres	440
2.1.1. Sélection de spectres	440
2.1.2. Sélection <i>a priori</i> de longueurs d'onde	441
2.2. Réduction des données par changement de variables	443
2.2.1. Maximisation de l'entropie	443
2.2.2. Transformation de Fourier	444

Chapitre 15

Transferts d'équation d'étalonnage et mise en réseau d'instruments (<i>Pierre Dardenne</i>)	450
1. Différences entre instruments	450
2. Réajustement des appareils et transfert d'équations d'étalonnage	454
2.1. Correction de la pente et du biais	454
2.2. Correction des spectres	456
2.2.1. Standardisation par régression sur les absorbances	457
2.2.2. Algorithme proposé par Shenk et Westerhaus	457

Chapitre 16

Une démarche générale pour l'établissement d'applications analytiques

<i>(Dominique Bertrand)</i>	459
1. Mesures de référence	459
2. Choix des échantillons d'étalonnage et préparation	461
3. Mesure spectrale	463
4. Étalonnage	464
5. Méthodes de validation des modèles prédictifs	466
6. Analyse en série et réajustement des modèles prédictifs	467
Références bibliographiques	468

Sixième partie

Applications

Chapitre 17

Discrimination et authentification des aliments et des ingrédients alimentaires par spectroscopie dans l'infrarouge proche et moyen

<i>(Gerard Downey)</i>	479
1. Introduction	479
1.1. Fondements analytiques de l'authentification	480
1.2. Procédures chimiométriques	481
1.2.1. Techniques discriminantes supervisées	481
1.2.2. Techniques de régression	484
1.3. Organisation du chapitre	484
2. Applications dans le domaine du proche infrarouge	484
2.1. Discrimination et authentification	484
2.1.1. Applications mettant en jeu des données spectrales discrètes	484
2.1.2. Applications mettant en jeu les composantes principales	486
2.1.3. Applications mettant en jeu des procédures de discrimination	488
2.2. Quantification des adultérations ou des contaminations	497
3. Applications dans le moyen infrarouge	497
3.1. Discrimination et authentification	498
3.1.1. Applications utilisant les coordonnées factorielles d'une ACP	498
3.1.2. Applications mettant en jeu une procédure de discrimination	498
3.2. Quantification de l'adultération ou de la contamination	501
4. Conclusion	501
Références bibliographiques	502

Chapitre 18

Utilisation de la spectroscopie proche infrarouge dans les industries céréalières *(Brian Osborne)*

1. Application en sélection des plantes	505
1.1. Blé	505
1.1.1. Rendement en farine	506

1.1.2. Absorption d'eau et mesures du farinographe	507
1.1.3. Force et extensibilité de la pâte	507
1.1.4. Gluténines et gliadines	507
1.1.5. Amidon	508
1.2. Orge	508
1.3. Blé dur (Durum)	510
1.4. Riz	510
2. Conduite des cultures et commercialisation	511
2.1. Analyse des tissus végétaux	511
2.2. Applications au niveau de l'exploitation agricole	511
2.3. Test à la réception des grains et séparation des lots	512
3. Contrôle de procédés	516
3.1. Capteur en ligne	516
3.2. Applications dans le domaine de la meunerie	516
3.2.1. Analyse en ligne du blé par spectroscopie infrarouge	517
3.2.2. Analyse en ligne de la farine	518
3.3. Applications en boulangerie et dans les industries de cuisson	522
3.3.1. Additifs	522
3.3.2. Pâte	522
3.3.3. Cuisson extrusion	524
3.3.4. Produits finis	525
3.4. Applications en brasserie	526
3.5. Analyse qualitative	526
Conclusion	527
Références bibliographiques	527

Chapitre 19

La spectroscopie proche infrarouge : une technologie d'appui

pour un « service intégral » en alimentation animale (Ana Garrido-Varo) — 537

1. Introduction	537
2. Nécessité d'un contrôle de la qualité des aliments des animaux	538
3. Principales caractéristiques d'un système opérationnel de contrôle de la qualité	538
3.1. Vitesse de réponse	539
3.2. Coût réduit	540
3.3. Haute répétabilité et reproductibilité	540
3.4. Technologie SPIR pour la prévision simultanée de paramètres utiles en alimentation et production animale	541
3.4.1. Prédiction par SPIR de paramètres chimiques traditionnels	542
3.4.2. Prédiction de la réponse animale : SPIR comparée aux méthodes de laboratoire	546
3.4.3. Prédiction de différents paramètres utiles dans le domaine de l'alimentation et de la production animale	550
4. La spectroscopie proche infrarouge : une méthode d'emploi général dans le domaine de l'alimentation animale	552
4.1. Exemples de services d'analyse utilisant la SPIR	552
4.2. Pour un « service intégral » en alimentation animale	555
Références bibliographiques	557

Chapitre 20

Identification et caractérisation des micro-organismes

<i>(Dominique Lefier)</i>	562
1. Préparation des échantillons	562
2. Analyse du spectre infrarouge de micro-organismes	563
3. Facteurs influençant le spectre infrarouge	565
3.1. Nature du milieu de culture	565
3.2. Conditions de culture	566
4. Traitement des données	567
4.1. Analyse par classification hiérarchique	567
4.2. Analyses multivariées	568
5. Applications	570
5.1. Discrimination des espèces du genre <i>Listeria</i>	570
5.2. Caractérisation d'une collection de souches d' <i>Hafnia alvei</i>	575
Conclusion	577
Références bibliographiques	579

Chapitre 21

Analyse du lait et des produits laitiers (*Rémy Grappin, Dominique Lefier et Gérard Mazerolles*)

583

1. Introduction	583
1.1. Objectif des contrôles	583
1.2. Composition et caractéristiques physiques du lait et des produits laitiers	584
1.3. Méthodes de référence de dosage des principaux composants du lait et des produits laitiers	585
1.3.1. Matière grasse	586
1.3.2. Protéines	586
1.3.3. Lactose	587
1.3.4. Extrait sec	587
1.4. Principales caractéristiques analytiques d'une méthode de dosage	587
1.4.1. Exactitude	587
1.4.2. Fidélité	587
1.4.3. Justesse	588
2. Analyse du lait en moyen infrarouge	590
2.1. Dosage des composants principaux : matière grasse, protéines et lactose	590
2.1.1. Analyse du spectre infrarouge du lait	590
2.1.2. Instrumentation	594
2.1.3. Caractéristiques analytiques	599
2.1.4. Origine des différences entre mesures infrarouge et méthodes de référence	601
2.1.5. Influence de facteurs biologiques et environnementaux	603
2.2. Dosage de composants particuliers : caséines et urée	605
2.2.1. Caséines et matière azotée soluble	605
2.2.2. Urée	607
3. Analyse du lait et des produits laitiers en proche infrarouge	608
3.1. Analyse de spectres PIR	609

3.2. Instrumentation	611
3.2.1. Caractéristiques techniques	611
3.2.2. Préparation des échantillons	613
3.2.3. Principe du calibrage des appareils	613
3.3. Caractéristiques analytiques	614
3.3.1. Répétabilité	615
3.3.2. Justesse	615
3.4. Utilisation de la fibre optique	618
3.4.1. Suivi de la coagulation du lait	618
3.4.2. Contrôle en ligne des procédés de fabrication	620
Conclusion	622
Références bibliographiques	623

Chapitre 22

Application de la spectroscopie proche infrarouge à l'analyse des viandes et des produits carnés

(Philippe Berge)	627
1. Besoins de la filière des viandes et des produits carnés	627
2. Contraintes imposées à l'application de la SPIR	628
2.1. Contraintes liées au produit	629
2.2. Contraintes liées aux méthodes de référence	630
2.3. Contraintes liées à la SPIR	630
3. Prédiction de la composition et des propriétés des viandes	632
3.1. Prédiction de la composition chimique (eau, protéines, matières grasses)	632
3.2. Prédiction du pH et de la capacité de rétention d'eau	635
3.3. Prédiction de la couleur	638
3.4. Prédiction de la tendreté	638
4. Autres applications de la SPIR pour la caractérisation des viandes	640
4.1. Discrimination selon le régime alimentaire des animaux	641
4.2. Discrimination selon le type de muscle, la catégorie de qualité de la carcasse, et la race	641
4.3. Discrimination selon l'espèce animale	641
4.4. Détection d'une congélation antérieure	642
4.5. Détermination de la température de cuisson	642
4.6. Contrôle en ligne de la qualité sanitaire des produits	642
Conclusion et perspectives	643
Références bibliographiques	643