

CONSERVATION ET STOCKAGE DES **GRAINS** ET **GRAINES** ET PRODUITS DERIVÉS

1

**Céréales, oléagineux, protéagineux,
aliments pour animaux**

Coordonnateur
J. L. MULTON

Collection **Sciences &
Techniques Agro-Ali-
mentaires** sous l'égide
de l'Association pour la
Promotion Industrie-Agri-
culture et sous le haut
patronage du Ministère
de la Recherche et de
l'Industrie et du Minis-
tère de l'Agriculture

lavoisier
TEC
&
DOC

apria

Table des matières

<i>Présentation de la collection</i>	V
<i>Liste des auteurs</i>	VII
<i>Préface</i>	XIX
<i>Avant-propos</i>	XXI

INTRODUCTION : Les mécanismes d'altération des grains et graines dans l'éco-système post-récolte, les pertes qui en résultent et les stratégies de défense des stocks	1
1. Composition de l'éco-système post-récolte et propriétés bio-physico-chimiques le caractérisant	3
1.1 Les grains après récolte : un ensemble d'êtres vivants en équilibre biologique instable - 1.2 Propriétés physiques des grains, intéressant les phénomènes de conservation - 1.3 Qualités nutritionnelles et technologiques à préserver	
2. Les mécanismes physico-chimiques de l'altération	15
2.1 Les causes d'altération - 2.2 Les facteurs du milieu - 2.3 Interactions entre les facteurs du milieu et entre les causes d'altération - 2.4 Conséquences technologiques des altérations	
3. Stratégie de défense des stocks et de diminution des pertes post-récolte	29
3.1 Définition de l'"état sanitaire" des grains - 3.2 Les critères d'altération - 3.3 La connaissance des durées probables de conservation - 3.4 Appréciation de l'aptitude au stockage d'un lot venant d'être collecté ; pour une politique de la qualité	
4. Moyens techniques utilisables pour la conservation des grains et graines	42
4.1 Conservation des grains à l'état sec - 4.2 Conservation des grains moyennement humides - 4.3 Conservation des grains très humides	

PARTIE I - LES STRUCTURES ÉCONOMIQUES ET TECHNIQUES	
DU STOCKAGE	59
1 Evolution historique des techniques et des politiques de stockage	61
1. Introduction	61
2. Les techniques	62
2.1 Les produits stockés - 2.2 La préparation des produits en vue de leur stockage - 2.3 La conservation des produits pendant leur stockage - 2.4 La préservation des produits stockés	
3. Stockage, production et société	72
3.1 Stockage et système technique - 3.2 Stockage et milieu physique : ravageurs, plantes cultivées - 3.3 Stockage et milieu physique : climat, hasard - 3.4 Stockage et société : disettes et "greniers d'abondance"	
3.5 Stockage et société : histoire et préhistoire	
4. Conclusion	79
2 La circulation des céréales françaises	82
1. Des exploitations agricoles aux collecteurs agréés	83
2. Des collecteurs agréés aux utilisateurs nationaux .	88
3. Du marché intérieur aux marchés extérieurs	90
3 Structure du stockage en France	97
1. Stockage et commercialisation	97
1.1 Le circuit commercial - 1.2 Les différents niveaux de stockage - 1.3. Circuit physique des céréales et circuit commercial -	
2. Description des différents niveaux de stockage . .	99
2.1 Importance respective des différentes capacités et leur évolution - 2.2 Caractéristiques des différents niveaux de stockage	
3. Perspectives de développement	109
3.1 Stockage de collecte - 3.2 Stockage secondaire	
PARTIE II - PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES GRAINS	113
4 Interactions entre l'eau et les constituants des grains et graines et produits dérivés	115
1. Paramètres de mesure de l'état de l'eau dans les grains et graines et leur interdépendance	116
1.1 La teneur en eau (H_2O %), grandeur quantitative -	
1.2 Le concept thermodynamique d'Activité de l'Eau - 1.3 Corrélation entre A_w et teneur en eau : la courbe isotherme de sorption-désorption	
2. Nature des interactions responsables de l'affinité entre l'eau et les aliments	119
2.1 La molécule d'eau - 2.2 Interactions à l'échelle moléculaire - 2.3 A l'échelle macromoléculaire -	

3. Caractéristiques et propriétés des courbes isothermes de sorption-désorption	133
3.1 Macromolécules (structures amorphes ou partiellement organisées) - 3.2 Petites molécules cristallines	
3.3 Courbes de sorption de mélanges ; additivité et risques d'interactions - 3.4 Modélisation mathématique des isothermes de sorption - 3.5 Cinétique du phénomène de sorption	
4. Propriétés fonctionnelles de l'eau adsorbée	144
4.1 Pouvoir solvant de l'eau - 4.2 La congélabilité de l'eau - 4.3 Mobilité des molécules d'eau - 4.4 Densité de l'eau adsorbée - 4.5 Propriétés calorimétriques - 4.6 Comparaison quantitative de ces différentes formes d'eau	
Annexe 1	157
1. Concept d'activité de l'eau (A_w)	157
2. Activité de l'eau et pression de vapeur	159
3. Activité de l'eau dans une solution	161
4. Activité de l'eau, pression osmotique et pression capillaire	161
4.1 Pression osmotique - 4.2 A_w , pression capillaire et diamètre des capillaires	
5. Relation entre l' A_w et la température	163
5.1 Dans un système en équilibre thermodynamique - 5.2 Dans un système en déséquilibre thermodynamique	
Annexe 2	167
Annexe 3	167
Annexe 4	183
Calcul de l' A_w dans un mélange	183
1. Cas des solutions aqueuses - 2 Mélanges polyphasiques	
5 Transferts de chaleur et de vapeur d'eau dans les grains conséquences en ventilation et stockage	187
1. Généralités	187
2. Transfert de chaleur et de vapeur d'eau entre les grains et l'air	188
3. Etude d'un modèle simplifié de transfert de chaleur et de vapeur d'eau dans une cellule ventilée	190
4. Commentaires sur ces résultats	194
5. Adaptation de ce modèle aux problèmes pratiques de la conservation du grain	195
6 Pertes de charges dues à l'écoulement unidimensionnel de l'air à travers des masses de grains - conséquences en ventilation	197
1. Pertes de charge dues au grain	197
1.1 Influence de la nature du grain - 1.2 Influence du poids spécifique en place - 1.3 Influence de la vitesse de l'air - 1.4 Influence de la hauteur des grains.	

2. Mesure des pertes de charge	204
2.1 Dispositif de mesure - 2.2 Méthodologie	
2.3 Mesures effectuées - 2.4 Equation de l'écoulement et discussion des résultats - 2.5 Prévision des pertes de charge unitaires pour différents poids spécifiques en place	
3. Conséquences en ventilation	206
3.1 Les pertes de charge dues au système de répartition de l'air - 3.2 Les pertes de charge dues au système de diffusion de l'air dans le grain - 3.3 Pertes de charge totales d'une installation 3.4 Choix du ventilateur	
7 Propriétés thermiques des grains - production de chaleur et de CO ₂	217
1. Facteurs agissant sur la production de chaleur et de gaz carbonique	217
1.1 Action de la température - 1.2 Action de l'humidité 1.3 Influence du moment de la récolte - 1.4 Stockage en cellule avec évolution de la microflore	
2. Formules de dégagement de gaz carbonique	219
3. Evolution de la température d'une masse de grain faiblement ventilée	219
3.1 Première forme - 3.2 Deuxième forme - 3.3 Coeffi- cient de multiplication des temps pour des humidités différentes	
4. Données numériques de dégagement de chaleur et de gaz carbonique	223
5. Applications	225
5.1 Mats - 5.2 Blé - 5.3 Mats	
6. Conclusion	226

PARTIE III - BIOLOGIE DES GRAINS ET GRAINES DANS L'ÉCO- SYSTÈME POST-RÉCOLTE 231

8 Les semences, organes de survie	233
1. Organes de résistance	233
1.1 Structure des semences - 1.2 Biologie des semences sèches : la vie ralentie - 1.3 Cas particulier des semen- ces qui ne supportent pas la dessiccation	
2. La survie des semences	234
2.1 Durée de vie des semences - 2.2 Origine de la mort des semences - 2.3 Prolongation de la viabilité - 2.4 Tests de viabilité et de vigueur	
3. Les dormances	241
3.1 Divers types de dormances - 3.2 Principales carac- téristiques des dormances - 3.3 Elimination des dormances	
4. Conclusion	249
9 Caractères généraux de la microflore des grains et graines et principales altérations qui en résultent	254

1. Les microorganismes	255
1.1 La flore bactérienne - 1.2 Les moisissures - 1.3 Les levures	
2. Eléments de biochimie et de physiologie microbienne	264
2.1 Oxydations biologiques. Types respiratoires - 2.2 Dégradation des glucides - 2.3 Dégradation des lipides	
2.4 Dégradation des protéines - 2.5 Réactions anaboliques. Biosynthèses microbiennes	
10 Ecologie de la microflore des grains et graines . . .	273
1. Cortèges floristiques	273
1.1 Méthodes d'inventaire - 1.2 Aspect statique de la flore : cortèges floristiques	
2. Séries dynamiques	279
2.1 Mise en évidence d'une succession floristique normale - 2.2 Déterminisme écologique - 2.3 Applications pratiques	
11 Effets des procédés de "stabilisation" des grains . .	291
1. Influence de la qualité initiale des grains sur le développement de leur microflore	291
1.1 Impuretés - Endommagement mécanique - 1.2 Attaque fongique précoce - 1.3 Degré de maturité des graines - 1.4 Contamination du matériel et des aires de stockage	
2. Contrôle du développement des microorganismes par la maîtrise des conditions de l'environnement . . .	294
2.1 Techniques traditionnelles - Stockages en aérobiose	
2.2 Stockage en atmosphère modifiée	
3. Traitements physiques et chimiques	299
3.1 Traitements physiques - l'irradiation - 3.2 Traitements chimiques	
12 Classement et caractéristiques chimiques des toxines fongiques susceptibles d'être produites dans les grains et graines	319
1. Les aflatoxines	319
1.1 Découverte et souches productrices - 1.2 Structure	
1.3 Propriétés physico-chimiques - 1.4 Métabolisme - 1.5 Toxicité - 1.6 Contaminations rencontrées	
2. Les époxylrithothécènes	322
2.1 Structures chimiques - 2.2 Propriétés physico-chimiques - 2.3 Propriétés toxiques - 2.4 Pouvoir immuno-suppresseur - 2.5 "Facteur de refus" et vomitoxine - 2.6 Mécanismes d'action des trichothécènes - 2.7 Contaminations rencontrées	
3. La zéaralénone	327
3.1 Structure - 3.2 Propriétés biologiques - 3.3 Contaminations rencontrées	
4. Les ochratoxines	329
4.1 Souches productrices et structure - 4.2 Propriétés physico-chimiques - 4.3 Propriétés toxiques - 4.4 Contaminations rencontrées	

5. La citrinine	332
6. La patuline	332
6.1 Structure et souches productrices - 6.2 Propriétés toxiques - 5.3 Effets sur l'homme - 5.4 Contaminations	
7. La stérigmatocystine	334
7.1 Propriétés physicochimiques - 7.2 Structure - 7.3 Métabolisme - 7.4 Toxicité - 7.5 Contaminations rencontrées	
13 Microbiologie des semences en relation avec le conditionnement : son incidence sur la qualité germinative	340
Introduction	340
Qualité biologique des semences - Spermo flore dégradante	
1. Comportement écologique de la mycoflore séminicole	341
1.1 Complexe écologique : semence + mycoflore - 1.2 Dynamique de la spermo flore	
2. Altération des semences stockées	345
2.1 Mise en évidence - 2.2 Modalités	
3. Application à la lutte intégrée	348
3.1 Contrôle sanitaire des semences - 3.2 Maîtrise écologique du conditionnement - Amélioration génétique	
3.4 Traitements des semences	
14 Microbiologie des grains humides (y compris cribs et ensilage)	358
1. Séchage différé des grains immatures	358
1.1 Le traitement des grains par des stabilisants chimiques - 1.2 Le stockage confiné	
2. Séchage lent des grains	360
2.1 Conservation en ambiance, sans ventilation active	
2.2 Séchage par ventilation	
3. Conservation des grains humides	367
3.1 Conservation des grains tels quels - 3.2 Ensilage des grains broyés	
15 Toxinogénèse en fonction des conditions écologiques du système grain/microorganismes	376
1. Origine des principes toxiques résultant du développement de moisissures	376
1.1 Principaux mécanismes d'élaboration de métabolites zootoxiques - 1.2 Origine biogénétique des mycotoxines	
2. La mycotoxinogénèse : données générales	378
2.1 Facteurs intrinsèques - 2.2 Facteurs extrinsèques	
3. Présence à l'état naturel de mycotoxines dans les grains et les graines	385
3.1 Aflatoxines - 3.2 Zéaralénone - 3.3 Ochratoxine A - 3.4 Autres mycotoxines	
16 Les insectes et les acariens	394
1. Introduction	394
1.1 Généralités - 1.2 Niveau des pertes occasionnées par les insectes - 1.3 Origine des contaminations	

2. Caractères généraux des insectes des grains et graines	396
2.1 Généralités - 2.2 Morphologie et organisation interne schématiques - 2.3 Caractéristiques générales et cycles de développement des ordres principaux - 2.4 Aspect des attaques et identification sommaire	
3. Description et biologie des espèces nuisibles . . .	405
3.1 Les Coléoptères des grains - 3.2 Les Lépidoptères des grains	
17 Les vertébrés dépradateurs des grains et semences stockés	437
1. Introduction générale	437
2. Les rongeurs déprédateurs des stocks	439
2.1 Avant-propos - 2.2 Nature des dégâts et importance économique - 2.3 Les espèces - 2.4 Les techniques de lutte - 2.5 Réalisation pratique des interventions	
3. Conclusion générale	454

PARTIE IV - MÉTHODES ANALYTIQUES POUR LE CONTRÔLE IN- TRINSÈQUE DES GRAINS ET GRAINES DANS LE SYSTÈME POST-RÉCOLTE	457
18 Le contrôle et l'agréage des grains et graines au silo	459
1. Examen général - caractéristiques organoleptiques .	459
1.1 Applications - 1.2 Méthode	
2. Masse à l'hectolitre	460
2.1 Définitions - 2.2 Application - Méthodes - 2.4 Signification des résultats - 2.5 La masse à l'hecto- litre et la conservation	
3. Recherche des impuretés	463
3.1 Définitions - 3.2 Application - 3.3 Méthodes - 3.4 Impuretés et conservation	
4. Autres analyses intéressant la conservation	468
4.1 Temps de chute d'Hagberg - 4.2 Acidité - 4.3 Essai de germination	
5. Conclusion	468
19 L'échantillonnage des grains et graines - méthodes et moyens	470
1. Objectifs théoriques	470
1.1 Quelques définitions - 1.2 Qu'est-ce qu'un bon échantillon ? - 1.3 Comment obtenir un bon échantillon ?	
2. Réalisation pratique	473
2.1 Pour prélever - 2.2 Pour diviser	
3. Opter pour les systèmes mécaniques	478

20	Méthodes de référence pour le dosage de l'eau dans les grains et graines	480
1.	Normalisation des méthodes de référence pour le dosage de l'eau	481
2.	Principes des méthodes de référence dans le cas des graines	485
2.1	<i>Le problème du broyage et du presechage - 2.2 Les méthodes de référence normalisées (AFNOR-ISO-ICC) - 2.3 Méthodes approximatives</i>	
3.	Répétabilité des méthodes de dosage de l'eau : calculs théoriques et évaluation expérimentale . .	489
4.	Reproductibilité	490
21	Le dosage rapide de l'eau à la réception en organisme stockeur	492
1.	Les différents types d'appareils rapides (humidimètres)	493
1.1	<i>Les méthodes de séchage à température élevée - 1.2 Appareils dont le principe est basé sur la mesure d'une grandeur physique</i>	
2.	Réglementation et appareils homologués	495
2.1	<i>Principes généraux de la réglementation</i>	
3.	Limites des méthodes rapides actuelles - perspectives d'avenir	499
3.1	<i>Limites des humidimètres capacitifs dans le cas de céréales humides - 3.2 Le "Thermidimètre"</i>	
22	Analyses microbiologiques qualitatives et quantitatives (bactéries, levures, moisissures)	503
1.	L'échantillonnage	504
2.	Méthodes de dénombrement	505
2.1	<i>Méthodes d'"observation directe" de la flore fongique - 2.2 Dénombrement après mise en suspension des microorganismes (moisissures, levures et bactéries) des graines</i>	
3.	Méthodes d'évaluation de la biomasse fongique des grains	513
3.1	<i>Dosage d'un composant spécifique des fungi - 3.2 Mise en évidence de la biomasse par immunofluorescence</i>	
3.3	<i>Par spectrofluorimétrie</i>	
4.	Mesure d'une activité métabolique ou biologique spécifiquement microbienne ou d'un produit en résultant	516
4.1	<i>Production de composés volatils - 4.2 Libération d'acides gras</i>	
23	Mesure de l'infestation par les insectes	520
1.	Introduction	520
2.	Le prélèvement des échantillons pour l'analyse entomologique	520
2.1	<i>Rappel sommaire des définitions - 2.2 Principes de l'échantillonnage - 2.3 L'enquête sanitaire</i>	

2.4	Dépistage et mesure de l'infestation d'insectes dans une masse de grains, méthode de conduite de l'échantillonnage	
3.	Méthodes de recherche de la présence d'insectes dans un échantillon élémentaire	527
3.1	Recherche des formes libres : infestation initiale visible - 3.2 Recherche des formes cachées	
24	Recherche des résidus des produits phyto-sanitaires .	542
1.	Les sources de contamination	542
1.1	Traitements en culture - 1.2 Traitements de conservation - 1.3 Traitements d'éradication : les fumigants	
2.	Les méthodes de dosage	544
3.	Echantillonnage et conservation des échantillons .	544
3.1	Extraction - 3.2 Purification - 3.3 Dosage proprement dit	
4.	Méthode de multidétection applicable aux pesticides organochlorés et organophosphorés	547
4.1	Principe - 4.2 Matériel - 4.3 Solvants et réactifs	
4.4	Mode opératoire	
5.	Méthode de multidétection applicable aux fumigants organohalogénés	551
6.	Dosage du phosphore d'hydrogène	551
7.	Dosage des bromures inorganiques	551
8.	Conclusion	552
25	Recherches et dosage des toxines dans les grains et graines	554
1.	Les aflatoxines	555
1.1	Préparation des étalons - 1.2 Méthode rapide par minicolonne - 1.3 Technique utilisable pour les aliments simples (Méthode CEE) - 1.4 Utilisation de la chromatographie liquide haute performance - 1.5 Méthode rapide de détection de l'aflatoxine dans le maïs	
2.	Dosage de la Zéaralénone	563
2.1	Technique d'EPPLEY - 2.2 Technique de MIROCHA C., SCHAUERHAMER B. et PATHRE S. - 2.3 Utilisation de la chromatographie liquide de haute pression	
3.	Dosage des époxy-trichothécènes	566
3.1	Test biologique basé sur les propriétés dermonécrosantes - 3.2 Technique de ROMER, BOLING et Mc DONALD	
4.	Désoxynivalenol ou vomitosine (Technique de C.J. MIROCHA)	570
4.1	Extraction - 4.2 Purification de l'extrait - 4.3 Chromatographie sur couche mince de gel de silice - 4.4 Chromatographie en phase gazeuse	
5.	Dosage de la patuline	571
5.1	Technique de SCOTT P.M., KENNEDY B.P.C., - 5.2 Chromatographie sur couche mince - 5.3 Utilisation	