



agricultures
tropicales en poche

La conservation des grains après récolte

Jean-François Cruz, D. Joseph Hounhouigan
et Francis Fleurat-Lessard
avec la collaboration de Francis Troude



Quæ
CTA
Presses
agronomiques
de Gembloux

Agricultures tropicales en poche
Directeur de la collection
Philippe Lhoste

La conservation des grains après récolte

Jean-François Cruz, D. Joseph Hounhouigan,
Francis Fleurat-Lessard

Avec la collaboration de Francis Troude

Éditions Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux

À propos du CTA

Le centre technique de coopération agricole et rurale (CTA) est une institution internationale conjointe aux États du groupe ACP (Afrique, Caraïbes, Pacifique) et de l'Union européenne (UE). Il intervient dans les pays ACP pour améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle, accroître la prospérité dans les zones rurales et garantir une bonne gestion des ressources naturelles. Il facilite l'accès à l'information et aux connaissances, favorise l'élaboration des politiques agricoles dans la concertation et renforce les capacités des institutions et communautés concernées.

Le CTA opère dans le cadre de l'Accord de Cotonou et est financé par l'UE.



CTA, PO Box 380, 6700 AJ Wageningen, Pays-Bas
www.cta.int

Éditions Quæ, RD 10, 78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

Presses agronomiques de Gembloux, Passage des Déportés, 2,
B-5030 Gembloux, Belgique
www.pressesagro.be

© Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux 2016

ISBN (Quæ) : 978-2-7592- 2437-1

ISBN (CTA) : 978-92-9081-608-9

ISBN (PAG) : 978-2-87016-144-9

ISSN : 1778-6568

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation des éditeurs ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris.



Table des matières

Avant-propos	5
Remerciements	7
Introduction	9
1. Les caractéristiques des grains et les facteurs d'altération ...	11
Variabilité physique des grains	11
Structure physique des grains	12
Composition biochimique des grains	16
Propriétés physiques des grains	18
Activité biologique des grains	20
Facteurs physiques d'altération des grains	21
Agents biologiques d'altération des grains	29
Écosystème des grains stockés	31
2. Les pertes après récolte : principes de conservation	33
Définitions et historique	33
Pertes après récolte dans les grains	35
Principes de la conservation	43
3. La stabilisation des grains et les modes de séchage	45
Stabilisation des grains, rôle du séchage	45
Caractéristiques de l'air, diagramme de l'air humide	46
Principe du séchage	50
4. La conservation des grains au niveau paysan	77
Stockage villageois	77
Greniers traditionnels	78
Amélioration du stockage villageois	90
5. Le stockage en sacs	105
Pérennité du stockage en sacs	105
Conception des magasins de stockage en sacs	105
Équipements des magasins de stockage en sacs	116
Mise en place et gestion technique des stocks de grains	123



6. Le stockage en vrac	129
Importance du stockage en vrac	129
Silos de stockage	130
Principaux types de silos	133
Équipements des silos de stockage	140
7. Les insectes des stocks et les méthodes de lutte	155
Caractères généraux des insectes des grains et graines	155
Connaissance des groupes d'insectes et autres arthropodes vivant dans les denrées alimentaires	161
Approche préventive de la lutte contre les insectes granivores	182
Méthodes de lutte directe en cas d'infestation visible	184
Protection raisonnée et durable contre les insectes en post-récolte	196
8. La lutte contre les rongeurs	199
Principaux rongeurs déprédateurs des stocks	199
Dégâts causés par les rongeurs	202
Lutte contre les rongeurs	204
Conclusion	213
Sigles et acronymes	215
Bibliographie consultée	217
Sites Internet	223
Glossaire	225
Index	229



Avant-propos

La collection «Agricultures tropicales en poche» est gérée par un consortium comprenant le CTA de Wageningen (Pays-Bas), les Presses agronomiques de Gembloux (Belgique) et les Éditions Quæ (France). Cette collection comprend trois séries d'ouvrages pratiques consacrés aux productions animales, aux productions végétales et aux questions transversales.

Ces guides pratiques sont destinés avant tout aux producteurs, aux techniciens et aux conseillers agricoles. Ils se révèlent être également d'utiles sources de références pour les chercheurs, les cadres des services techniques, les étudiants de l'enseignement supérieur et les agents des programmes de développement rural.

Le présent ouvrage est consacré à la conservation des grains. Il s'agit d'une problématique essentielle dans la lutte contre les pénuries alimentaires et donc contre la faim. En effet, la totalité de la production agricole destinée à l'alimentation ne parvient pas à ses destinataires en raison de pertes au cours de la phase dite de «post-récolte» (entre la récolte de la culture et la transformation des produits pour l'alimentation). Ces pertes peuvent atteindre 30% de la production brute en raison de mauvaises conditions de conservation, au cours du stockage ou de déprédations diverses par des champignons, insectes, rongeurs.

Dans le contexte d'augmentation de la demande alimentaire de ce début de *xxi*^e siècle, notamment en Afrique, il est donc essentiel, non seulement d'améliorer la production agricole vivrière mais aussi de lutter contre les pertes post-récolte. Cet ouvrage vise à y contribuer en effectuant une synthèse opérationnelle des connaissances anciennes et récentes dans ce domaine; il vient en complément d'un précédent ouvrage de la même collection, «Les semences» (Turner, 2013), et il devrait être suivi par un ouvrage complémentaire sur la transformation des grains.

Cet ouvrage collectif a été rédigé par Jean-François Cruz, chercheur au Cirad et spécialiste des technologies post-récolte des céréales, D. Joseph Hounhouigan, professeur de sciences et technologies alimentaires, doyen de la Faculté des Sciences agronomiques à l'Université Abomey-Calavi du Bénin, Francis Fleurat-Lessard, chargé de recherche à l'Inra Bordeaux-Aquitaine sur la sécurité sanitaire des céréales après récolte. Les auteurs ont bénéficié de la collaboration de Francis Troude, agro-machiniste spécialiste des technologies post-récolte au Cirad.



Cet ouvrage simple, clair et abondamment illustré est, de la volonté même des auteurs, plus technique que scientifique. Il aborde de façon pratique les différents aspects de la conservation des grains : séchage, stockage, lutte contre les insectes et les rongeurs. Il doit servir de référence pratique aux opérateurs des filières grains, mais également aux ingénieurs, chercheurs, techniciens, formateurs, étudiants et agents de développement des structures publiques ou privées qui œuvrent sur le terrain pour améliorer la conservation des grains en zones tropicales et ainsi réduire les pertes post-récolte. Il s'agit là d'un enjeu majeur de la lutte contre la faim.

Philippe Lhoste
Directeur de la collection Agricultures tropicales en poche



Remerciements

Les auteurs remercient Francis Troude, agro-machiniste et spécialiste des technologies post-récolte des grains au Cirad, aujourd'hui en retraite, pour sa collaboration à l'ouvrage. Ils remercient vivement les personnes qui ont contribué à la publication de cet ouvrage et notamment les différents relecteurs scientifiques : Philippe Lhoste, directeur de la collection Agricultures tropicales en poche, Michel Havard, chercheur Cirad agro-machiniste, Jean-Michel Méot, chercheur spécialiste du séchage des produits agricoles et alimentaires au Cirad, Jean-Marc Duplantier, chercheur spécialiste des rongeurs à l'IRD. Nos remerciements vont également à Claire Parmentier des Presses agronomiques de Gembloux et à Claire Jourdan-Ruf des Éditions Quæ pour le travail accompli dans la mise en forme finale de cet ouvrage.



Introduction

Les céréales et les légumineuses constituent la base de l'alimentation pour une grande partie de l'humanité et la part de ces productions vivrières est prépondérante dans le régime alimentaire des populations les plus pauvres. En 2013, la production annuelle des céréales majeures, maïs, riz, blé, orge et sorgho a été de plus de 2680 millions de tonnes de grains, ce qui représente près de 50 % de la production agricole végétale totale au niveau mondial.

Pour faire face à l'augmentation des besoins alimentaires en raison de la croissance de leur population, de nombreux pays visent à assurer la sécurité alimentaire par l'accroissement de la production agricole et l'amélioration de la qualité des produits. La recherche agronomique permet d'obtenir de meilleurs rendements grâce notamment à la création de variétés améliorées et au développement des techniques de production toujours plus performantes.

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique global, cette augmentation de la productivité des cultures pour un objectif d'auto-suffisance alimentaire se révèle difficile à atteindre dans de nombreux pays du Sud. Par contre, les initiatives de réduction des pertes de produits agricoles, en particulier après la récolte et lors de la transformation, paraissent à la portée de tous. L'essentiel des pertes est dû principalement au séchage insuffisant qui favorise le développement des moisissures et/ou au stockage défectueux qui facilite l'attaque des déprédateurs comme les insectes ou les rongeurs. Mais des pertes peuvent aussi se produire au cours des autres séquences du système post-récolte : récolte, stockage au champ, transport, battage, nettoyage, manutention, transformation.

On ne dispose pas toujours d'estimations précises des taux de pertes selon les régions, les filières ou les systèmes de stockage, mais des pertes moyennes de 10 à 15 % sont assez souvent annoncées dans un grand nombre de pays. Des niveaux supérieurs à 30 % sont parfois atteints dans des pays du Sud où les conditions climatiques sont défavorables à la conservation des denrées alimentaires et où les systèmes de stockage, notamment en milieu rural, sont rudimentaires. La FAO estime que les quantités de pertes et gaspillages alimentaires annuels au niveau mondial atteignent 30 % dans les filières céréalières.

Aujourd'hui, comme par le passé, la réduction des pertes après récolte doit être une composante essentielle de toute stratégie qui vise à



améliorer la disponibilité alimentaire sans accroître la pression sur le milieu naturel. Les pertes peuvent être diminuées par la bonne préparation des produits avant le stockage, par l'apport d'innovations techniques notamment en matière de séchage et de stockage et par la bonne conservation des denrées tout au long du stockage.



1. Les caractéristiques des grains et les facteurs d'altération

Le terme grain fait souvent référence à la semence des céréales, véritable fruit sec et indéhiscent appelé caryopse. Mais on utilise également le mot « grain » pour parler du fruit ou de la graine d'autres plantes comme les légumineuses (haricot, niébé), les plantes oléagineuses (tournesol, colza) ou encore les plantes stimulantes (caféier).

Variabilité physique des grains

Les grains ont une très grande diversité de forme, de taille ou de couleur. De forme sphérique, ovale, oblongue, ou parfois même polygonale, les grains ont, selon les espèces, des dimensions qui varient de moins de 1 mm (fonio) à plus de 25 mm (fève de cacao). Le poids de 1 000 grains peut ainsi varier de 0,5 g (fonio) à près de 1 500 g (fèves de cacao) (photo 1.1).

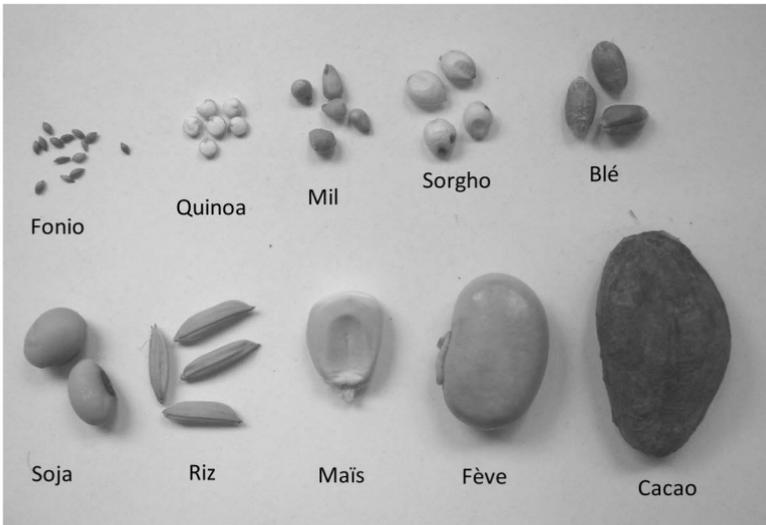


Photo 1.1.

Comparaison de la taille de différents grains (© Jean-François Cruz, Cirad).

Structure physique des grains

Les grains sont en fait de véritables plantes miniatures, protégées par des enveloppes et disposant de réserves pour se nourrir et se développer. Au XVIII^e siècle, l'Encyclopédie décrivait la graine comme « un bourgeon de plante abrégée, accompagné d'une pulpe qui lui tient lieu de placenta ».

Les grains sont constitués de trois parties : les enveloppes, l'albumen (figure 1.1) et le germe.

▮ Les enveloppes

Les grains de céréales sont protégés par une ou plusieurs enveloppes. Les couches cellulaires les plus externes constituent le péricarpe, dérivé de la paroi de l'ovaire, qui correspond aux téguments du fruit. Sur sa face interne, le péricarpe est souvent soudé à une couche cellulaire appelée testa qui correspond au tégument de la graine (Turner, 2013). Pour certaines espèces, cette testa est fortement pigmentée et contient des tannins. Les enveloppes protègent le grain et ralentissent les échanges avec l'extérieur, mais elles peuvent être traversées par les microorganismes et par les gaz. Une partie du grain, le funicule, n'est pas protégé et permet la pénétration de vapeur d'eau et de certaines moisissures. Lors de la transformation des grains, les enveloppes, qui représentent environ 8% du grain, donnent le son, substance riche en fibres, en minéraux, en vitamines et en protéines.

Par opposition aux graines de céréales dites « nues » comme le maïs (figure 1.2b), le sorgho, le mil..., les graines de certaines céréales, telles que le riz ou le fonio, sont dites « vêtues » car elles possèdent encore certaines enveloppes externes provenant de la fleur. Ces enveloppes, appelées balles, sont constituées des glumelles et des glumes qui ne sont pas intimement liées au grain comme peut l'être le péricarpe, mais elles améliorent considérablement sa protection comme dans le cas du riz paddy (figure 1.2a). Après élimination des balles, le riz décortiqué est appelé « riz cargo » car c'est sous cette forme qu'il est transporté dans les navires.

Les grains de légumineuses comme le haricot, le niébé, le soja, l'arachide, ne sont pas des fruits mais de véritables graines (figure 1.3).

Les différentes enveloppes protègent les grains de l'humidité, de certaines moisissures et de certains insectes, mais cette protection n'est



bien assurée que si ces enveloppes n'ont pas été altérées ou déchirées lors de la moisson ou du battage. Comme les grains endommagés risquent de contaminer les grains sains, il est important de les éliminer avant le stockage.

▮ L'albumen

L'albumen est l'élément principal des grains (75 à 90 % pour les céréales). Il représente l'organe de réserve essentiellement constitué de granules d'amidons enchâssés dans un réseau protéique plus ou moins dense. La première assise constitutive de l'albumen est l'assise protéique ou couche à aleurone, qui est une couche unicellulaire riche en protéines, en lipides et en minéraux. Pour de nombreuses céréales comme le maïs, le sorgho, le blé, etc., on distingue souvent l'albumen périphérique et les albumens vitreux et farineux. L'albumen périphérique comprend plusieurs couches de cellules compactes contenant beaucoup de protéines et des petits granules d'amidon. L'albumen vitreux est constitué de granules d'amidon polyédriques noyés dans une matrice protéique pour former une structure dense et compacte. L'albumen farineux, plus au cœur du grain, est plus ou moins important selon les espèces. L'albumen du riz est essentiellement vitreux alors que celui du blé tendre est farineux. Dans l'albumen farineux, les granules d'amidon sphériques sont beaucoup plus libres et parfois reliés par un mince réseau protéique discontinu (figure 1.1). La présence de vides d'air dans cet albumen farineux, à la structure beaucoup plus lâche, le rend opaque à la lumière tandis que l'albumen vitreux est translucide. Ces vides rendent les albumens farineux plus fragiles aux chocs lors de la manutention des grains.

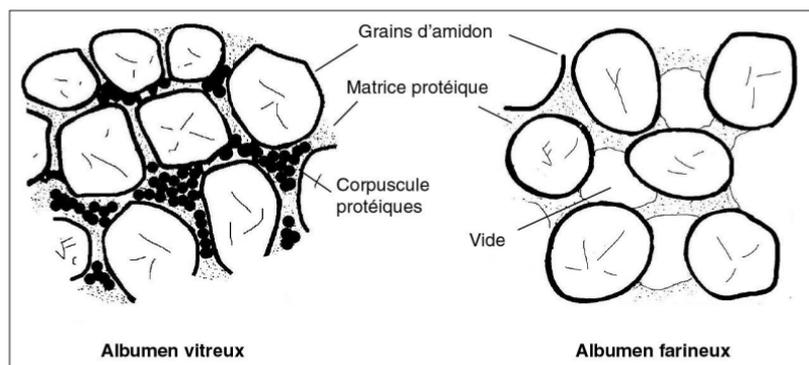


Figure 1.1.
Schéma de cellules de l'albumen.

Chez beaucoup de légumineuses (haricot, pois, etc.), l'albumen est digéré par les cotylédons qui deviennent alors l'organe de réserve. On a ainsi des grains sans albumen.

Lors du stockage, les déprédateurs que sont les insectes cherchent à consommer les réserves des grains contenues dans l'albumen, les cotylédons ou le germe. L'humidité et la chaleur dégagées par leur activité biologique favorisent les attaques par d'autres insectes ou engendrent des conditions favorables au développement des moisissures.

▮ Le germe

Le germe des céréales est formé de la plantule et d'un cotylédon ou scutellum. La plantule est une véritable plante miniature alors que le scutellum est un organe, riche en protéines, en lipides, en protéines, en minéraux et en vitamines qui joue le rôle de « placenta » pour permettre à la jeune plantule de se nourrir des réserves de l'albumen. Une fois éliminé, le germe constitue une autre partie du son. L'importance relative du germe par rapport au grain varie suivant les céréales. Le germe du riz ou du blé est très petit alors que celui du maïs, du sorgho ou du mil est très gros (tableau 1.1).

La proportion relative des différentes parties du grain pour plusieurs grandes céréales est donnée dans le tableau 1.1 (Miche, 1980).

Tableau 1.1. Comparaison des parties structurantes de plusieurs céréales (% du grain entier).

Céréale	Enveloppes	Albumen	Germe
Riz cargo	6	90	4
Maïs	6	83	11
Sorgho	8	82	10
Mil	8	75	17
Blé	15	82	3

Certains insectes déprédateurs s'attaquent aux germes des grains et les conséquences de la dégradation de la plantule en cours de stockage sont particulièrement graves dans le cas où les grains sont stockés en tant que semences. Une dégradation des semences réduit considérablement le taux de germination après semis et le rendement des récoltes. Par conséquent, les semences sont souvent stockées séparément des grains « tout venant » afin de leur assurer une meilleure protection.

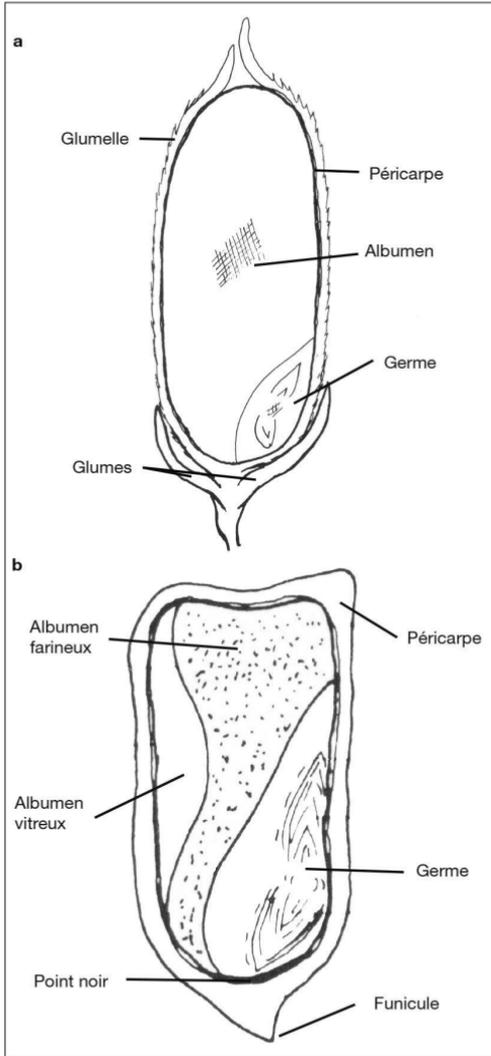


Figure 1.2.
Schéma des grains
de céréales :
a, riz paddy; b, maïs.

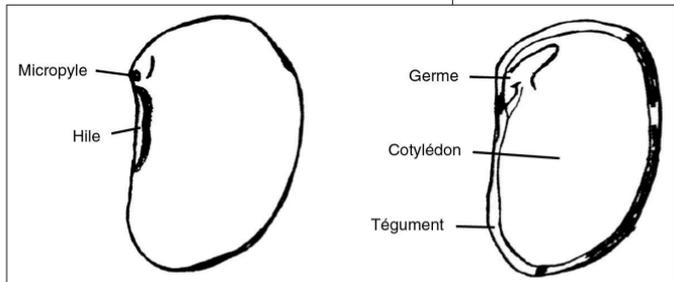


Figure 1.3.
Schéma d'une graine
de légumineuse.

Composition biochimique des grains

Les grains sont constitués de matière sèche et d'eau.

▮ La matière sèche

Les glucides

Les glucides sont présents principalement dans l'albumen des céréales sous la forme de granules d'amidon, de fibres (cellulose), non digestibles sauf par les herbivores, et de sucres simples (saccharose, glucose). L'amidon est un mélange de deux polymères du glucose : l'amylose, formée d'une chaîne continue mais enroulée de molécules de glucose et l'amylopectine, composée de nombreuses chaînes ramifiées de glucose. L'amidon des céréales est composé de 18 à 28 % d'amylose. Ces glucides jouent un rôle essentiel dans l'alimentation humaine comme aliment énergétique.

Les lipides

Les lipides sont aussi qualifiés de matières grasses. Dans les céréales, les lipides sont principalement concentrés dans le germe mais ils ne représentent que 3 à 4 % de la matière sèche. Pour les oléagineux comme l'arachide ou les oléoprotéagineux comme le soja, les lipides sont présents, surtout dans l'albumen, en quantité plus importante: 50 % pour l'arachide, 20 % pour le soja.

Les protides

Ce sont des composés azotés simples (acides aminés) ou formés de l'association complexe des acides aminés (protéines). Les céréales sont relativement pauvres en protéines (environ 10 %) alors que les légumineuses sont plus riches (plus de 20 %). Dans de nombreux pays du Sud, le régime alimentaire des populations est basé sur la consommation d'une céréale et d'une légumineuse comme c'est le cas en Amérique latine avec l'association maïs et haricot. La carence en lysine et en tryptophane de la céréale est compensée par la légumineuse qui est riche en ces acides aminés. Enfin, les enzymes sont des protéines qui, à faible dose, permettent d'accélérer les réactions biologiques, et notamment de dégradation de la matière vivante (hydrolyse de l'amidon et des protéines).

Les vitamines et les pigments

Les vitamines sont des composés chimiques complexes, essentiels à l'homme et aux animaux, Elles sont surtout concentrées dans le



péricarpe et le germe à des teneurs très faibles et sont plus vulnérables que les autres constituants du grain en cas de mauvais stockage. Les pigments sont spécifiques à chaque espèce et sont parfois précurseurs de vitamines (pigments caroténoïdes).

Les matières minérales

Les matières minérales sont contenues dans les grains en faibles quantités (1 à 4%). Le résidu minéral, obtenu après incinération de la matière organique, est constitué de macroéléments (phosphore, potassium, magnésium, soufre) et d'oligo-éléments (sodium, fer, zinc, manganèse, cuivre). Ces éléments minéraux sont, pour la plupart, concentrés dans les couches périphériques du grain, et sont donc, en grande partie, éliminés lors du décortiquage.

La composition biochimique succincte de diverses céréales (grains nus) est donnée dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2. Composition biochimique de diverses céréales (source Fliedel *et al.*, 2004).

Céréale	Glucides (% MS)	Lipides (% MS)	Protides (% MS)	Matières minérales (% MS)
Riz cargo	86	2,5	10	1,4
Fonio décortiqué	85	3,5	10	1,1
Sorgho	84	3,5	11	1,2
Mil	83	4,0	12	1,2
Maïs	83	4,5	11	1,3

|| L'eau

L'eau, élément indispensable à la vie, est toujours présente dans les grains à une teneur plus ou moins élevée, selon l'origine des grains et le séchage auquel ils ont été soumis. Schématiquement, on considère que l'eau est associée aux grains sous deux principales formes (figure 1.4) :

- l'eau fortement liée aux molécules ;
- l'eau adsorbée.

L'eau adsorbée joue un rôle biologique important en favorisant les réactions du métabolisme et les attaques des microorganismes (moisissures). Parfois, certains distinguent aussi une eau d'imprégnation (autrefois qualifiée d'« eau libre ») mais qui est rarement présente dans les grains sauf aux fortes humidités (> 27 %).

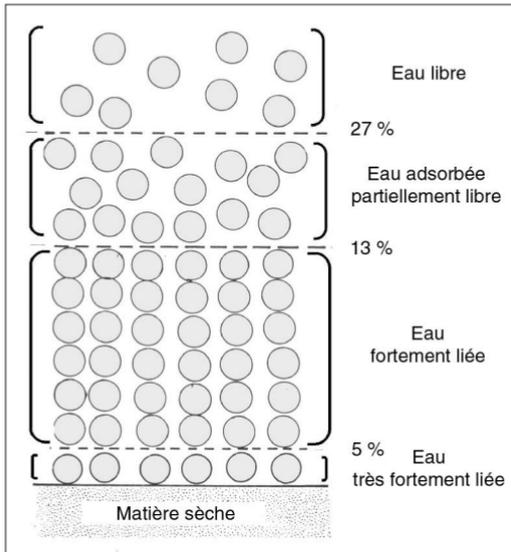


Figure 1.4.
Représentation schématique de fixation de l'eau dans le grain (d'après Arvalis-Institut du végétal).
en % d'humidité du produit

Le rôle de l'eau et les problèmes qu'elle engendre pour le stockage des grains sont présentés plus loin.

Propriétés physiques des grains

Il est important de connaître les propriétés physiques des grains pour mieux appréhender leur conservation.

▮ La porosité

Les grains en masse constituent un matériau poreux dont 30 à 50 % du volume en place sont occupés par l'air interstitiel. Plus les grains sont petits (quinoa, fonio, éleusine, teff) et moins les espaces libres entre les grains sont importants. Pour les gros grains (maïs, pois du cap, fèves) les espaces libres sont importants et facilitent la ventilation. Les grains en masse se comportent comme un fluide et offrent des possibilités de manutention mécanique et pneumatique.

▮ La masse volumique apparente (ou poids spécifique)

La masse volumique apparente, autrefois appelée « poids spécifique », permet de connaître la masse des grains par rapport au volume qu'ils



occupent. Sur de nombreux marchés et pour des petites quantités de grains, certaines transactions commerciales s'effectuent encore au volume (*tine* et *yoruba* au Burkina Faso, *tohoungolo* au Bénin). La connaissance de cette grandeur permet également de définir les dimensions des structures (récipients, greniers...) qui seront nécessaires pour transporter et stocker telle ou telle quantité de grains. La masse volumique apparente de différents produits est donnée au tableau 1.3.

Tableau 1.3. Masse volumique apparente de différents produits stockés en vrac.

Produit	Forme	Poids spécifique (kg/m ³)
Riz	Panicules	100
	Grains paddy	550 – 650
	Grains cargo	700 – 750
Maïs	Épis nus	450
	Grains	700 -750
Sorgho	Grains	650 – 750
Mil	Grains	800
Fonio	Grains paddy	650
Blé	Grains	750 – 800
Haricot sec	Gousses	400
	Grains	700 – 800
Soja	Grains	680 – 780
Arachide	Coques	200 – 350
	Graines	550 – 650
Café	Cerises fraîches	650
	Coques	440
	Grains verts	700 – 750
Cacao	Fèves fraîches	900
	Fèves fermentées	700
	Fèves sèches	650

▮ La faible conductibilité thermique

Les grains en masse ont une faible conductibilité thermique et ils se comportent ainsi comme un matériau isolant. Cette caractéristique peut être à l'origine de pertes importantes dues à des échauffements

localisés. Si une partie des grains stockés est l'objet d'attaques d'insectes, leur activité biologique va produire de la chaleur qui ne va pas se dissiper facilement du fait de la faible conductibilité thermique des grains. Les fortes températures qui peuvent alors être atteintes altèrent la valeur nutritive des stocks et peuvent aller jusqu'au brunissement des grains (réactions de Maillard) et à la perte du pouvoir germinatif dans le cas de semences.

Cette caractéristique peut parfois présenter un avantage. C'est le cas pour les stocks de grains conservés en cellules métalliques. Les fortes fluctuations de température extérieure ne se répercutent que très peu à l'intérieur des masses stockées et si l'on réussit à refroidir les grains, grâce par exemple à une ventilation aux heures fraîches, ils ne se réchaufferont que lentement (Troude et Cruz, 1987).

▮ L'hygroscopicité

Les grains constituent un matériau hygroscopique susceptible d'échanger de l'eau, sous forme vapeur, avec l'air ambiant. Un grain humide placé dans un air sec va céder de l'eau au milieu ambiant alors qu'un grain sec peut s'humidifier au contact d'un air humide (figure 1.5). Ces différents échanges sont fonction du degré d'humidité de l'air et de sa température et se poursuivent jusqu'à ce qu'un état d'équilibre (appelé équilibre hygroscopique) s'établisse entre l'air et le grain.

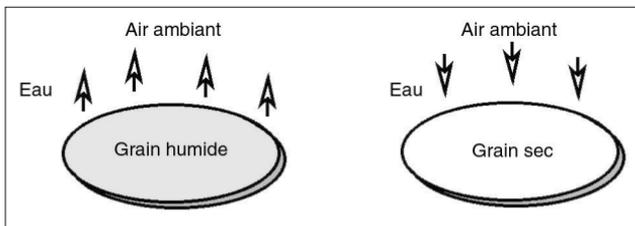


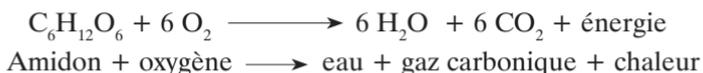
Figure 1.5.
Échanges d'eau entre le grain et l'air ambiant.

Activité biologique des grains

Les grains sont des organismes vivants qui, même en vie ralentie, sont le siège de réactions du métabolisme. Par ailleurs, les grains sont toujours associés à des microorganismes (spores de moisissures) présents sur leur surface et l'on parle alors du complexe grains-microorganismes.



Si les grains sont placés dans des conditions ambiantes particulièrement chaudes et humides comme celles des régions tropicales, ils vont accroître leur activité biologique en consommant l'énergie emmagasinée dans leurs réserves sous forme d'amidon. La respiration qui a lieu en présence d'oxygène (aérobiose) est une manifestation de l'activité vitale des grains. Elle peut être assimilée à la dégradation d'un glucide simple et schématisée comme suit :



Durant le stockage, l'activité biologique des grains entraîne donc une perte de matière sèche, ici l'amidon, tout en produisant de la vapeur d'eau, du gaz carbonique et de la chaleur. L'humidité et la chaleur ainsi produites peuvent alors accélérer le processus de respiration et de dégradation. Ce phénomène apparaît couramment dans les lots de grains stockés trop humides où l'on observe de forts échauffements pouvant un temps favoriser la germination et le développement de moisissures pour aboutir finalement à la prise en masse des grains.

La vitesse de dégradation du produit peut être appréciée de façon précise en laboratoire en mesurant la quantité de CO_2 dégagée par 100 g de matière sèche de grain en 24 h. La perte de 0,5 % de matière sèche due aux phénomènes de respiration est un critère de détérioration des céréales qui permet d'évaluer le temps maximal de leur conservation sans risque (Steele *et al.*, 1969).

En l'absence d'oxygène (anaérobiose), il peut y avoir un processus de fermentation, le plus souvent alcoolique, caractérisé par la production de gaz carbonique, d'alcool et un léger dégagement de chaleur.

Facteurs physiques d'altération des grains

▮ La température

La température est le premier facteur physique qui vient à l'esprit lorsque l'on veut caractériser le milieu ambiant qui règne dans les pays du Sud. Les températures élevées de 20°C à 40°C qui y règnent couramment accélèrent les activités biologiques des organismes vivants. Ce facteur joue ainsi un rôle important dans la conservation des grains car il commande la vitesse de dégradation des grains, mais aussi la vitesse de développement des microorganismes et des insectes.

En première approximation on vérifie que, jusqu'à 28°C, le dégagement de chaleur des céréales double lorsque la température s'élève de 5°C. L'échauffement des grains par la respiration est un phénomène qui s'auto-accélère et qui peut conduire à la mort des grains à partir de 50°C. Pour les semences la température constitue un facteur essentiel de conservation du pouvoir germinatif qui sera détruit si on dépasse 40°C pour les céréales et 35°C pour les oléagineux.

Des températures permettent de caractériser les plages de germination et de développement des insectes et des microorganismes :

- germination 16°C à 42°C;
- insectes 13°C à 41°C;
- moisissures et bactéries –8°C à +80°C.

L'optimum des activités biologiques se situe souvent vers 30°C, température couramment observée en régions tropicales.

▮ L'humidité

L'humidité des grains stockés est le facteur de détérioration le plus important. Il a déjà été rappelé que des grains stockés humides sont le siège d'échauffements, de développements de moisissures et parfois de germinations. L'un ou l'autre de ces phénomènes est la preuve manifeste d'un mauvais stockage (voir cahier couleur, photos 5 et 6).

Il est nécessaire de bien préciser ce que signifie « humidité des grains ».

Définition de l'humidité des grains

Les grains contiennent de la matière sèche et une proportion variable d'eau. L'humidité exprime la masse d'eau contenue dans un échantillon de grains soit par rapport à la masse totale (ou masse humide) de l'échantillon, soit par rapport à la masse de matière sèche de l'échantillon.

Les professionnels du stockage préfèrent la première définition et expriment la teneur en eau ou « humidité » comme la quantité d'eau contenue dans les grains par le rapport, en pourcentage, de la masse d'eau rapportée à la masse totale des grains (ou masse de matière humide).

Humidité H % (base humide ou b.h.)

= (masse d'eau/masse totale) × 100

= (masse d'eau/(masse matière sèche + masse d'eau)) × 100



Les scientifiques des laboratoires privilégient la seconde définition en considérant l'humidité (ils parlent parfois de taux d'humidité), comme la quantité d'eau contenue dans les grains par le rapport, en pourcentage, de la masse d'eau rapportée à la masse de matière sèche de l'échantillon.

Humidité H % (base sèche)
 = (masse d'eau/masse matière sèche) × 100

À titre d'exemple, un échantillon de grains de 1 kg qui a 200 g d'eau contient 800 g de matière sèche. Il a donc une humidité de :

Humidité H % (base humide) = $(200/(800 + 200)) \times 100 = 20\%$
 ou Humidité H % (base sèche) = $(200/800) \times 100 = 25\%$

Ainsi, dans cet exemple, l'humidité peut être de 20 % ou de 25 % pour un même lot de grains selon que l'on se réfère à la base humide (b.h.) ou à la base sèche (b.s.). Pour éviter tout risque d'erreur, il est donc essentiel de savoir quelle référence est prise en compte. Lorsque cela n'est pas précisé, on considère, par défaut, que la mesure est donnée en base humide.

L'humidité du produit stocké intervient à plusieurs titres dans le processus de dégradation. Elle favorise la respiration des grains et des microorganismes associés et accentue le dégagement de chaleur au sein des grains stockés. Il est généralement admis que, jusqu'à 30 % d'humidité, le dégagement de chaleur, dû à la simple respiration des grains, double chaque fois que l'humidité augmente de 1,5 %. Une forte humidité donne une eau peu ou mal adsorbée qui facilite la mobilité des constituants à l'intérieur du grain et accélère les réactions de dégradation interne. Cette eau disponible risque de favoriser la germination des spores de moisissures et d'accroître, en conséquence, l'altération des grains (Cruz *et al.*, 1988).

Définition de l'humidité relative de l'air

La propriété d'hygroscopicité des grains fait appel à la notion d'humidité des grains, mais aussi à celle de l'humidité relative de l'air ambiant. Il est donc nécessaire de rappeler ce que représente l'humidité relative de l'air.

L'humidité relative de l'air (ou degré hygrométrique) est le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau (Pv) à la pression partielle de vapeur d'eau à saturation (Pvs).

HR% = $(Pv/Pvs) \times 100$

L'humidité relative exprime, à une température considérée, le rapport en pourcentage de la masse m de vapeur d'eau contenue dans une parcelle d'air donnée à la masse maximale m_w que peut contenir cette parcelle à la même température lorsqu'elle est saturée. La parcelle d'air est dite saturée lorsqu'elle ne peut plus absorber de vapeur d'eau et qu'elle a donc une humidité relative de 100 %.

La quantité de vapeur d'eau que peut contenir un volume d'air s'accroît fortement avec la température. Comme le montre le tableau 1.4, plus la température de l'air est élevée, plus il peut contenir de vapeur d'eau à saturation.

Tableau 1.4. Teneur en eau d'un air saturé à différentes températures.

Température de l'air (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Teneur en eau à saturation (g/kg)	3,8	7,6	14,7	27,2	48,8	86,3	152	277	550	1430

Par exemple, un air qui, à 30°C, contient 20g de vapeur d'eau par kilogramme a une humidité relative de 73,5 %:

$$HR \% = (20/27,2) \times 100 = 73,5 \%$$

Si on réchauffe cet air à 40°C, son humidité relative tombera à 41 %:

$$HR \% = (20/48,8) \times 100 = 41 \%$$

Ainsi, pour une même quantité de vapeur d'eau dans l'air, l'humidité relative sera plus faible si la température est plus élevée.

Notion d'activité de l'eau ou a_w

On pose, par définition, que l'activité de l'eau d'un grain est égale au rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du grain (P_v) et de la pression partielle de vapeur de l'eau pure ou vapeur saturante (P_{vs}) à la même température. L'activité de l'eau est notée a_w en référence au terme anglais de *activity of water*.

$$\text{Soit } a_w = P_v/P_{vs}$$

À l'équilibre hygroscopique, il y a équivalence entre l'activité de l'eau du grain et l'humidité relative de l'air qui l'environne. On a la relation :

$$a_w = HR \% / 100$$



Un grain en équilibre hygroscopique avec un air à 50 % d'humidité relative a ainsi une activité de l'eau de 0,5.

L'activité de l'eau (a_w) varie de 0 à 1 et exprime la plus ou moins grande disponibilité de l'eau pour des réactions dans le grain. Des valeurs d'activité de l'eau décroissantes témoignent d'une plus faible disponibilité de l'eau et donc ralentissent le développement des microorganismes et les réactions catalysées par les enzymes et retardent le brunissement non enzymatique. En revanche, les réactions d'auto-oxydation des lipides augmentent dans les systèmes alimentaires secs (figure 1.6).

Notion d'équilibre entre l'air et le grain

Pour mieux comprendre la relation qui existe entre l'humidité des grains et leur dégradation, il est important de préciser la notion d'équilibre entre l'air et le grain. Mis en contact prolongé, les grains et l'air ambiant, et notamment l'air interstitiel, atteignent un état d'équilibre hygroscopique caractérisé par une même température et une même pression de vapeur d'eau. Lorsqu'il y a déséquilibre, un transfert d'eau sous forme de vapeur s'établit entre les deux milieux comme cela est illustré en figure 1.5. À chaque degré d'humidité relative de l'air (ou d'activité de l'eau) correspond un degré d'humidité du grain. Ces différents équilibres sont représentés par une « courbe d'équilibre hygroscopique » qui est propre à chaque type de grain. Comme cette courbe, à allure sigmoïde, est établie pour une température donnée, elle est également appelée « isotherme de sorption » (Multon, 1982).

Il a été montré que la fraction d'eau comprise entre la courbe d'équilibre et la partie linéaire extrapolée (figure 1.6) est une eau suffisamment solvante pour constituer un milieu de diffusion favorable aux réactions chimiques et enzymatiques ainsi qu'au développement des microorganismes (Guilbot et Lindenberg, 1960).

Pour une température donnée, il existe donc un point critique C, encore appelé « point d'effondrement des forces de rétention de l'eau », au-delà duquel les principaux phénomènes d'altération se déclenchent et notamment l'attaque des moisissures (figure 1.6). Ce point critique correspond à une humidité relative de l'air de 65 % ($a_w = 0,65$), en deçà duquel les réactions enzymatiques et biologiques se trouvent inhibées. Il permet ainsi de définir une zone de stabilité pour le stockage de chaque espèce de grains.

L'exemple du riz (figure 1.7) montre que des grains stockés à 25 °C doivent être à une humidité inférieure à 13 % pour être dans de bonnes conditions de conservation.

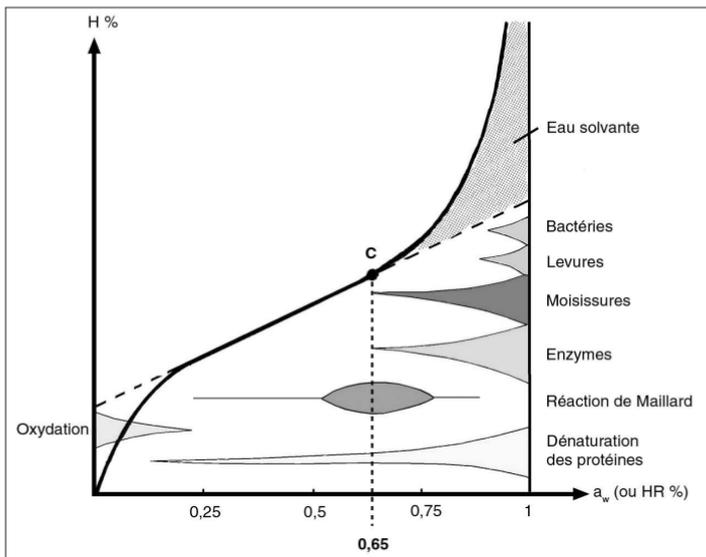


Figure 1.6.
Isotherme de sorption montrant les risques d'altération des grains (d'après Guilbot et Lindenberg, 1960).

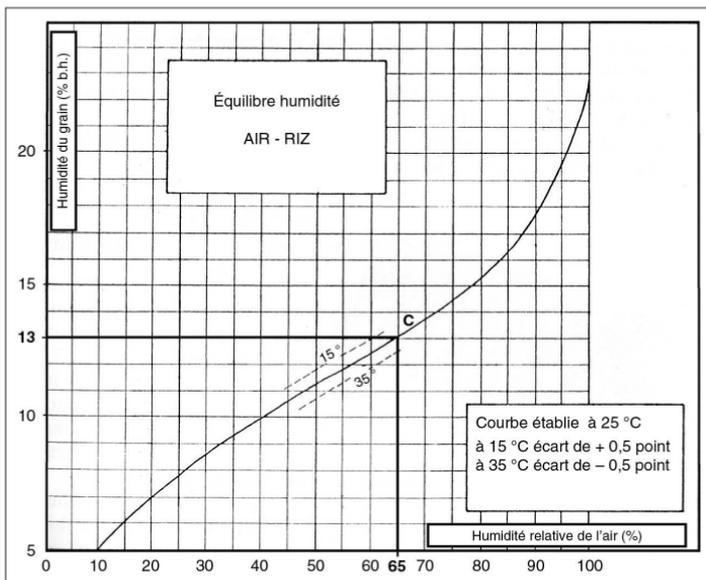


Figure 1.7.
Courbe d'équilibre air-riz (d'après Ceemat).



L'humidité maximum recommandée pour le stockage des grains est définie comme étant l'humidité d'équilibre avec une humidité relative de l'air de 65 % (ou a_w de 0,65) au-dessous de laquelle le développement des microorganismes et l'activité enzymatique sont arrêtés.

Le tableau 1.5 donne les valeurs d'humidité maximum pour un stockage de longue durée à des températures de 20 à 25 °C habituelles en régions chaudes.

Tableau 1.5. Humidité maximum pour un stockage en régions chaudes.

Produit	Humidité (H % base humide)	Produit	Humidité (H % base humide)
Riz paddy	13	Cacao	7
Maïs	13	Haricot	13 - 14
Mil	13	Niébé	13 - 14
Sorgho	12,5	Soja	10 - 11
Fonio	11	Arachide	7
Blé	13	Café	13

Action combinée de la température et de l'humidité

Les facteurs température et humidité qui ont été présentés séparément sont en réalité étroitement liés. Les courbes d'équilibre air-grain (isothermes de sorption) tracées à différentes températures montrent que plus la température ambiante (et donc la température des grains) est élevée et plus l'humidité des grains doit être faible pour assurer une bonne conservation (figure 1.8).

D'après la figure 1.8, on note que l'humidité maximum des grains de maïs doit être de 12,5 % si les grains sont stockés à 35 °C, de 13,5 % s'ils le sont à 25 °C et d'environ 14 % s'ils sont stockés à 15 °C. Ceci explique pourquoi les humidités maximales recommandées pour le stockage des grains en régions chaudes sont toujours inférieures à celles qui sont préconisées dans les régions tempérées ou froides.

▮ La composition des gaz du milieu ambiant

Les grains en masse constituent un matériau poreux dont 30 % à 50 % du volume en place sont occupés par l'air interstitiel. C'est la composition de cette atmosphère intergranulaire qui détermine le métabolisme

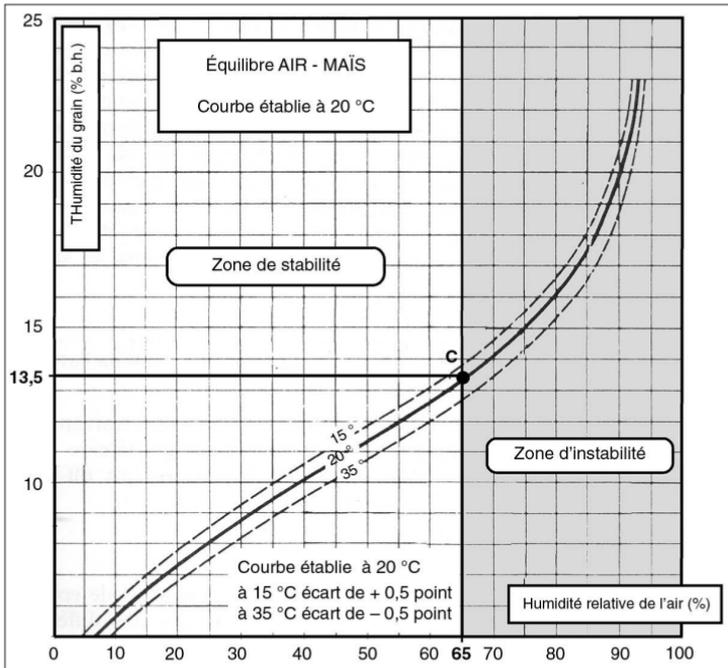


Figure 1.8.
Isothermes de sorption air-maïs (d'après Ceemat).

aérobie ou anaérobie des grains. L'air est constitué de 78 % d'azote, de 21 % d'oxygène et de 1 % d'autres gaz dont le gaz carbonique. Dans une enceinte étanche, la propre respiration des grains appauvrit le milieu en oxygène et l'enrichit en gaz carbonique. Cette modification de la composition des gaz du milieu bloque généralement le développement des moisissures et provoque la mort des insectes déprédateurs.

Ce principe est mis en œuvre dans les techniques traditionnelles de stockage souterrain. Dès le début de l'agriculture, il y a plus de 8000 ans, les hommes ont pensé à stocker leurs réserves de grains sous terre de manière à les protéger de l'attaque des déprédateurs ou des bandes de pillards. Le silo ou fosse creusée dans le sol, était ainsi utilisé dans tout le bassin méditerranéen pour le stockage des grains à long terme. Cette technique est encore pratiquée dans certaines régions du monde où les producteurs utilisent toujours des fosses creusées dans le sol pour stocker leur récolte : exemple de la *matmora* pour le stockage de l'orge au Maroc ou des *plotas* pour le stockage du sorgho en Éthiopie.



Agents biologiques d'altération des grains

Les moisissures

Des microorganismes comme les bactéries, les levures et les moisissures sont toujours présents sur la surface des grains. Au cours du stockage, ce sont surtout les moisissures qui constituent la menace la plus fréquente car elles peuvent se développer dès que l'humidité relative de l'air dépasse 65 % (ou $a_w > 0,65$) alors que les levures ou les bactéries ne se développent que sur des grains très humides (respectivement a_w de 0,85 et de 0,90). Il existe de nombreuses espèces de moisissures et les spécialistes distinguent généralement entre la parcelle cultivée et le silo, une flore du champ, une flore intermédiaire et enfin une flore de stockage dont les espèces les plus caractéristiques sont les *Aspergillus* spp. et les *Penicillium* spp. représentées en figure 1.9.

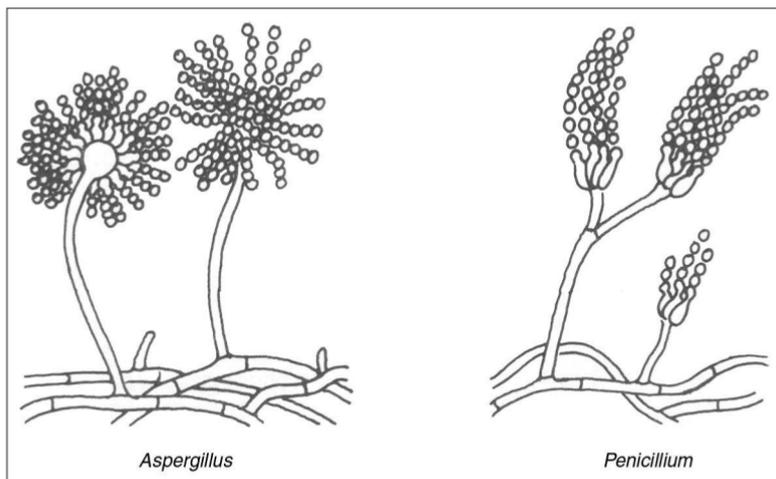


Figure 1.9.

Schéma de fructification des moisissures de stockage (d'après Richard-Molard, 1982).

Comme pour les grains, les facteurs essentiels de développement des microorganismes sont l'humidité, la température et la composition du milieu ambiant auxquels peuvent également s'ajouter des facteurs tels que le pH, la nature du substrat ou des facteurs biotiques de compétition entre espèces.

Les espèces de moisissures xérotolérantes se développent dès que l'humidité relative de l'air dépasse 65 % mais la plupart des espèces préfèrent une humidité supérieure à 85 %. Vis-à-vis de la température, le domaine de développement des microorganismes est très large et s'étend de -8°C à $+80^{\circ}\text{C}$ mais il est généralement plus restreint pour chacune des espèces avec un optimum se situant entre 20°C et 40°C . Enfin les moisissures sont réputées aérobies même si certaines espèces se contentent de traces d'oxygène et si d'autres résistent à l'anaérobiose. Par leur respiration, elles sont les principales responsables de l'échauffement des stocks de grains insuffisamment séchés (Richard Molard, 1982).

▮ Les insectes

Dans les pays du Sud, les insectes sont d'importants déprédateurs des stocks de grains. Ils sont souvent nuisibles par les larves qui consomment l'intérieur des grains et dont l'activité biologique déprécie la denrée. Les insectes qui s'attaquent aux céréales au cours du stockage sont des Coléoptères de très petite taille et certains Lépidoptères.

Les Coléoptères, par exemple : *Sitophilus* ou charançon

Les adultes possèdent une paire d'ailes antérieures sclérifiées appelées « élytres » qui protègent la paire d'ailes membraneuses utilisées pour le vol. Ces élytres leur confèrent une certaine résistance qui leur permet de se déplacer dans la masse des grains à la recherche de conditions favorables de développement (température, humidité, teneur en oxygène, présence d'impuretés fines...). Les larves, souvent responsables des dégâts, sont vermiformes.

Les Lépidoptères, par exemple : *Sitotroga cerealella*, l'alucite du maïs

Vulgairement appelés papillons, ils possèdent deux paires d'ailes membraneuses recouvertes d'écailles. Relativement fragiles, ils n'infestent que la surface des stocks. Les adultes ne vivent qu'une quinzaine de jours. Ce sont exclusivement les larves, appelées chenilles, qui avec leurs fortes pièces buccales peuvent attaquer les grains.

Le développement de la plupart des espèces se situe à des températures de 15 à 35°C avec souvent un optimum aux environs de 25 à 30°C . Les insectes ne résistent généralement pas à une teneur en oxygène inférieure à 1 % et beaucoup d'entre eux ont des difficultés à se développer dans des grains très secs ($< 9\%$).



Une description précise des principales espèces d'insectes déprédateurs des denrées stockées et des méthodes de lutte est donnée au chapitre 7.

▮ Les rongeurs

Les principaux rongeurs déprédateurs des stocks de céréales sont le rat gris ou surmulot (*Rattus norvegicus*), le rat noir (*Rattus rattus*) et la souris (*Mus musculus*). Ces rongeurs, qui vivent pratiquement sous tous les climats, se nourrissent aux dépens des hommes et sont à l'origine de pertes importantes dans les greniers et les magasins de stockage. En Afrique subsaharienne, ce sont les rats à mamelles multiples (*Mastomys* spp.) qui prédominent dans les villages et en Asie, le rat bandicot et le rat polynésien sont aussi considérés comme des nuisibles.

En rongant, ces déprédateurs percent les sacs et endommagent les structures de stockage. Ils consomment les grains et les souillent de leurs excréments et sécrétions. Mais les rongeurs sont aussi vecteurs de maladies transmissibles à l'homme (peste, fièvres hémorragiques). Les produits ou denrées contaminés par leurs fèces, leur urine ou leurs parasites constituent un risque pour les manutentionnaires qui manipulent ces produits et pour les consommateurs. Une description précise des principaux rongeurs et des méthodes de lutte est donnée au chapitre 8.

▮ Les oiseaux

Les masses de grains stockés dans les greniers ou les entrepôts attirent naturellement les oiseaux granivores (pigeons, tourterelles, moineaux). Ils consomment les grains et souillent les stocks de leurs fientes, plumes ou cadavres. Il est cependant relativement aisé de les empêcher d'atteindre les stocks de grains en grillageant les ouvertures d'aération et en colmatant toutes les fentes des bâtiments de stockage.

Écosystème des grains stockés

Tous les facteurs d'altération des grains stockés sont étroitement liés et interdépendants comme cela est schématisé dans la figure 1.10. L'humidité reste un facteur majeur sur lequel il est indispensable d'intervenir le plus rapidement possible pour assurer de bonnes conditions de conservation.

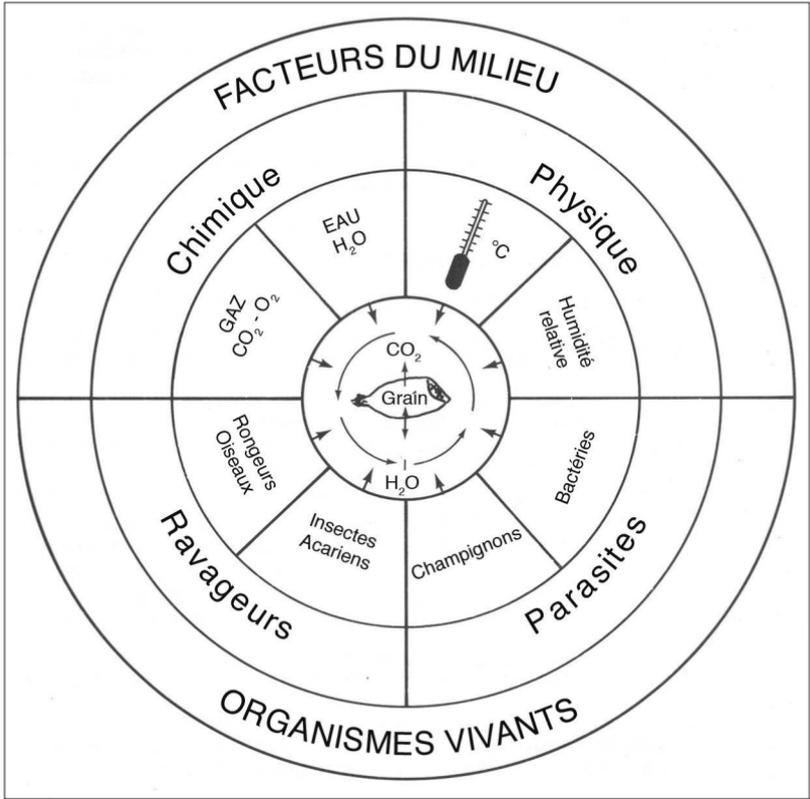


Figure. 1.10.
Écosystème du grain stocké (d'après Cangardel, 1978).



2. Les pertes après récolte : principes de conservation

Définitions et historique

On a longtemps défini les pertes comme étant une diminution mesurable des denrées alimentaires, qui peut être soit quantitative, soit qualitative. On distingue alors les dégâts qui limitent l'utilisation d'un produit, des pertes qui rendent son utilisation impossible. On considère ainsi qu'une détérioration mécanique des grains (grains cassés par exemple) constitue un dégât, mais ne représente pas une véritable perte, même si ce dégât peut, avec le temps, aboutir à une perte. (Tyler et Gilman, 1980; Grolleaud, 2001).

Ensuite la FAO a désigné les pertes alimentaires comme étant la diminution de la masse alimentaire comestible disponible pour la consommation humaine à travers les différents niveaux de la chaîne d'approvisionnement. Elle précise aussi qu'en plus des pertes quantitatives, les produits alimentaires peuvent également subir une détérioration de leur qualité, conduisant à une perte de leurs valeurs nutritive et économique.

Cette définition fait uniquement référence à l'alimentation humaine et semble ignorer l'alimentation animale. Des grains attaqués par les insectes et impropres à la consommation humaine doivent-ils être comptabilisés comme une perte sèche alors qu'ils peuvent encore être utilisés pour l'alimentation des volailles comme c'est souvent le cas en agriculture familiale ?

Plus récemment, on a pris l'habitude d'associer aux pertes la notion de gaspillage. Dans les pays du Sud, les pertes dites primaires se produisent essentiellement à l'amont de la filière et concernent les produits bruts au stade de la production mais surtout aux étapes de l'après récolte et notamment de la conservation, du transport et de la transformation. Il s'ensuit que l'expression « pertes » est souvent synonyme de « pertes après récolte ». Dans les pays du Nord, les techniques après récolte sont généralement bien maîtrisées et les pertes se produisent surtout à l'aval de la filière au niveau de la distribution et de la consommation. Elles sont alors qualifiées de pertes secondaires ou de gaspillages et concernent davantage les produits transformés (Parfitt *et al.*, 2010).

L'évaluation de l'ampleur de toutes ces pertes reste difficile et souvent partielle. Par des études récentes, la FAO estime cependant que les quantités de pertes et gaspillages alimentaires annuels au niveau mondial atteignent 20 à 35 % pour les céréales et davantage pour les racines, les tubercules et les fruits et légumes (FAO, 2012). Les pertes peuvent aussi être exprimées en calories alimentaires par jour et par personne (kcal/j/personne) et la figure 2.1 illustre bien la part des pertes et gaspillages dans l'évolution de la disponibilité alimentaire produite par l'agriculture jusqu'à la consommation alimentaire.

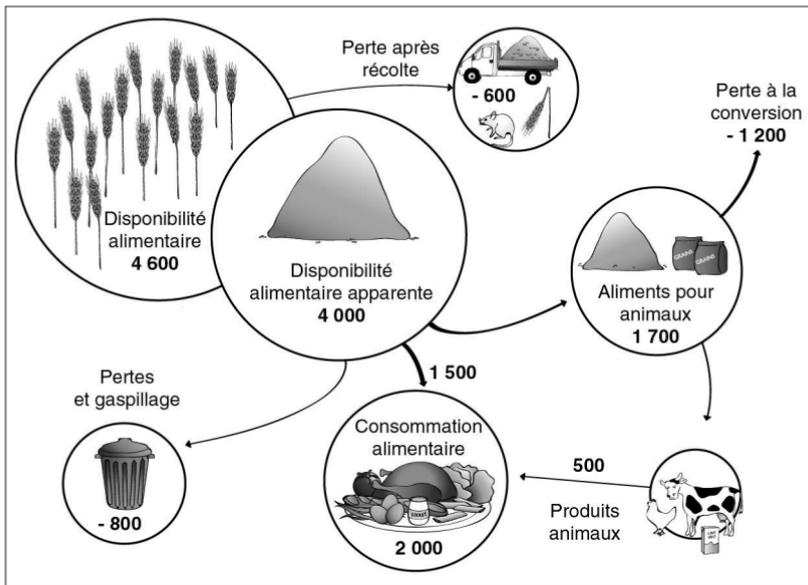


Figure 2.1.

Pertes et gaspillages de la production à la consommation (moyennes mondiales exprimées en kcal/j/personne) (d'après Guillou et Matheron, 2011).

L'importance du secteur après récolte a véritablement été affirmée à la suite des grandes sécheresses qui ont durement frappé certaines régions d'Afrique au début des années 1970. En 1974, le Sommet Mondial de l'Alimentation de Rome, constatait que les pertes représentaient plus de 15 % des récoltes dans les pays pauvres et qu'il fallait impérativement améliorer les techniques de conservation. Ce défi a été repris en 1975 dans une résolution des Nations Unies qui se donnait pour objectif ambitieux de réduire les pertes de 50 % en 10 ans. Suite à cette initiative, la FAO a créé un programme spécifique



de réduction des pertes après récolte appelé *Prevention of Food Losses*. C'est également à la fin des années 1970 qu'un organisme international comme le groupe d'assistance aux Systèmes concernant les grains après récolte (Gasga¹) a vu le jour. Cette association de différents pays du Nord visait à améliorer l'aide technique aux pays du Sud en matière de commercialisation, de stockage, de transformation et de transport des grains.

Pertes après récolte dans les grains

▮ L'importance des pertes

Les céréales restent, encore aujourd'hui, la base de l'alimentation mondiale, notamment dans les pays du Sud où elles constituent souvent l'essentiel de la ration alimentaire. Pendant des décennies, l'objectif principal de nombreuses politiques agricoles a été d'accroître la production pour chercher à atteindre l'autosuffisance alimentaire. Les efforts, en particulier de la recherche agronomique, ont permis d'obtenir des progrès notables sur les rendements grâce à la création de variétés améliorées et au développement de moyens de production plus performants. Mais tout ce qui est produit n'est pas directement consommé par l'homme ou par les animaux d'élevage car une partie des récoltes est perdue au cours des opérations après récolte et de transformation.

En raison de la croissance considérable des marchés urbains, il est devenu évident qu'une stratégie fondée uniquement sur l'amélioration de la production agricole ne suffirait pas à faire face à l'augmentation de la demande alimentaire. Afin de maximiser le volume de production agricole disponible pour la consommation, il faut accorder plus d'importance aux systèmes post-récolte et précisément à la réduction des pertes tout au long de la filière. Dès 1976, dans un manuel du Centre de Recherches pour le Développement international (CRDI), on précisait que « *Bien compris, le système post-récolte devrait commencer au moment et au lieu de la récolte et se terminer seulement à la table du consommateur. D'un bout à l'autre, il devrait assurer un revenu maximum à tous ceux qui œuvrent, tout en minimisant les pertes et en maximisant les bénéfices* » (Spurgeon, 1976).

1. Gasga : Groupe d'Assistance aux systèmes concernant les grains après récolte. Les huit membres du Gasga étaient : ACIAR (Australie), Cirad (France), CRDI (Canada), FAO (Italie), GTZ (Allemagne), KIT (Pays-Bas), KSU (USA) et NRI (Royaume-Uni).

Les pertes post-récolte ont diverses origines et dépendent de nombreux facteurs endogènes (évolution naturelle d'une denrée vivante) ou exogènes physiques (humidité, température...) et biologiques (moisissures, insectes, rongeurs...) et la complexité des systèmes post-récolte selon les filières et les pays rend parfois difficile leur évaluation. On peut néanmoins bien distinguer les zones tropicales humides des zones tropicales sèches car les problèmes de conservation y sont souvent très différents. Dans les zones humides, c'est la stabilité du produit qui est prépondérante (problème de séchage, moisissures, mycotoxines....) et les risques de pertes sont importants alors que dans les zones sèches, les problèmes majeurs, en dehors des périodes d'hivernage, restent essentiellement liés aux ravages des déprédateurs (insectes, rongeurs...).

À la fin des années 1970, les premières informations disponibles sur l'importance des pertes avaient été récapitulées par l'Académie des Sciences aux États-Unis et presque toutes les données concernaient les céréales et des légumineuses. Les données des pertes sur les racines et les tubercules ou sur les fruits et légumes étaient beaucoup plus rares.

Les pertes post-récolte mesurées en Asie du Sud dans les années 1970 (De Padua, 1979) ont été validées par différents projets et ont longtemps été considérées comme des standards pour la filière riz. Elles sont rappelées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Pertes post-récolte de riz en Asie du Sud-Est.

Séquence post-récolte	Pertes en poids (%)
Récolte	1 – 3
Manutention	2 – 7
Battage	2 – 6
Séchage	1 – 5
Stockage	2 – 6
Transformation	2 – 10
Total	10 – 37

En 1998, une synthèse des résultats de mesures de pertes réalisées par différents projets *Prevention of Food Losses* dans différents pays d'Asie a été réalisée (tableau 2.2).

Pour l'Afrique, des valeurs sur les pertes au stockage de certains produits agricoles relevées dans les années 1970-1980 sont données dans le tableau 2.3 (Schulden, 1982).



Tableau 2.2. Comparaison des pertes post-récolte en riz (exprimées en %) dans différents pays d'Asie.

Séquence post-récolte	Bangladesh (%)	Myanmar (%)	Indonésie (%)	Népal (%)	Sri Lanka (%)	Thaïlande (%)
Récolte	2,3	2,1	0,8	1,9	0,8	10,1
Séchage au champ	0,7	0,4	-	1,9	0,5	1,2
Transport	0,5	0,4	-	0,5	-	1,0
Mise en meule et battage	1,4	0,4	-	2,2	3,3	2,3
Séchage	1,6	-	2,9	1,6	-	-
Étuvage	1,9	-	-	-	-	-
Stockage	0,9	-	3,2	6,3	7,5	-
Transformation	3,8	-	4,4	4,4	-	-
Total estimé par projet	13,2	-	12,2	16,2	12,0	14,6

Les valeurs doivent être interprétées avec prudence, elles permettent néanmoins d'identifier les séquences où se produisent les pertes post-récolte et leur importance relative (Ashburner, 1998).

Tableau 2.3. Pertes (en % du poids) au stockage de quelques produits agricoles en Afrique (Schulten, 1982).

Produit	Pays	Pertes (%)	Remarques
Maïs	Bénin	8 - 9	8 mois de stockage
	Côte d'Ivoire	5 - 10	12 mois de stockage en épis
	Ghana	15	8 mois de stockage
	Togo	5 - 10	6 mois de stockage centralisé
	Rwanda	10 - 20	Stockage à la ferme
Mil	Mali	2 - 15	2 - 4 % stockage à la ferme 10 - 14 % en stockage centralisé
Sorgho	Zambie	0 - 10	Variétés améliorées : 10 %
Légumineuse	Ghana	7 - 45	En grains de 1 à 5 mois; en gousses : 22%
	Zambie	40	Niébé
	Kenya	30	Stockage à la ferme
Riz	Afrique Ouest	6 - 24	Séchage, 1-2%; stockage à la ferme, 2-10%; étuvage, 1-2%; usinage, 2-10%
	Sierra Leone	10	
Racine	Ghana	10 - 50	Igname

- Les principaux constats, qui sont encore d'actualité, étaient les suivants :
- les pertes dans le maïs stocké sont généralement importantes, notamment avec les variétés améliorées et les hybrides ;
 - les légumineuses ont des niveaux de pertes plus élevées que les céréales et le niébé est l'objet de pertes particulièrement importantes pendant le stockage ;
 - des pertes de transformation sont spécifiquement mentionnées pour le riz.

Pour de nombreuses denrées comme les céréales, l'importance des pertes varie selon la nature du matériel végétal. Les variétés traditionnelles sont davantage résistantes à l'attaque des insectes que les variétés améliorées ou les hybrides. Des recherches réalisées au Malawi ont montré que les pertes en poids de maïs stocké pouvaient être supérieures à 20% avec des maïs hybrides alors qu'elles n'étaient que de 3% avec des variétés locales (Schulten, 1982).

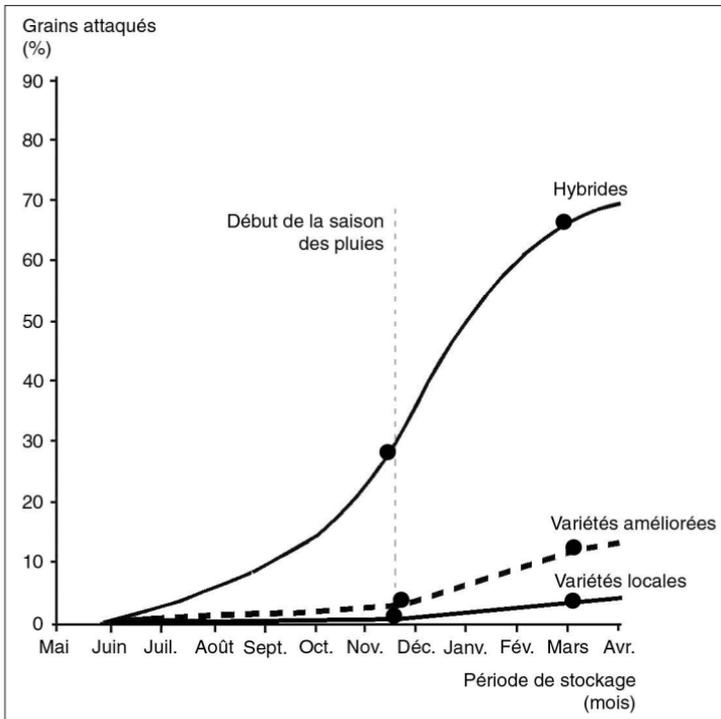


Figure 2.2. Pourcentage de grains de maïs attaqués par les insectes au Malawi (d'après Schulten, 1982).



Plus récemment, la base de données *African postharvest losses information system* (APHLIS) a été créée pour estimer les pertes de céréales en Afrique subsaharienne à partir de données d'experts. Les pertes en poids cumulées sont habituellement estimées entre 10 et 23 % et les niveaux de pertes selon les différentes séquences post-récolte sont donnés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. Pertes en poids au niveau des différentes séquences de post-récolte pour les céréales en Afrique subsaharienne.

Séquence de post-récolte	Pertes en poids (%)
Récolte – séchage au champ	4 – 8
Transport vers l'habitation	2 – 4
Séchage	1 – 2
Battage	1 – 3
Vannage	1 – 3
Stockage à la ferme	2 – 5
Transport au marché	1 – 2
Stockage au marché	2 – 4
Pertes cumulées	10 – 23

Le niveau total des pertes estimées, selon différentes céréales, au cours des dernières années est rappelé dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5. Pertes (en % du poids) pour différentes céréales en Afrique subsaharienne (Hodges *et al.*, 2014).

Céréale	Pertes (%)			
	2010	2011	2012	2013
Maïs	18,8	17,8	18,0	17,6
Riz	12,6	12,1	13,6	12,2
Sorgho	12,6	12,4	12,4	12,3
Mil	9,9	10,1	10,1	10,1
Fonio	12,2	11,7	11,8	11,7
Teff	12,5	12,5	12,4	12,5
Blé	14,0	13,1	12,9	15,2

▮ Le calcul des pertes

Plusieurs méthodes ont été proposées pour mesurer les pertes en poids : mesure de la masse volumique, mesure par comptage et pesée (*count and weigh*), méthodes utilisant un facteur de conversion à partir du pourcentage de grains attaqués (Harris et Lindblad, 1978). La méthode de la masse de 1000 grains a été proposée dans les années 1980 (Proctor et Rowley, 1983). Des études d'évaluation des pertes de poids occasionnées par les insectes pendant le stockage du maïs, du riz paddy et du sorgho dans des villages de Côte d'Ivoire et de République centrafricaine ont démontré que la méthode par comptage et pesée est beaucoup plus pratique et plus précise que la méthode des 1000 grains (Ratnadass et Fleurat-Lessard, 1991). Pour une évaluation rapide des pertes causées par les insectes, les deux méthodes par comptage et pesée et par facteur de conversion semblent les plus appropriées (Schulten, 1988).

Les deux critères d'appréciation des dégâts sont : le pourcentage d'attaque et le pourcentage de pertes en poids. Pour le pourcentage d'attaque on considère un lot de 100 ou mieux de 1000 grains que l'on sépare en grains sains et en grains attaqués.

Pourcentage d'attaque

$$A (\%) = (N_a / (N_s + N_a)) \times 100$$

N_s , nombre de grains sains, N_a , nombre de grains attaqués

Pourcentage de perte en poids

M_s , masse des grains sains; M_a , masse des grains attaqués

Si les grains attaqués avaient été sains ils auraient pesé $(M_s/N_s) \times N_a$, or ils pèsent M_a .

La perte en poids P est la différence des deux masses
 $((M_s/N_s) \times N_a) - M_a$

La masse totale du lot calculée comme si tous les grains avaient été sains est : $((M_s/N_s) \times (N_a + N_s))$

ce qui en donne :

$$P (\%) = ((M_s \times N_a) - (M_a \times N_s)) / (M_s \times (N_a + N_s)) \times 100$$

Cette méthode est simple, mais manque de précision pour les niveaux de pertes élevés ou faibles (Tyler et Gilman, 1980).



Calcul avec facteur de conversion

Utiliser un facteur de conversion (C) permet de calculer le pourcentage de pertes en poids (P) à partir du pourcentage d'attaque (A) :

$$P (\%) = A (\%) / C$$

Ce facteur de conversion est variable selon les denrées (Adams et Schulten, 1978).

Pour le blé, le paddy et le riz, $C = 2$.

Pour le sorgho, $C = 4$.

Pour le maïs en épis avec spathes, $C = 4$.

Pour le maïs en épis sans spathes ou le maïs égrené, $C = 8$.

D'autres auteurs ont défini un coefficient de perte spécifique K par lequel on multiplie le pourcentage d'attaque (A) pour obtenir le pourcentage de perte en poids (P) : $P (\%) = K \times A (\%)$. Des données sont fournies par Pointel et Coquard (1980) et sont légèrement différentes de celles proposées par Adams et Schulten (1978).

Pour le blé avec charançons, $K = 0,364$.

Pour le maïs avec charançons, $K = 0,116$.

Pour le maïs infesté par les alucites, $K = 0,095$.

Ces méthodes portent principalement sur le stockage des grains en milieu rural ou villageois. La plupart des chercheurs travaillant sur l'évaluation des pertes étant entomologistes, le terme de pertes a longtemps été synonyme de dégâts dus aux insectes.

▮ Les actions pour limiter les pertes

Outre quelques enquêtes sur l'évaluation des pertes, les principales activités ont été focalisées sur l'amélioration du stockage villageois. Au cours de la période 1970-1990, la FAO a ainsi accompagné de nombreux petits projets destinés à la promotion de greniers améliorés et à la vulgarisation de méthodes de lutte, surtout chimique, contre les insectes. Mais les résultats de ces projets sont limités car, en Afrique notamment, les pratiques traditionnelles de stockage sont toujours présentes. Issues d'une longue expérience, elles ont permis de réduire la pénurie de denrées vivrières entre deux récoltes, et les programmes d'aide devraient s'en inspirer davantage. Ainsi, dans de nombreuses régions du monde, les petits producteurs n'ont pas abandonné leurs

greniers traditionnels pour adopter des structures nouvelles supposées plus performantes. En outre, aujourd'hui, la lutte chimique est remise en cause en raison des risques qu'elle entraîne sur la santé humaine notamment par la présence des résidus de pesticides.

En 1994, les projets mis en œuvre ont été évalués lors d'un séminaire de la FAO (FAO, 1994). Les deux principales conclusions ont été les suivantes :

- « Il semble que les techniques traditionnelles, élaborées au fil des générations d'agriculteurs, aient fait leur preuve. Aujourd'hui encore elles sont prépondérantes car bien maîtrisées et ancrées dans la culture de chaque ethnie. Néanmoins l'évolution socio-économique et les changements écologiques bouleversent les conditions de production et de commercialisation des produits de base (grains et tubercules). Le système post récolte situé à l'interface doit s'adapter à ce nouveau contexte en perpétuel changement » ;
- « Il s'agit d'entrer dans un nouvel état d'esprit face aux changements socio-économiques, c'est-à-dire de chercher à s'adapter au marché, prendre en compte les nouvelles contraintes de l'environnement, veiller à la qualité de la production ».

En complément des actions réalisées en milieu rural, les différents membres du Gasga ont focalisé leur coopération sur l'amélioration des techniques de stockage centralisé dans les pays en développement en Afrique et en Asie du Sud-Est. Il s'agissait d'apporter un appui technique aux Offices céréaliers locaux pour améliorer la conservation des grains en entrepôts et promouvoir l'évolution du stockage en sacs vers le stockage vrac. Mais au cours des années 1990, de nombreux États se sont désengagés en libéralisant les filières céréalières et en supprimant ou en réduisant considérablement le rôle des Offices céréaliers, ce qui a conduit à l'abandon de la thématique post-récolte dans la plupart des projets de recherche développement, alors que la sécurisation de l'approvisionnement des centres urbains devenait une nouvelle priorité.

▮ Une nouvelle approche : la réduction des pertes et des gaspillages

Aujourd'hui, face à la croissance de la population mondiale et à l'augmentation des besoins alimentaires, les instances nationales et internationales, les décideurs et les chercheurs remettent en avant la question des pertes après récolte. Cependant, la « nouvelle » définition des pertes après récolte ne prend en compte que ce qui est directement destiné à la



consommation humaine et écarte tout ce qui est destiné à l'alimentation animale ou aux agro-énergies et qui serait alors considérée comme une perte. Des différences d'appréciation conduisent à des écarts importants et peut être à une exagération des pertes et des gaspillages évalués. Par ailleurs certaines de ces pertes ont une utilité dans le circuit écologique général. Les «pertes post-récolte» de céréales servent à l'alimentation des oiseaux de ferme, des poissons, des crabes de rizières, de la faune sauvage ou pour la fabrication de compost (Griffon, 2006).

Néanmoins, on prend mieux en compte la réduction des pertes après récolte comme une composante essentielle de toute stratégie qui vise à mettre à la disposition de tous une nourriture suffisante sans accroître la pression sur le milieu naturel (Hodges *et al.*, 2011).

Dans les pays du Nord, l'agriculture et les industries agroalimentaires sont déjà dans une démarche de réduction des coûts et de limitation des pertes (Redlingshöfer et Soyeux, 2011). Les nombreuses opérations post-récolte sont mécanisées et souvent très efficaces en termes de performances et de qualité : récolte à la moissonneuse batteuse, transport en vrac, nettoyage mécanique, séchage artificiel, stockage en vrac... Les procédés de transformation des produits alimentaires et d'utilisation des coproduits et des sous-produits sont généralement bien optimisés. Les efforts doivent davantage porter sur les séquences aval qui concernent l'emballage et le conditionnement, la distribution, la restauration hors domicile et la consommation.

Pour les céréales, on considère que dans les pays industrialisés (Europe, Amérique du Nord), plus de 70 % des pertes sont générées aux stades de la distribution et de la consommation.

Dans les pays pauvres du Sud, les principales pertes alimentaires se situent en amont de la transformation et de la commercialisation des produits, entre le champ et le transformateur et le distributeur (Guillou et Matheron, 2011). En Afrique subsaharienne, plus de 70 % des pertes de céréales ont lieu lors des opérations agricoles et de post-récolte (FAO, 2012).

Principes de la conservation

Les facteurs de dégradation des denrées stockées ont été largement décrits dans le chapitre 1. Pour assurer une bonne conservation des produits, les techniques qui doivent être mises en œuvre sont celles qui permettent d'agir efficacement sur ces différents facteurs (tableau 2.6).

Tableau 2.6. Facteurs d'altération et techniques et opérations post-récolte recommandées.

Facteur d'altération	Techniques et opérations post-récolte
Humidité	Technique de séchage
Température	Technique de ventilation, technique du froid
Air interstitiel	Atmosphère modifiée, stockage hermétique (gaz neutre, vide)
Déprédateurs - insectes	Désinsectisation, lutte physique et traitements insecticides
Déprédateurs - rongeurs	Lutte contre les rongeurs

Dans de nombreux pays du Sud il existe un besoin important d'innovations techniques notamment en matière de séchage et de stockage.

Au niveau de l'exploitation familiale, les quantités à gérer restent relativement modestes et portent sur quelques centaines de kilogrammes ou quelques tonnes. Les pertes peuvent être diminuées par la bonne préparation (nettoyage, séchage) des produits avant le stockage, l'amélioration des systèmes de stockage traditionnels et l'introduction de nouveaux systèmes de stockage en zones rurales comme par exemple la diffusion de petits silos métalliques. Les solutions technologiques doivent rester simples, peu onéreuses, faciles d'entretien et adaptées aux problèmes spécifiques à résoudre.

Au niveau du stockage communautaire ou commercial où les quantités stockées vont de quelques centaines à quelques milliers de tonnes, les besoins en innovation sont sans doute plus importants. Ils concernent l'ensemble des séquences de post-récolte et peuvent faire appel à des solutions techniques plus sophistiquées. Le séchage reste l'opération la plus cruciale car il permet de stabiliser les produits avant leur conservation. Le stockage en vrac est à promouvoir car il facilite grandement le contrôle et la maîtrise de la qualité. Le froid ou les atmosphères modifiées restent des techniques très coûteuses qui ne peuvent être envisagées que sur des produits à haute valeur ajoutée comme les semences, le cacao...

Les chapitres suivants font le point sur les différentes techniques de conservation des grains et sur les améliorations possibles.



3. La stabilisation des grains et les modes de séchage

Stabilisation des grains, rôle du séchage

Le séchage est la méthode la plus ancienne et la plus répandue pour faciliter la conservation des denrées et pour assurer notamment le bon stockage des grains. Depuis les temps les plus reculés, les hommes ont eu recours au séchage des denrées alimentaires. Dès le ^v^e siècle, l'agronome latin Palladius évoque la nécessité de disposer d'une aire de séchage pour le blé «*Il faut avoir dans son voisinage un autre terrain plat et bien découvert, dans lequel on puisse transporter les blés pour y prendre l'air avant d'être serrés dans les greniers; précaution utile pour qu'ils se gardent longtemps.*» (Nisard, 1864).

L'humidité critique est l'humidité au-dessus de laquelle des phénomènes d'altération des grains, comme l'attaque des moisissures, se déclenchent (voir explication chapitre 1 page 25). Ce point critique correspond à une humidité relative de l'air de 65 % (ou activité de l'eau dans le grain a_w de 0,65 à l'équilibre de sorption). Le rôle du séchage est de déshydrater rapidement les grains jusqu'à une humidité dite de sauvegarde à laquelle ils sont stabilisés. Ainsi, le séchage évite les risques d'altération des grains par les microorganismes, notamment les moisissures, au cours du stockage (voir encadré 3.1).

Le séchage convectif à l'air chaud est utilisé pour réduire l'humidité des grains. Cet air chaud apporte l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau contenu dans les grains (air caloporteur), absorbe cette vapeur d'eau et la transporte pour la rejeter à l'extérieur (air vapo-transporteur). Le séchage convectif est très utilisé pour les produits agricoles car il permet un transfert simultané de chaleur et de vapeur d'eau issue du produit.

Le bilan de l'opération se traduit par :

- la dessiccation des grains;
- l'accroissement de la température des grains;
- l'augmentation de la teneur en eau de l'air;
- l'abaissement de la température de l'air (au moment de la vaporisation de l'eau).

Encadré 3.1. Les microorganismes et les mycotoxines des grains stockés

Les grains sont toujours porteurs d'un grand nombre de microorganismes (moisissures, levures, bactéries) susceptibles de se multiplier s'ils sont placés dans des conditions d'humidité et de température favorables. Certaines moisissures comme les espèces du genre *Fusarium* sont prépondérantes au champ alors que d'autres comme les genres *Aspergillus* et *Penicillium* se manifestent au cours de la conservation des céréales et sont qualifiées de flore de stockage. Leur prolifération altère fortement la qualité des grains mais risque surtout d'entraîner des problèmes sanitaires par la production de mycotoxines, substances toxiques pour l'homme et les animaux.

Il existe plusieurs classes de mycotoxines dont les plus nocives pour la santé humaine sont les aflatoxines et particulièrement l'aflatoxine B1 (AFB1) considérée comme cancérogène par le Centre international de Recherche sur le cancer. Les aflatoxines (produites par des *Aspergillus* spp.) et, en climat tempéré, les ochratoxines mais aussi d'autres mycotoxines comme la zéaralénone et les fumonisines (produites par des *Fusarium* spp.) sont aussi toxiques pour les animaux et particulièrement les porcs, les volailles ou les équidés. Comme sous les tropiques, les espèces de champignons des genres *Fusarium* et *Aspergillus* sont parmi les plus fréquentes sur les grains, on doit porter une attention toute particulière à la présence de mycotoxines dans les récoltes stockées.

Plusieurs pays ont fixé des teneurs limites en mycotoxines à ne pas dépasser pour la commercialisation d'aliments destinés à l'homme ou aux animaux. En ce qui concerne les aflatoxines, la réglementation européenne fixe des teneurs maximales de 2 µg/kg pour l'AFB1 et de 4 µg/kg pour les aflatoxines totales dans les céréales, à l'exception du maïs et du riz soumis à un traitement avant utilisation.

Si les grains sont convenablement séchés jusqu'au taux d'humidité de sauvegarde aussitôt après la récolte, les moisissures ne peuvent pas se développer et donc produire des mycotoxines. Au cours du stockage, on doit veiller à ce que cette humidité de sauvegarde ne soit pas dépassée.

Caractéristiques de l'air, diagramme de l'air humide

L'air ambiant est constitué d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau :
Air humide = air sec + vapeur d'eau.

▮ Les grandeurs caractéristiques

L'air est caractérisé par différentes grandeurs physiques : la température sèche, la température humide, la température de rosée, l'enthalpie, l'humidité absolue, l'humidité relative, le volume massique.



La température sèche (t) : c'est la température de l'air mesurée classiquement avec un thermomètre ordinaire. Elle est parfois appelée température du bulbe sec. Une transformation isotherme est une transformation qui s'effectue à température constante.

La température humide (th) : l'air placé au contact d'un corps humide se charge en eau sous forme de vapeur. La transformation d'eau liquide en eau vapeur absorbe de la chaleur. La température humide est la température atteinte par l'air saturé dans ces conditions. Elle est donc inférieure à la température du bulbe sec. Elle est mesurée avec un thermomètre dont le bulbe entouré d'une gaze imbibée d'eau est placé dans un courant d'air (généralisé par un petit ventilateur dans un psychromètre).

La température de rosée (tr) : si l'on abaisse progressivement la température de l'air, son humidité relative augmente jusqu'à 100%. L'air est alors saturé et un léger abaissement de température provoque la condensation avec apparition de gouttelettes d'eau. La température de rosée est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser au contact d'une surface froide.

L'enthalpie (H) : en thermodynamique, l'enthalpie est le terme utilisé pour définir l'énergie calorifique d'un système isolé. Elle est souvent exprimée en joule et l'enthalpie massique est exprimée en kJ/kg d'air sec. Mais d'autres unités historiques comme la kilocalorie ou la millithermie sont encore utilisées (voir exemple du diagramme de Mollier – figure 3.1). Une transformation isenthalpique est une modification des caractéristiques d'un système sans apport d'énergie extérieure comme, par exemple, l'absorption de vapeur d'eau par l'air.

L'humidité absolue (W) : elle correspond à la teneur en eau de l'air. Elle est normalement exprimée en kg eau/kg d'air sec. Mais les quantités de vapeur d'eau contenues dans l'air étant faibles, on utilise souvent l'unité g/kg, signifiant g eau/kg d'air sec.

L'humidité relative (Hr) : c'est le degré hygrométrique qui représente le rapport entre l'humidité absolue de l'air et l'humidité absolue maximale que peut avoir cet air à la même température. L'humidité relative est exprimée en pourcentage. Elle est mesurée au moyen d'un hygromètre.

Le volume massique (v) : il représente le volume occupé par 1 kg d'air sec en m^3 d'air humide (m^3/kg). On obtient la masse volumique de l'air humide notée ρ en kg d'air humide/ m^3 d'air humide par la relation :

$$\rho = (1 + W)/v$$

Comme en général W est très inférieur à 1, on tolère l'approximation : $\rho = 1/v$.

Toutes ces grandeurs caractéristiques de l'air humide ont été regroupées sur un abaque appelé diagramme enthalpique de l'air humide. Ce diagramme représente graphiquement les différents états du mélange air-vapeur d'eau à la pression atmosphérique (101325 Pa). Il existe plusieurs représentations graphiques selon leurs auteurs : diagramme de Mollier, diagramme de Carrier, etc.

Ce sont des outils très pratiques et indispensables au technicien du séchage et de la ventilation car ils permettent, à partir de la connaissance de deux paramètres, de déterminer sans calcul fastidieux toutes les autres caractéristiques de l'air et de suivre ainsi l'évolution de l'état de l'air au cours du séchage. Le point figuratif d'un état donné de l'air s'appelle « point caractéristique ».

▮ Des exemples d'utilisation du diagramme de Mollier

Soit un air dont la température sèche est de 25°C et la température humide (mesurée avec un thermomètre à bulbe humide) de 19°C. Il est représenté sur le schéma par le point caractéristique C (figure 3.1).

Le diagramme de Mollier permet alors de connaître directement les autres caractéristiques de cet air :

- humidité relative, 60 %;
- teneur en vapeur d'eau, 11,6 g/kg et teneur en vapeur d'eau à saturation, 14 g/kg;
- température de rosée, 16°C;
- enthalpie, 13 kcal/kg ou mth/kg, environ 54 kJ/kg;
- volume spécifique, $V = 0,86 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Question 1. Quelle est la capacité maximum d'absorption de vapeur d'eau ou « pouvoir séchant » de cet air ?

Réponse. L'air à 60 % peut théoriquement absorber de l'eau vapeur jusqu'à saturation (100 %). L'absorption de vapeur d'eau est une transformation isenthalpique. Le point figuratif C de l'air se déplace sur l'isenthalpe 13 kcal/kg jusqu'à l'intersection avec la courbe d'humidité relative 100 %. À saturation cet air peut contenir 14 g/kg d'eau. Son pouvoir séchant est donc faible puisqu'il n'est que de $14 - 11,6 = 2,4 \text{ g/kg}$.

Question 2. Quelles sont les caractéristiques de cet air chauffé à 50°C ?

Réponse. Le réchauffage de l'air ne modifie pas la composition de l'air donc la quantité d'eau qu'il contient. Il s'agit d'une transformation isohyde sans modification de la teneur en eau. Le point figuratif se déplace sur la verticale 11,6 g/kg jusqu'à l'isotherme sèche 50°C, on a alors le nouveau point figuratif D.



Ses nouvelles caractéristiques sont :

- humidité relative, 15 %;
- teneur en vapeur d'eau, 11,6 g/kg;
- température de rosée, 16 °C;
- enthalpie, 19 kcal/kg ou mth/kg, environ 79 kJ/kg;
- volume spécifique, $V = 0,93 \text{ m}^3/\text{kg}$.

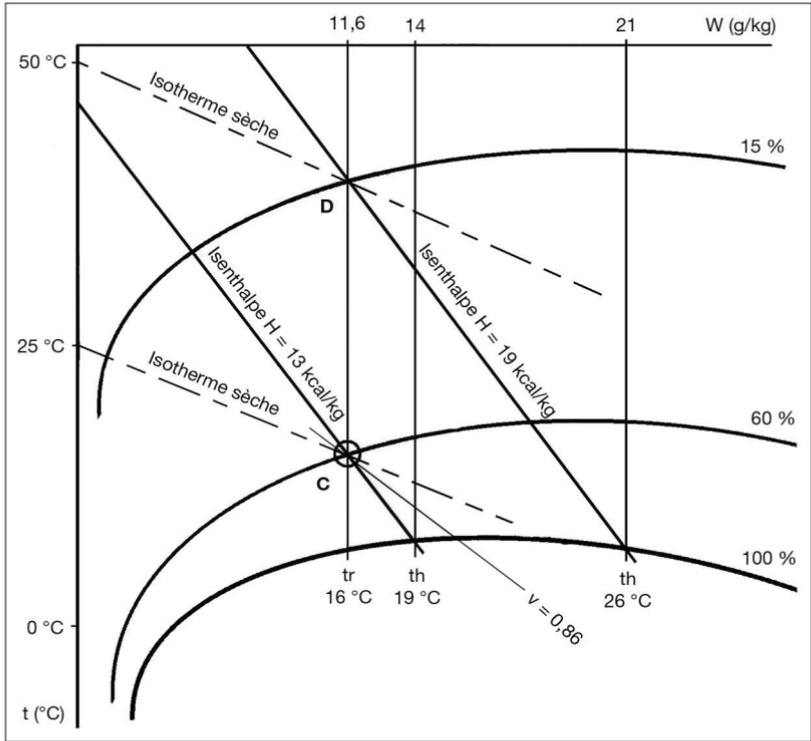


Figure 3.1.

Schéma d'utilisation du diagramme de Mollier.

Grandeurs caractéristiques représentées sur le diagramme :

- enthalpie (H) : les points de même enthalpie sont situés sur les droites obliques grasses appelées isenthalpes;
- teneur en eau (W) : les points de même teneur en eau sont situés sur les verticales (données en g/kg);
- humidité relative de l'air (%) : elle est figurée par les courbes concaves Hr. La courbe de saturation (courbe 100%) limite le diagramme en partie inférieure;
- température sèche (t) : droites obliques appelées isothermes sèches;
- température humide (th) : les droites d'isothermes humides ne sont pas représentées mais ont une pente proche des isenthalpes. Les valeurs sont données sur la courbe de saturation;
- température de rosée (tr) : valeur donnée sur la courbe de saturation et située à la verticale du point figuratif;
- volume spécifique de l'air (v) : représenté par des droites obliques (v).

Question 3. Quel est le pouvoir séchant de cet air réchauffé à 50°C ?

Réponse. Le point figuratif D de l'air se déplace sur l'isenthalpe 19 kcal/kg jusqu'à l'intersection avec la courbe d'humidité relative 100 %. À saturation cet air peut contenir 21 g/kg. Son pouvoir séchant est donc de $21 - 11,6 = 9,4$ g/kg.

Le chauffage de l'air a pour principal intérêt d'accroître son pouvoir séchant. On constate dans l'exemple précédent qu'une augmentation de température de 25°C a permis d'améliorer son pouvoir séchant de $9,4 - 2,4 = 7$ g/kg.

Ces différents abaques sont d'une utilisation très simple mais aujourd'hui leur emploi est de plus en plus rare car les professionnels du séchage trouvent facilement sur internet des logiciels de calcul. Ils sont cependant très utiles pour représenter les modifications de l'air dans un circuit aéraulique comme un séchoir et fournissent très rapidement de bons ordres de grandeur.

Principe du séchage

▀ Le séchage par entraînement à l'air chaud

Le séchage par air chaud est fondé sur l'échange de chaleur et d'humidité entre l'air et le produit à sécher. Le séchage par entraînement est le mode de séchage le plus utilisé pour les grains.

L'eau adsorbée, plus ou moins faiblement liée au grain, est éliminée par l'opération de séchage. L'eau libre, non adsorbée, est déjà en grande partie éliminée par le séchage naturel au moment de la récolte (voir chapitre 1, pages 18).

Au contact de l'air chaud, l'eau des couches périphériques du grain est évacuée sous l'effet du gradient d'humidité entre l'air et le grain. L'eau contenue au centre du grain migre vers les parties périphériques séchées en fonction du gradient de concentration. Au cours du séchage, cette diffusion de cellule à cellule est de plus en plus freinée par les cellules qui ont tendance à retenir leur eau. Les derniers pourcents (ou points) d'humidité sont donc beaucoup plus difficiles à retirer que les premiers.

L'échange d'eau entre l'air et le produit tend vers une limite qui est donnée par les courbes d'équilibre air-grain (voir chapitre 1, page 25).



▮ La quantité d'eau à enlever au cours du séchage

Soit une masse de grains que l'on souhaite sécher de l'humidité initiale H_i (%) à l'humidité finale H_f (%). La quantité d'eau (en kg) à enlever à 1 kg de grains humides est donnée par la formule :

$$E = (H_i - H_f) / (100 - H_f)$$

Quelle est, par exemple, la quantité d'eau à enlever à 500 kg de maïs à 33 % pour le sécher à 13 % ?

$$E = ((H_i - H_f) / (100 - H_f)) \times 500$$

Soit $E = ((33 - 13) / (100 - 13)) \times 500 = 115$ kg d'eau.

À l'issue du séchage le lot de grains ne pèse donc plus que 385 kg.

▮ Techniques de séchage des grains

Les techniques utilisées pour le séchage des grains sont de deux grands types : le séchage naturel et le séchage artificiel.

Le séchage naturel

Séchage naturel traditionnel

Le séchage naturel des grains ou des produits agricoles par exposition au soleil est une technique ancestrale encore largement utilisée dans de nombreux pays en développement.

Pour la plupart des céréales, on pratique un préséchage naturel, au champ, en laissant les produits sur pied plusieurs semaines après qu'ils aient atteint leur maturité. Cette technique a l'avantage d'être simple et peu coûteuse mais peut exposer la récolte à de nombreux risques : égrenage naturel, attaques de déprédateurs (insectes, oiseaux, rongeurs), dégâts par les animaux, vols, etc.

On récolte les céréales en épis et ce sont ces épis (maïs, mil...) (photo 3.1) ou gerbes (riz, sorgho, fonio...) qui sont séchés au champ, souvent sous la forme de meules, ou transportés au village pour être exposés au soleil sur des nattes ou sur les terrasses ou les toits des habitations (voir cahier couleur, photo 10).

Après égrenage ou battage, les grains, encore humides, sont étalés en couches minces sur le sol plus ou moins préparé (aire de séchage) ou sur des claies ou encore sur des nattes pour les lots de plus faible quantité.

Améliorations du séchage naturel

Quelques méthodes d'amélioration du séchage naturel ont été proposées par des projets de développement.

Aires de séchage

L'exposition des produits sur des surfaces planes est la technique la plus simple et la plus courante pour sécher des épis ou des grains. Dans les exploitations ou les villages, les aires de séchage sont souvent constituées de terre battue alors qu'elles sont généralement bétonnées dans les centres de stockage. La plateforme est construite un peu en surélévation par rapport au niveau du sol et légèrement en pente pour faciliter l'évacuation des eaux de pluie. Le produit à sécher, étalé en couche mince, est fréquemment remué à l'aide de râteaux pour améliorer le séchage et le rendre plus homogène (voir cahier couleur, photo 13). En fin de journée, les grains sont mis en sac pour être ainsi conservés durant la nuit puis, le matin suivant, à nouveau étalés sur l'aire afin de poursuivre le séchage (photo 3.2).

Bâches en plastique

Pour de faibles quantités de produits en gousses, en épis ou en grains, des bâches en plastique peuvent être utilisées comme des aires de séchage portatives (Hall, 1971). On choisit des bâches de couleur noire ou sombre de manière à ce qu'elles absorbent bien le rayonnement solaire. On préfère si possible des bâches avec œillets pour permettre le passage d'un cordon coulissant afin de refermer facilement la bâche en cas de pluie (figure 3.2).

Claies ou tables de séchage

L'amélioration majeure consiste à élever l'aire de séchage par rapport au sol, en utilisant des claies horizontales posées sur des supports métalliques ou en bois et recouvertes de tissus, nattes tressées ou bâches en plastique comme illustré en photo 3.3 (voir cahier couleur, photo 14).

Séchoir «autobus»

Des séchoirs dits «autobus», sont utilisés dans certains pays en développement pour le séchage des fèves de cacao. Ils sont constitués d'une structure rectangulaire qui abrite des claies superposées que l'on peut faire coulisser sur des rails pour les exposer au rayonnement solaire (figure 3.3). Dans les exploitations familiales, le séchoir autobus est construit en matériaux locaux. Par exemple en Afrique pour de



Photo 3.1.

Séchage d'épis de maïs déspathés en Chine (© Guy Trébuil, Cirad)



Photo 3.2.

Grande aire de séchage du riz paddy en Indonésie
(© Jean-François Cruz, Cirad).

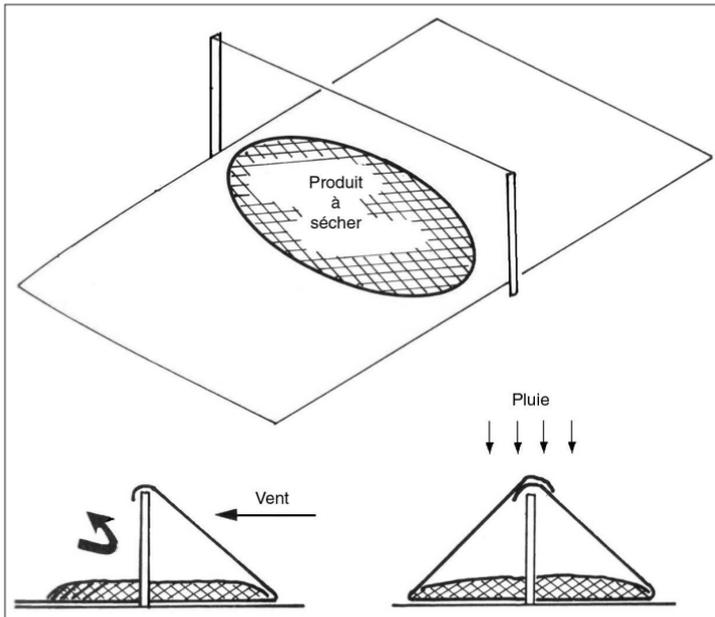


Figure 3.2.
Bâche en plastique pour le séchage de petits lots de grains
(d'après Cruz *et al.*, 1988).

petits séchoirs de 4 m × 3 m, la structure et les rails sont en bambou de raphia et la toiture et les claies en natte. La charge des claies est d'environ 10 kg/m². Pour des installations plus importantes, la structure peut être en parpaings avec une toiture en tôles et des rails en cornières métalliques.

Dans certaines grandes plantations de cacaoyer, le séchoir est constitué de claies fixes mais il est équipé d'un toit amovible, monté sur rails, qui permet de recouvrir les claies en cas d'intempérie.

Perroquets

Le perroquet est une structure très simple constituée de perches ou de rondins de bois assemblés de manière particulière pour pouvoir déposer ou accrocher les épis (maïs, mil...) ou les gerbes (riz, haricots...) afin de sécher naturellement les produits (figure 3.4). En France, cette technique traditionnelle est parfois encore pratiquée pour le séchage des haricots. À Madagascar, on utilise un piquet en bois sur lequel sont suspendus les épis de maïs reliés par leurs spathes (figure 3.5) ou les panicules de sorgho.



Photo 3.3.
Séchage solaire de fonio précuit sur table
(© Jean-François Cruz, Cirad).

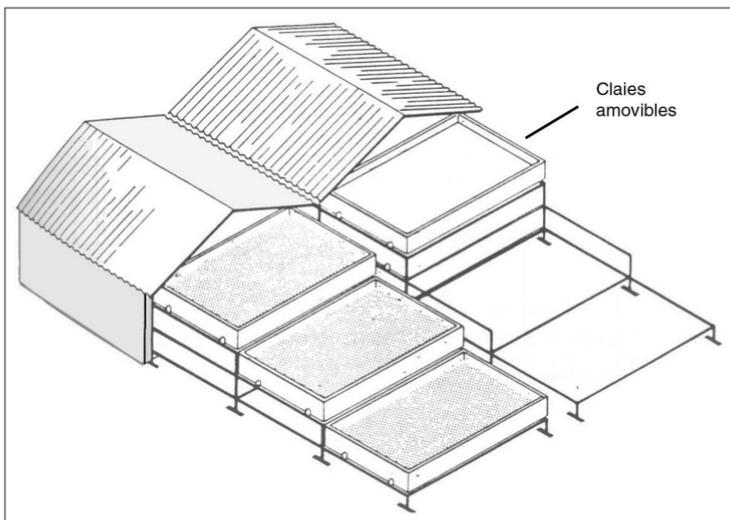


Figure 3.3.
Séchoir « autobus » (d'après Cruz *et al.*, 1988).

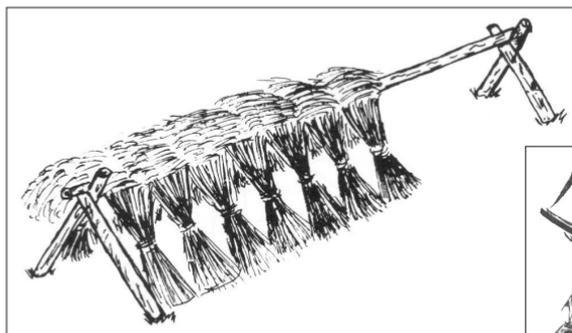


Figure 3.4.
Séchage de panicules de riz
sur perroquet
(Cruz *et al.*, 1988).

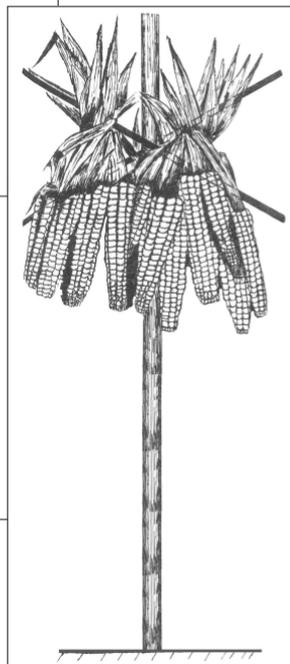


Figure 3.5.
Perroquet pour
le séchage d'épis
de maïs (d'après
Hubert, 1970).



Photo 3.4.
Hilera pour le séchage du haricot au Nicaragua (© Jean-François Cruz, Cirad).



Fils métalliques

En Amérique centrale, les petits producteurs ont parfois coutume de récolter les haricots en plante entière et de les faire sécher sur des fils de fer tendus au champ. Cette sorte de fil d'étendage est appelé *hilera* (photo 3.4).

Cribs

Les cribs sont des structures aérées utilisées dans de nombreux pays pour permettre un séchage lent des produits par ventilation naturelle. Ils sont principalement présents dans les zones humides pour le séchage du maïs en épis. Selon les régions, il existe de nombreux types de cribs traditionnels allant du simple panier en branchages au grenier plus sophistiqué comme les *horreos* du nord de l'Espagne construits en bois ou en matériau solide comme la brique ou la pierre (figure 3.6).

Pour améliorer le séchage du maïs dans de nombreuses zones tropicales, la FAO a longtemps préconisé la diffusion de cribs de forme rectangulaire construits autant que possible en matériaux locaux pour être plus facilement réalisables par les producteurs eux-mêmes. L'efficacité du crib comme structure de séchage dépend de plusieurs facteurs comme la largeur du crib qui reste le facteur le plus important et la forme sous laquelle sont stockés les épis. En effet, il faut retirer les spathes qui recouvrent les épis car elles empêchent l'aération correcte des grains et perturbent le séchage.

Dans les zones très humides où le maïs est récolté à 30-35 % d'humidité, la largeur des cribs ne devrait pas dépasser 60 cm. Dans les zones plus sèches, où le maïs est récolté à 25 % d'humidité, la largeur peut atteindre 1 m et même 1,2 à 1,5 m dans les zones très sèches. Le choix de la hauteur du crib est un compromis entre la capacité de stockage, la facilité de remplissage et le risque d'instabilité, notamment dans les régions très ventées. Plus le crib est étroit et plus sa hauteur sera réduite. Les hauteurs couramment utilisées sont de 1,5 à 2,5 m de stockage auxquelles on ajoute 80 cm à 1 m de hauteur de plancher du crib. Enfin un espace de quelques dizaines de centimètres est prévu entre le haut du tas d'épis et la couverture du crib. La hauteur totale d'un crib peut ainsi atteindre 2,5 à 4 m. Dans les zones tempérées comme en France, certains constructeurs proposent des cribs de plus de 5 m de hauteur utile mais ces équipements nécessitent alors des systèmes mécanisés de chargement et de vidange (tapis transporteurs...).

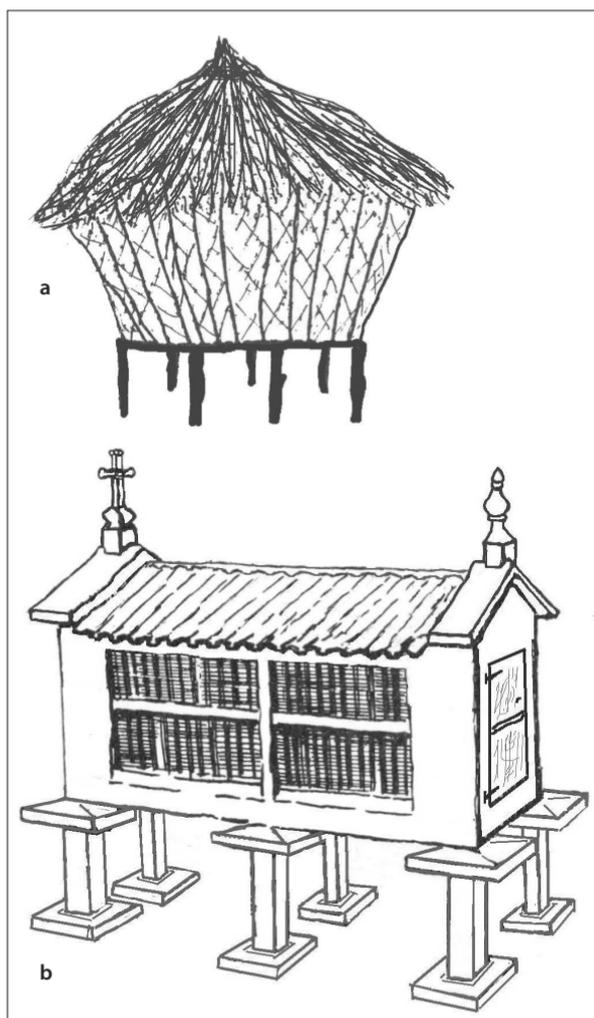


Figure 3.6.

Cribs traditionnels.

a. Crib Ago du sud Bénin. b. *Horreo* en Espagne.

Pour une zone climatique donnée, la largeur et la hauteur du crib sont des données relativement constantes et sa capacité est donc surtout fonction de sa longueur. Il est fréquent de considérer qu'un volume de 1 m³ de crib permet de stocker 500 kg d'épis de maïs déspathés à 30 % d'humidité, correspondant à environ 300 kg de grains secs à 13 % d'humidité.



Un crib de 60 cm de largeur dont la hauteur de produit stocké est de 2 m a une capacité de 1,2 m³ par mètre linéaire. Pour une longueur de 5 m, le crib peut ainsi contenir 3 tonnes d'épis humides soit environ 1,8 tonnes de grains secs.

Le tableau 3.1 donne la capacité de stockage par mètre linéaire de crib pour une hauteur utile de 2 m.

Tableau 3.1. Capacité de stockage d'un crib par mètre linéaire.

Largeur (m)	Volume (m ³)	Capacité en kg	
		Épis à 35%	Grains secs à 13%
0,60	1,2	600	360
0,80	1,6	800	480
1,00	2,0	1000	600

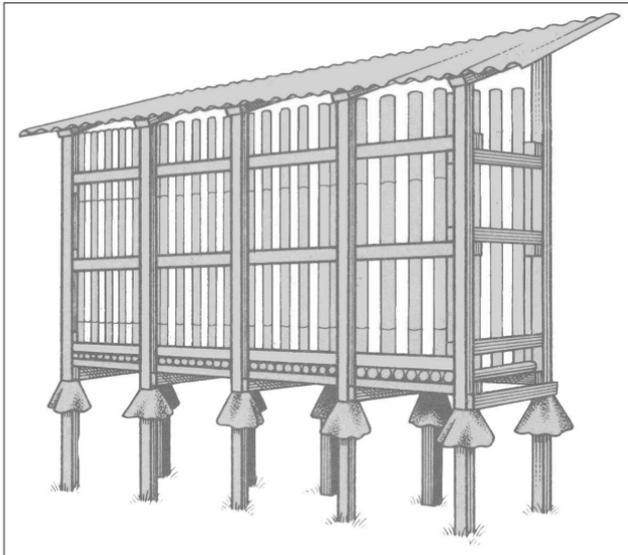


Figure 3.7.

Crib amélioré avec cônes anti-rat (d'après Cruz et Allal, 1986).

L'ossature du crib peut être constituée de rondins de bois ou de bambous. Les poteaux, espacés de 1 à 1,2 m, sont enfoncés dans le sol sur une hauteur d'au moins 50 cm. La partie souterraine des poteaux doit avoir été préalablement recouverte d'un enduit tel que le goudron ou une huile de vidange pour la protéger des termites et de l'humidité. Les parois ne nécessitent pas forcément l'emploi de grillage comme

dans les cribs modernes mais sont fabriquées en raphia, bambou fendu, baguettes de bois ou tout autre matériau local disponible. Il suffit simplement que la paroi soit en mesure de retenir les épis et qu'elle ne crée pas une résistance au passage de l'air supérieure à celle des épis eux-mêmes (figure 3.7).

Le plancher du crib doit être suffisamment résistant pour supporter la charge des épis et il doit être constitué d'éléments amovibles (planchettes, rondins de bois, bambous...) pour permettre de vidanger aisément le crib par le fond.

La couverture du crib peut être en tôle ou en matériaux locaux traditionnels (chaume, feuilles de bananiers) qui nécessitent cependant un entretien et une réfection totale du toit plus fréquents. La pente et le débordement de la couverture doivent être suffisants pour évacuer correctement les eaux de pluie sans risque de mouiller les parois. Les différents éléments du crib sont assemblés par des clous ou par des lianes. Les pieds des montants du crib doivent être recouverts de tôles ou équipés de cônes métalliques pour empêcher l'attaque des rongeurs (voir cahier couleur, photo 12).

Les cribs doivent être édifiés en zone de plein vent et quasi perpendiculairement aux vents dominants; ce qui nécessite parfois de les équiper de jambes de force (figure 3.8). Pour faciliter la circulation de l'air et favoriser le séchage, on doit toujours éviter de les édifier le long d'un mur ou à proximité d'arbres ou de haies brise-vents.

À condition d'être bien conçu et correctement situé, le crib à maïs reste un moyen simple et efficace pour sécher les épis de maïs. Dans les pays du Nord il a même connu un regain d'intérêt comme technique économe et écologique utilisant les énergies renouvelables et gratuites du vent et du soleil : frais de séchage réduits, non-utilisation de carburant fossile, valorisation possible des rafles...

Le crib présente néanmoins quelques inconvénients. Il nécessite en général un travail important pour le déspathage des épis, le remplissage et la vidange du crib. On peut aussi constater des pertes par égrenage ou des dégâts dus aux oiseaux ou aux rongeurs lorsqu'il n'est pas équipé de barrières anti-rats.

Enfin le risque majeur est sans doute celui dû aux moisissures (*Aspergillus*, *Penicillium*...) si le séchage n'est pas suffisamment rapide ou si le crib a été mal conçu (largeur excessive, mauvaise orientation par rapport aux vents dominants, longue période pluvieuse après la récolte...). La présence de moisissures peut entraîner la production de mycotoxines comme les aflatoxines (encadré 3.1.).

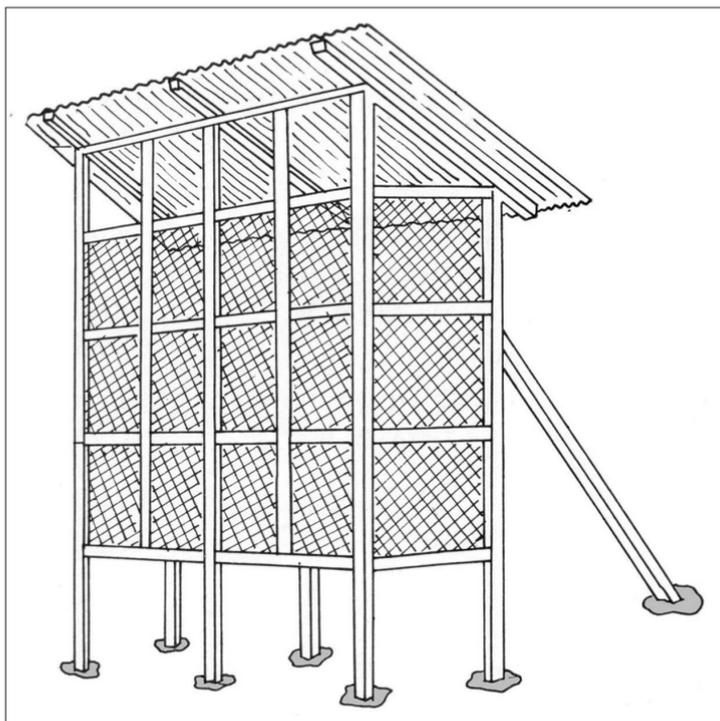


Figure 3.8.

Petit crib avec jambes de force (d'après Ceemat).

Le séchage artificiel

On parle de séchage artificiel lorsque l'on utilise un brûleur (au fioul, à gaz, à biomasse...) ou une résistance électrique pour réchauffer artificiellement l'air de séchage et que l'on se sert de moyens mécaniques (ventilateurs) pour insuffler cet air de séchage au travers des masses de grains humides. Ces techniques de séchage artificiel sont plus sophistiquées, plus onéreuses et plus exigeantes en énergie que les techniques de séchage naturel mais sont souvent nécessaires pour sécher des quantités importantes de grains (plusieurs tonnes) et obtenir des produits stables et commercialisables.

Les séchoirs statiques

Les séchoirs statiques sont généralement des séchoirs à cases où les grains sont séchés par lots successifs. Ces séchoirs horizontaux ont donc un fonctionnement discontinu. De conception simple et

facile à construire, ces séchoirs sont en métal, en bois, en briques ou en parpaings avec un fond horizontal ou incliné, en tôle perforée (figure 3.9 et voir cahier couleur, photo 15).

Les principaux investissements sont l'achat de la tôle perforée et surtout du générateur d'air chaud qui fonctionne le plus souvent au fioul.

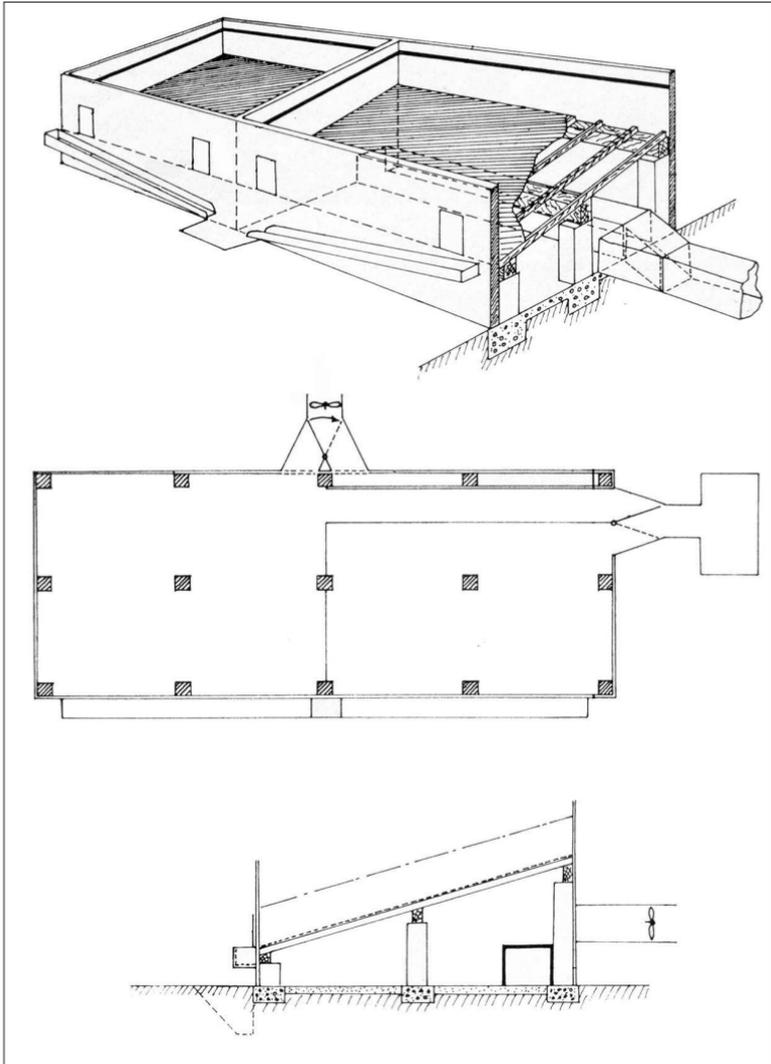


Figure 3.9.
Séchoir à deux cases inclinées (d'après Ceemat).



Ces séchoirs à case sont utilisés avec des températures d'air chaud de 40 à 50°C et des débits spécifiques d'environ 2000 m³/h/m³ de grains. Les capacités de ces séchoirs sont de 1 à 4 tonnes/jour avec des temps de séchage de 6 à 12h selon l'humidité initiale du produit. Pour diminuer l'hétérogénéité de séchage dans la masse de grains, il est souvent recommandé de limiter l'épaisseur de la couche de grains à un maximum de 50 cm. La consommation thermique spécifique de tels séchoirs est importante et peut atteindre 6300 à 8300 kJ/kg d'eau évaporée (soit 1750 à 2300 kWh/tonne d'eau évaporée). Certains constructeurs proposent des petits séchoirs statiques à fond plat constitués d'une seule cellule de séchage (figure 3.10).

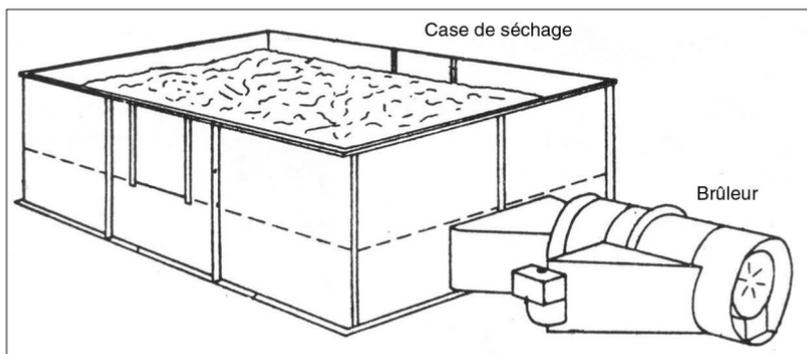


Figure 3.10.
Séchoir à case (d'après Ceemat).

Les séchoirs statiques avec brassage

Pour diminuer l'hétérogénéité de séchage, certains séchoirs statiques peuvent être équipés de systèmes de brassage des grains (figures 3.11 et 3.12).

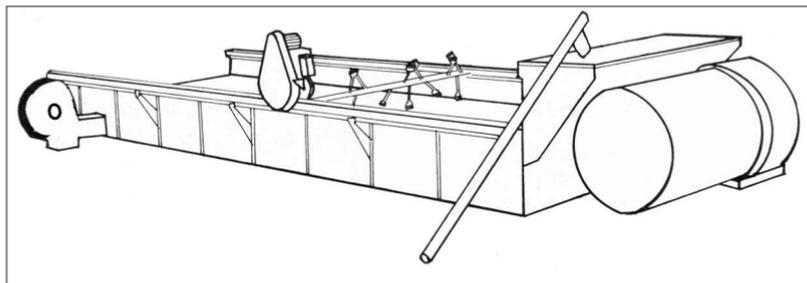


Figure 3.11.
Séchoir statique horizontal à palettes (d'après Ceemat).

Des constructeurs européens, au Royaume-Uni puis au Danemark, ont mis en application ce principe en concevant des bennes sécheuses utilisables au champ. Ces bennes qui peuvent être tractées ont un faux fond perforé et sont équipées d'un générateur d'air chaud, d'un ventilateur et d'un système de brassage des grains par vis verticales. Leur capacité est de 15 à 25 tonnes et le séchage des grains est de 4 à 5 points/h (% d'humidité par heure) (encadré 3.2).

Des séchoirs circulaires fonctionnent sur le même principe que les cases de séchage mais sont équipés de vis radiales qui facilitent les opérations de remplissage (répartition uniforme de la couche de grains), de brassage et de vidange des grains (figure 3.12).

Les séchoirs à recirculation

Comme dans le séchoir statique, le séchage est réalisé par lots successifs. La masse de grains humides est introduite dans le séchoir et

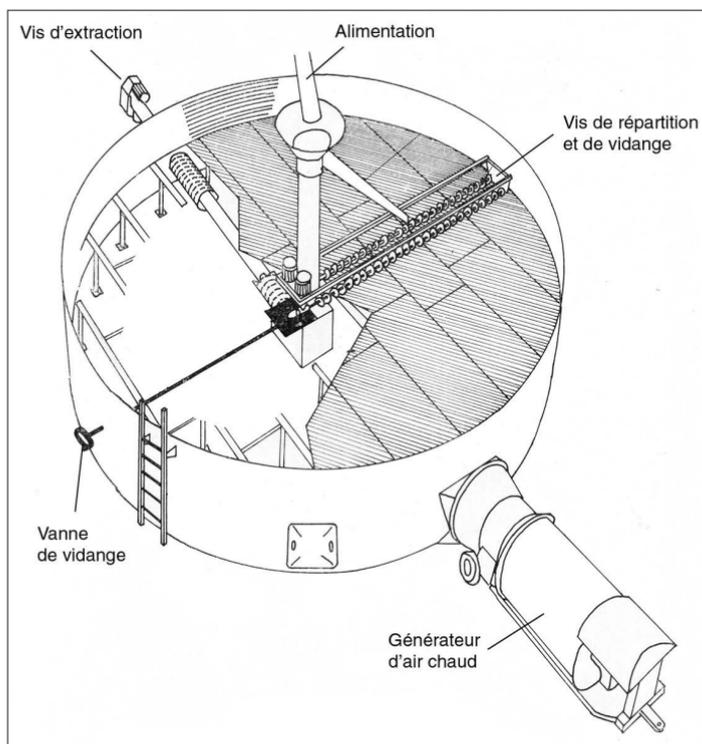


Figure 3.12. Séchoir circulaire statique avec système de brassage (d'après Ceemat).



recyclée en permanence jusqu'à atteindre le niveau de siccité souhaité. Ces séchoirs sont généralement mobiles de forme cylindrique avec des parois en tôle perforée et une chambre centrale par laquelle est insufflé l'air chaud (figure 3.13). L'air, mis en pression dans la chambre centrale, est évacué vers l'extérieur en traversant ainsi la masse des grains. L'axe de l'ensemble est constitué d'une tubulure équipée d'une vis sans fin de gros diamètre qui réalise le brassage des grains de bas en haut. Ce système favorise l'homogénéisation du séchage et permet la vidange des grains en fin de cycle. Il peut néanmoins engendrer un taux de casse de quelques pourcents.

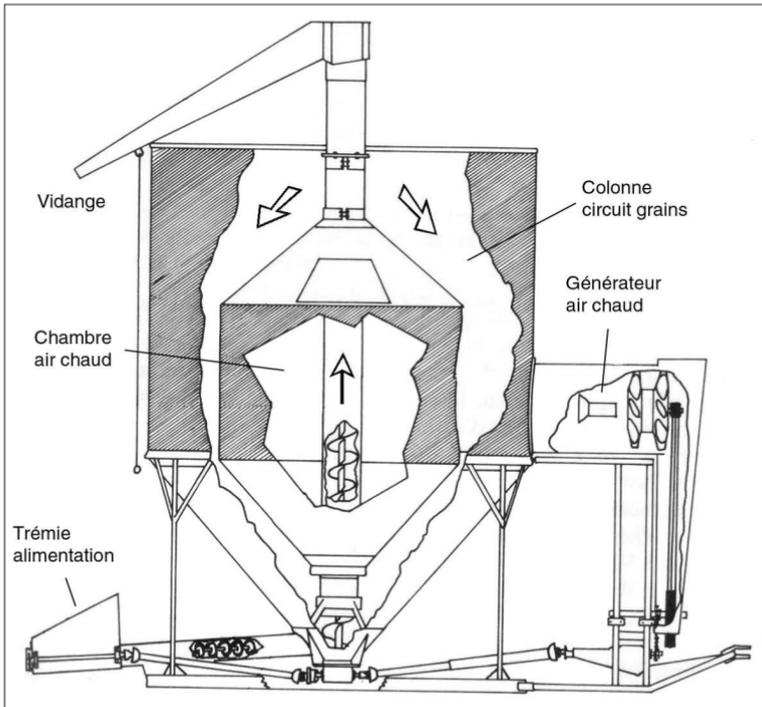


Figure 3.13.

Séchoir mobile à recirculation (d'après Cruz *et al.*, 1988).

Selon les constructeurs, ces séchoirs permettent de sécher de 10 à 100 tonnes de maïs par jour (de 27 % à 13 % d'humidité) ou de 5 à 50 tonnes de riz paddy (de 21 % à 13 %) pour des cycles de 4 à 7 heures. Leur consommation thermique spécifique est donnée pour environ 4000 à 5000 kJ/kg d'eau évaporée (soit de l'ordre de 1100 à 1400 kWh/tonne d'eau évaporée).

La cellule sécheuse

C'est une technique parfois utilisée en Amérique du Nord où le séchage *In Bin Drying* (figure 3.14) est réalisé dans une cellule de stockage spécialement équipée d'un faux fond perforé et d'un système de ventilation avec générateur d'air chaud (Sauer, 1992). Il s'agit là d'un séchage statique en couches épaisses avec un air réchauffé jusqu'à 50°C à 60°C voire 70°C pour du maïs à une humidité initiale inférieure à 30%.

Le ventilateur est mis en marche et une première couche d'environ 80 cm d'épaisseur de grains humides est versée dans la cellule pour la mise en route du système de brassage. Puis la cellule est intégralement remplie et le brûleur est allumé. À l'issue du séchage, le brûleur est arrêté alors que le ventilateur et le système de brassage continuent de fonctionner pour permettre le refroidissement des grains secs. Lorsque les grains sont secs puis refroidis, on peut alors vider la cellule intégralement au moyen d'une vis racleuse qui équipe le fond de la cellule. Un nouveau cycle de séchage est alors effectué. En fin de séchage, cette cellule sécheuse peut également être utilisée comme simple cellule de stockage.

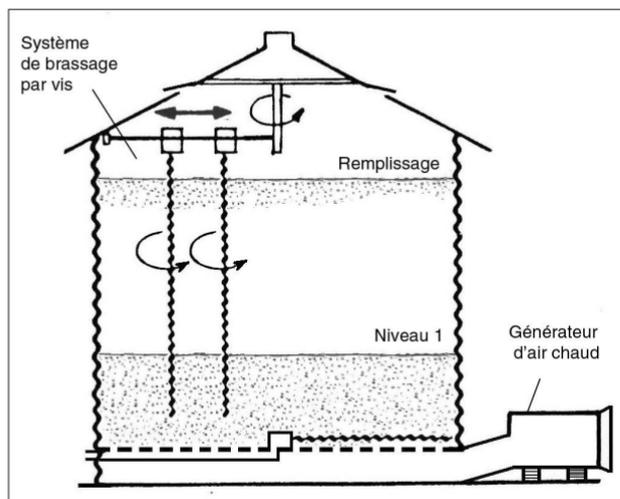


Figure 3.14.
Cellule de séchage
In Bin Drying.

Cas particulier du séchage haut ou Top Dry®

Ce mode de séchage est réalisé dans un silo séchoir : une couche d'environ 50 cm de grains humides est séchée dans un faux plafond, à la partie supérieure de la cellule. Le générateur d'air chaud est placé à la partie supérieure de la cellule alors que le système de ventilation reste comme précédemment placé en partie inférieure. La température



de l'air va de 50 à 80°C. Une fois séché, le lot de grains est vidangé dans la cellule et un nouveau lot de grains humides est chargé à la partie supérieure.

Les séchoirs continus

Les séchoirs à colonne

Les séchoirs continus sont les séchoirs les plus utilisés par les organismes stockeurs ou les grands producteurs de grains dans de nombreux pays (voir cahier couleur, photo 16). Dans ces séchoirs verticaux (figure 3.15),

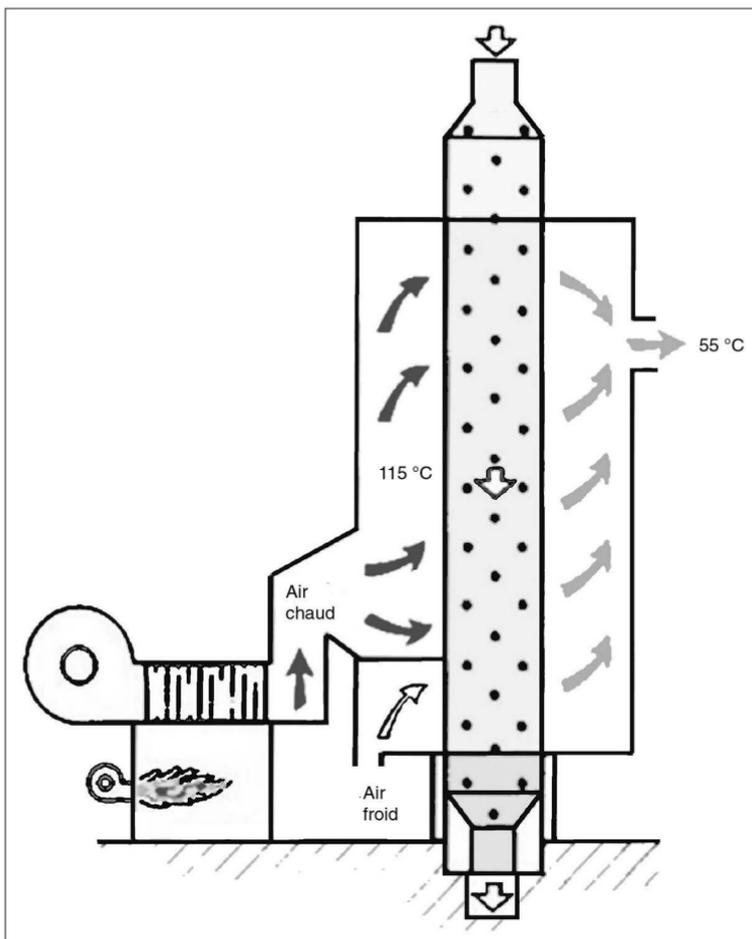


Figure 3.15.

Schéma d'un séchoir continu conventionnel (d'après ITCF, 1986).

la masse de grains humides est introduite par la partie supérieure du séchoir puis descend progressivement dans le séchoir où elle est traversée par un courant d'air chaud. Cette lente progression par gravité dans le corps du séchoir est due à l'évacuation en continu des grains par la partie inférieure. Après avoir été séchée et avant d'être évacuée vers les cellules de stockage, la masse de grains est traversée par de l'air froid pour ramener les grains à la température ambiante (figure 3.15).

Dans la plupart des séchoirs, la colonne de séchage est constituée de séries de dièdres permettant l'arrivée de l'air chaud et l'évacuation de l'air usé après qu'il ait traversé les grains. Les dièdres ou canaux d'air chaud et d'air usé sont des gaines en tôle, en forme de V renversé et disposées habituellement en quinconce (figure 3.16). La couche de grains entre ces dièdres n'est que d'une vingtaine de centimètres.

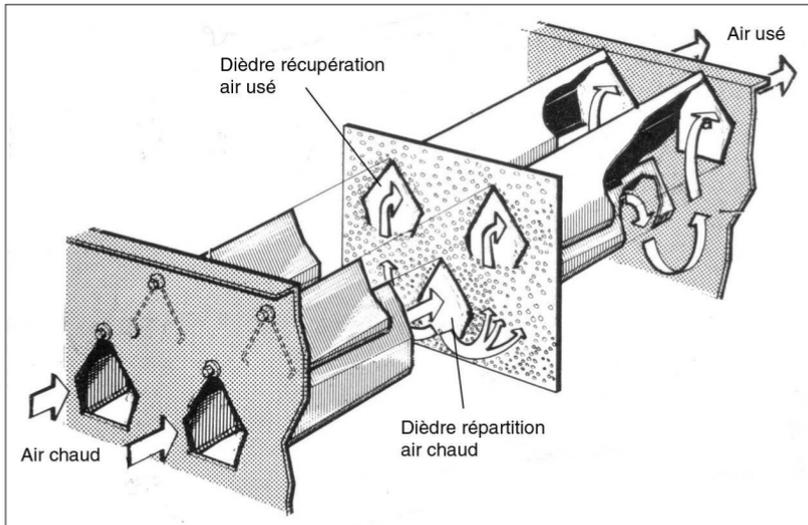


Figure 3.16.

Schéma du circuit de l'air dans un séchoir à dièdres (d'après Law).

Les températures de l'air de séchage sont variables selon le type de produits à sécher. Pour le maïs, l'air chaud est généralement à 110 ou à 120°C pour des grains dont l'humidité est supérieure à 35 % ; pour les protéagineux la température est limitée à 90°C, pour le sorgho à 65°C, pour le tournesol à 60°C, pour le riz paddy à 45°C afin de diminuer les risques de clivage des grains et de brisures. Pour les semences ou les céréales brassicoles on limite la température de séchage à 40°C pour ne pas altérer leur faculté germinative.



Les débits spécifiques des séchoirs continus étaient relativement élevés dans les années 1980-1990 et pouvaient atteindre 2500 à $3000\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ de grains voire plus de $6000\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ en Amérique du Nord pour accroître la vitesse de séchage. Aujourd'hui, les débits spécifiques sont plus raisonnables et voisins de $2000\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ de grains pour améliorer le rendement calorifique des séchoirs. La consommation thermique spécifique de tels séchoirs est moindre que pour les séchoirs statiques et atteint 4000 à $5000\text{kJ}/\text{kg}$ d'eau évaporée (soit environ 1100 à $1400\text{kWh}/\text{tonne}$ d'eau évaporée).

Les séchoirs à double colonne

Dans les années 1970-1980, des constructeurs ont proposé des séchoirs continus mobiles afin de mieux répondre aux besoins des producteurs et des entreprises de travaux agricoles qui souhaitent amortir leur équipement de séchage en le faisant fonctionner sur une plus grande durée. Les séchoirs comprennent une chambre centrale de mise en pression de l'air chaud entourée de deux colonnes de grains. Le séchoir est alimenté à la partie supérieure et les grains descendent par gravité au fur et à mesure de l'extraction des grains secs comme le montre la figure 3.17. Les grains sont refroidis en partie inférieure du séchoir.

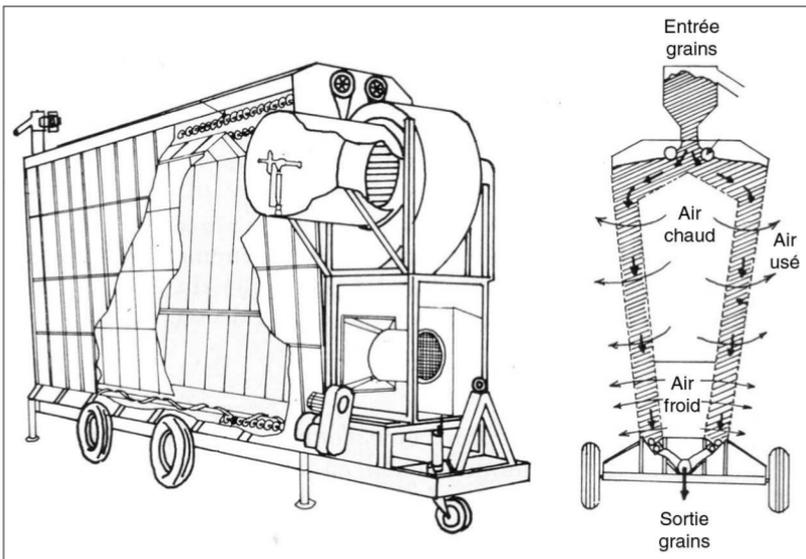


Figure 3.17.

Séchoir continu mobile à deux colonnes (d'après Ceemat).

Le séchoir à tablier transporteur

Ce matériel est proposé depuis de nombreuses années par un constructeur anglais (Alvan Blanch) pour le séchage de divers produits agricoles (céréales, cacao, café...). Les grains humides tombent sur un premier plan incliné ajouré où ils sont entraînés par un tablier transporteur continu constitué de deux chaînes latérales reliées par des barrettes transversales (figure 3.18). En bout de séchoir, ils tombent

Encadré 3.2. Capacité évaporatoire d'un séchoir

Les constructeurs de séchoirs ont l'habitude d'exprimer la capacité ou puissance évaporatoire de leurs séchoirs en quintaux humides \times points/heure. Puis, par abus de langage, en «points/heure» ou encore en «points». Le point correspond à 1% d'humidité d'un quintal (0,1 tonne) de produit humide ramené à 15%. Il correspond à l'évaporation de 1,176 kg d'eau par quintal humide, souvent arrondis à 1,2kg d'eau par quintal. Dans les pays du Sud où les céréales doivent être séchées jusqu'à 13%, la valeur du point est de 1,15kg d'eau par quintal.

Cette caractéristique est fixée par le constructeur de séchoir pour un produit donné et pour des humidités initiales et finales données. Très souvent elle correspond au séchage du maïs de 35% à 15%. Cette notion très simple permet alors d'avoir une rapide idée du débit du séchoir.

Exemple :

Un séchoir a une capacité de 1000 points pour sécher du maïs de 33% à 13%. Le séchage de 33% à 13% correspond à 20 «points» d'humidité. Le débit du séchoir est donc de :

$$1000/20 = 50 \text{ quintaux/h soit } 5 \text{ t/h}$$

Si le maïs est séché de 29% à 13%, le débit de ce même séchoir est de :

$$1000/16 = 62,5 \text{ quintaux/h soit } 6,25 \text{ t/h}$$

Pour d'autres céréales comme par exemple le sorgho séché de 18% à 13%, ce même séchoir aura souvent une capacité réduite de 60% donc égale à environ 600 points et un débit de :

$$600/5 = 120 \text{ quintaux/h soit } 12 \text{ t/h}$$

Pour connaître le débit en produit sec à partir du débit en produit humide on utilise la formule :

$$Q_s = Q_h \times ((100 - H_i)/(100 - H_f))$$

Pour le maïs séché de 33% à 13% :

$$Q_s = 5 \times ((100 - 33)/(100 - 13)) = 3,85 \text{ t/h de maïs sec}$$

Pour le sorgho séché de 18% à 13% :

$$Q_s = 12 \times ((100 - 18)/(100 - 13)) = 11,3 \text{ t/h de sorgho sec}$$

Q_s = débit en produit sec. Q_h = débit en produit humide. H_i = humidité initiale.
 H_f = humidité finale.



sur un second plan incliné perforé où ils sont entraînés par le même tablier transporteur et où sont effectués la finition de séchage et le refroidissement avant la vidange.

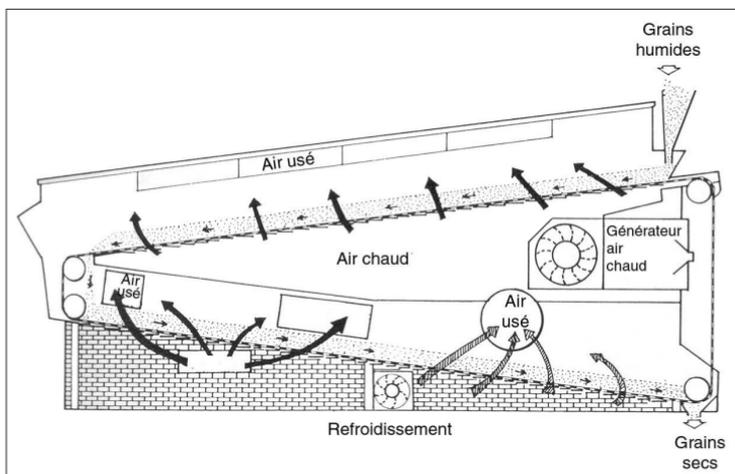


Figure 3.18.

Séchoir continu à tablier transporteur (d'après Cruz *et al.*, 1988).

Cas particulier : les séchoirs à lit fluidisé

Le séchage par lit fluidisé, technique habituellement utilisée pour le séchage de produits pulvérulents, est proposé depuis plusieurs années en Asie pour le séchage du riz paddy ou du riz étuvé. Il consiste à placer les grains dans un courant d'air ascendant qui crée une agitation désordonnée (lit fluidisé agité) de la masse de grains et qui, en augmentant la surface de contact air grain, facilite le transfert thermique et le séchage. Pour le riz paddy, on utilise habituellement des températures d'air chaud de 50 à 110°C avec des durées de contact de 2 à 3 minutes pour abaisser l'humidité du produit jusqu'à 13 à 14% en plusieurs étapes entrecoupées de temps de ressuyage de 30 à 40 minutes. La capacité des séchoirs varie habituellement de 5 à 20t/h. Il faut beaucoup d'énergie pour fluidiser le paddy et le rendement calorifique s'en trouve affecté par rapport au séchage classique (Trim et Robinson, 1995).

▮ Les économies d'énergie au niveau du séchage

Afin de diminuer la consommation énergétique des séchoirs, les conceptions ou les modes d'utilisation des séchoirs continus ont été améliorés au cours des dernières décennies.

Les séchoirs économiseurs

Dans les séchoirs continus classiques, l'air usé sortant n'est pas parfaitement saturé et dispose encore d'un pouvoir séchant.

Les séchoirs économiseurs sont constitués de deux étages superposés. L'air usé qui sort de l'étage inférieur est réchauffé à haute température (110 à 130°C pour du maïs courant) par un second brûleur et permet de sécher l'étage supérieur où les grains arrivent plus humides (figure 3.19).

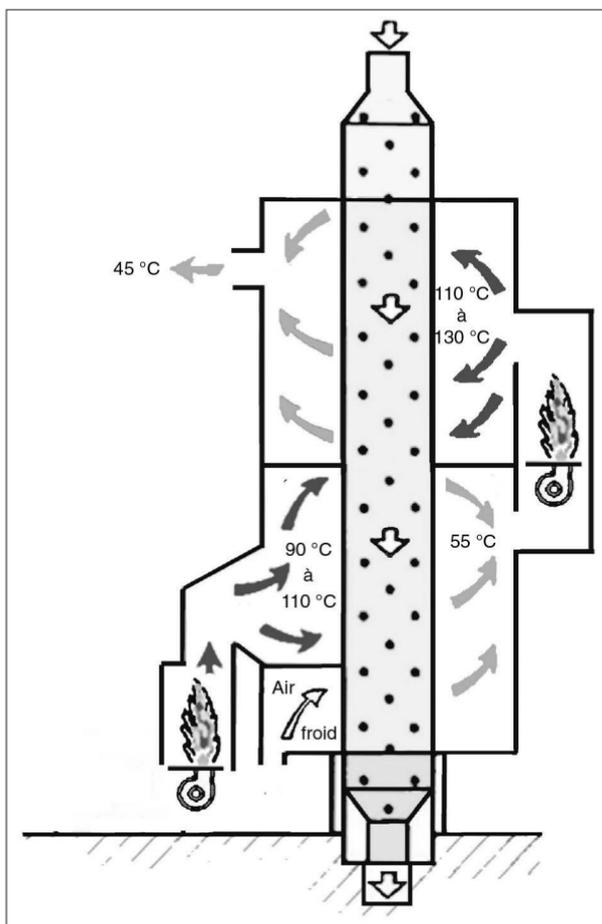


Figure 3.19.
Schéma d'un séchoir continu économiseur
(d'après Arvalis, 2003).



Ce recyclage intégral de l'air usé inférieur combiné à de plus hautes températures d'attaque au niveau supérieur permet d'abaisser la consommation thermique spécifique à 3500 kJ/kg d'eau évaporée (soit environ 970 kWh/t d'eau évaporée).

Certains constructeurs proposent un seul brûleur qui fournit un air très chaud dilué avec l'air extérieur pour le module inférieur et avec l'air usé pour le module supérieur.

Le refroidissement lent différé ou «dryération»

Cette technique est le plus souvent utilisée pour le maïs dont le séchage est très énergivore. Elle a pour principe d'utiliser la chaleur sensible du grain en sortie du séchoir pour éliminer quelques points d'humidité du grain afin d'atteindre l'humidité de sauvegarde. Dans le séchoir, les grains sont séchés jusqu'à une humidité de 16 à 17 % puis ils sont transportés dans une cellule annexe pour reposer pendant quelques heures et permettre à l'eau contenue dans le grain de s'équilibrer en migrant de l'amande plus humide vers les couches périphériques plus sèches. Après ce ressuyage, nécessaire pour éviter le phénomène de clivage, les grains sont ventilés avec de l'air ambiant froid à un débit spécifique d'environ 50 m³/h/m³ de grains. Cette technique permet d'éliminer quelques points pour atteindre l'humidité de sauvegarde de 13 à 14 %. Les grains secs et froids sont ensuite transportés dans les cellules de stockage (figure 3.20).

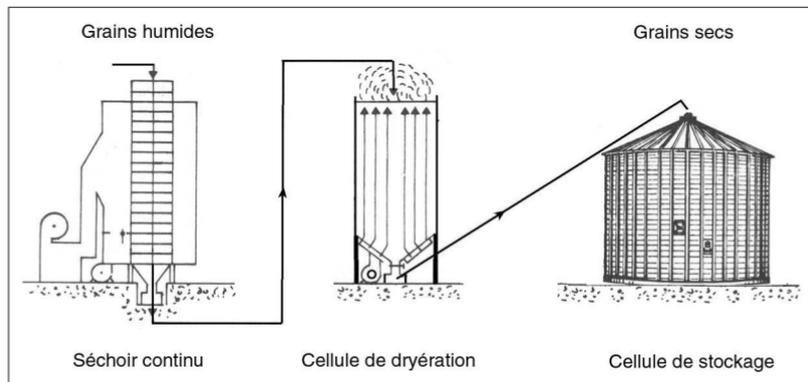


Figure 3.20.

Schéma de principe de la «dryération».

Dans le principe de la dryération, la section habituellement réservée au refroidissement dans le séchoir continu peut être utilisée pour le séchage. Finalement, le séchage est moins poussé (que dans le séchoir

continu) puisque les grains sortent du séchoir à une humidité plus élevée. Cela conduit à une augmentation du débit du séchoir d'environ 30 % et à des économies d'énergie de 10 à 20 %. Lorsque la dryération est bien conduite, elle permet d'améliorer la qualité des grains notamment en termes de brisures.

Utilisation de la biomasse comme agro-combustible

Les sous-produits ou coproduits cellulosiques renferment une énergie calorifique importante qui est susceptible d'être utilisée pour réchauffer l'air de séchage. En première approximation, leur pouvoir calorifique est estimé à 15 000 kJ/kg (4 kWh/kg). On a coutume de dire que 3 kg de coproduit de type paille équivaut à 1 kg de fioul.

Pouvoir calorifique des combustibles

C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de masse de combustible (1 kg) ou de volume (m³) dans des conditions standardisées. Dans le cas courant, on exprime souvent le pouvoir calorifique inférieur (PCI) des combustibles qui est la quantité de chaleur fournie par combustion complète. Le tableau 3.2 donne, à titre indicatif, le PCI des combustibles usuels et de quelques coproduits d'origine agricole.

Tableau 3.2. Caractéristiques de coproduits d'origine agricole comparées aux combustibles usuels.

Combustible	Poids spécifique (kg/m ³)	Pouvoir calorifique inférieur		
		(kJ/kg)	(kWh/kg)	(kJ/l ou kJ/m ³)
Fioul domestique	830 à 880	42 500	11,8	36 000 kJ/l
Fioul lourd (2 % S)	950 à 1 050	39 600	11,0	40 000 kJ/l
Propane	1,9	46 000	12,8	87 000 kJ/m ³
Butane	2,4	45 600	12,6	110 000 kJ/m ³
Anthracite	1 000 – 1 500	32 400	9	-
Bois sec (20 %)	500 – 800	1 000	5	-
Rafles de maïs	200	16 200	4	-
Paille	160	14 500	4	-
Tiges de coton	-	17 200	4,8	-
Coques d'arachides	250	17 600	4,9	-
Coques de café	400	16 000	4,5	-
Balles de riz	110	14 300	4	-
Bagasse sèche	-	17 600	4,9	-



Tableau 3.2. Caractéristiques de coproduits d'origine agricole comparées aux combustibles usuels (suite).

Combustible	Poids spécifique (kg/m ³)	Pouvoir calorifique inférieur		
		(kJ/kg)	(kWh/kg)	(kJ/l ou kJ/m ³)
Coques de coco	-	21 600	6	-
Bourre de coco	-	14 000	3,9	-
Gaz pauvre (gazogène)	1,03	-	-	5 200 kJ/m ³
Gaz de fumier 70 % CH ₄ , 30 % CO ₂	0,66	-	-	23 200 kJ/m ³
Gaz de fumier lavé 100 % CH ₄	0,67	-	-	33 100 kJ/m ³

Encadré 3.3. Exemple de calcul pour déterminer la puissance d'un séchoir

Soit à sécher 100t de maïs par jour d'une humidité initiale de 25 % à une humidité finale de 13 % avec un séchoir continu fonctionnant 24 h sur 24 h.

Quantité d'eau à évaporer

La quantité d'eau à enlever à 1 kg de maïs pour le sécher de 25 % à 13 % est donnée par la formule :

$$E = (H_i - H_f) / (100 - H_f)$$

H_i = humidité initiale

H_f = humidité finale

Soit :

$$E = (25 - 13) / (100 - 13) = 0,138 \text{ kg soit } 138 \text{ kg/t de maïs humide}$$

Donc $138 \times 100 = 13800 \text{ kg d'eau par jour pour } 100 \text{ t}$

Ou encore si le séchoir travaille en continu 24 h sur 24 h :

$$13800 \text{ kg}/24 \text{ h} = 575 \text{ kg d'eau/h}$$

Le séchoir continu retenu aura donc un débit de :

$$575 / 138 = 4,2 \text{ t/h de maïs humide}$$

Puissance calorifique horaire

Compte tenu d'un rendement évaporatoire pour un séchoir continu de 5000 kJ/kg d'eau évaporée (ou encore 1390 kWh d'eau évaporée), la puissance calorifique nécessaire est de :

$$575 \times 5000 = 2875000 \text{ kJ/h (ou environ } 800 \text{ kW/h)}$$

Encadré 3.3. Exemple de calcul pour déterminer la puissance d'un séchoir (suite)

Consommation de combustible

Si on utilise du fioul domestique (tableau 3.2), la consommation horaire sera de :

$2875\ 000/42\ 500$ soit environ = 68 kg/h ou 801/h

Quantité de produit sec obtenu

Après séchage, les 100 tonnes de maïs à 25 % ne représentent plus que :

$M_s = M_h \times ((100 - H_i)/(100 - H_f)) = 100 \times ((100 - 25)/(100 - 13))$
= 86,2t maïs à 13 % d'humidité.



4. La conservation des grains au niveau paysan

Dans la plupart des pays du Sud, la récolte est généralement conservée au village ou dans les exploitations où vivent les fermiers pendant les périodes de production. Les petits producteurs ne cèdent qu'une faible partie de leur récolte pour couvrir des dépenses courantes et conservent la majeure partie des grains pour la consommation familiale annuelle et pour les semences. Dans quelques régions à hauts risques climatiques qui connaissent des sécheresses répétées comme au Sahel, certaines populations de cultivateurs avaient pour tradition de constituer des stocks à moyen ou long terme.

Stockage villageois

Le stockage fermier ou villageois est caractérisé par :

- des quantités unitaires de céréales relativement faibles qui varient de quelques centaines de kilos à 1 ou 2 tonnes et atteignent rarement 5 tonnes;
- des produits qui sont laissés au champ après maturité, durant une période plus ou moins longue afin qu'ils sèchent sur pied. Les paysans veillent à ce que cette période ne soit pas trop prolongée pour éviter des pertes par égrenage naturel ou par attaques de déprédateurs (oiseaux, insectes, rongeurs);
- des produits récoltés manuellement, qui sont le plus souvent stockés en épis, notamment durant les premiers mois du stockage afin de faciliter le séchage. Ils sont ensuite égrenés au fur et à mesure des besoins de consommation ou de commercialisation;
- un tri des produits afin de ne conserver que les bons épis pour le stockage. Certains très beaux épis sont mis de côté pour la semence et les épis défectueux peuvent être égrenés et consommés rapidement par les hommes ou les animaux d'élevage;
- un stockage de durée limitée à court et à moyen terme pour couvrir les besoins familiaux (autoconsommation alimentaire) tout au long de l'année et jusqu'à la prochaine récolte;
- des structures de stockage construites en matériaux locaux et spécifiques des populations ou des groupes de populations agricoles qui les ont conservées au cours du temps (voir cahier couleur, photos 22 et 23). Elles sont typiques et font partie du patrimoine architectural agricole des diverses régions de la planète.

Greniers traditionnels

Depuis les temps anciens, on distingue deux grands types de structures pour la conservation des céréales : les silos qui sont des fosses creusées dans le sol, certainement la méthode de stockage la plus ancienne (déjà pratiquée au Néolithique), et les greniers qui sont des constructions hors sol spécialement destinées au stockage des produits agricoles et plus particulièrement des grains. Le stockage en fosses est devenu rare aujourd'hui, même s'il est encore utilisé par endroits pour le stockage des céréales comme l'orge et le blé dans les *matmoras* d'Afrique du Nord, le sorgho en Afrique de l'Est, le riz à Madagascar ou l'éleusine en Inde.

Les greniers constituent aujourd'hui le principal mode de stockage des céréales dans les zones rurales. Selon le matériau de construction, matière végétale ou terre crue stabilisée (banco, bauge, pisé..), on distingue deux types de greniers.

▮ Les greniers aérés

Les greniers aérés en matière végétale

Les greniers aérés sont typiques des régions humides, même si on les rencontre également dans les zones sèches comme les régions soudano-sahéliennes. Ils sont généralement constitués de fibres végétales entrelacées et tressées en une sorte de grand panier de 1 à 3 m de diamètre. Le corps du grenier de forme généralement cylindrique est souvent ceinturé par plusieurs cordages pour renforcer la structure (photo 4.1). Afin de l'isoler du sol, le grenier est posé sur une plateforme en rondins de bois construite à plusieurs dizaines de centimètres du sol et pouvant même atteindre 1 à 1,5 m pour certains petits greniers comme le grenier *kedelin* au Togo (photo 4.2). L'ensemble est recouvert d'un toit de paille pour le protéger des pluies.

Par la nature plus ou moins ajourée de leur paroi, ces greniers sont naturellement réservés au stockage de céréales en épis ou en panicules. Aérés, ils servent à finir le séchage au cours des premières semaines de stockage (Cruz *et al.*, 1988).

Le volume des greniers classiquement utilisés peut varier de façon importante de 1 à 15 m³ ; ce qui correspond globalement à des capacités d'une centaine de kilos à plus de 3 tonnes de mil ou de sorgho. Les plus courants ont des capacités de stockage allant de 500 kg à 2 tonnes de grains (voir cahier couleur, photo 20).



Photo 4.1.
Greniers en fibres végétales au Burkina Faso (© Thierry Ferré, Cirad).



Photo 4.2.
Grenier *kedelin* au Togo (© Francis Troude, Cirad).

La durée de vie des greniers en paille tressée est relativement limitée et excède rarement 5 ans, même s'ils sont élaborés avec soin et entretenus chaque année.

Certains greniers aérés sont de forme quadrangulaire. Il s'agit en fait de cribs traditionnels qui sont davantage des structures de séchage que des structures de stockage (voir chapitre 3). D'autres ont une forme spécifique comme le *katchalla* du nord Togo (figure 4.1). Il s'agit d'une structure aérée qui a l'allure d'un cône renversé reposant sur une pierre centrale pour éviter les remontées d'humidité et soutenu par des poteaux. La structure est constituée de rondins de bois reliés par des branches entrelacées qui composent une paroi aérée. L'ensemble est recouvert d'un toit de chaume.



Figure 4.1.
Grenier *katchalla*.

Cas particulier des structures sans paroi

Certains modes de stockage d'épis sont sans parois. C'est le cas des meules pour le riz ou le fonio ou encore de l'*ebliva* pour le maïs. Ces structures sont souvent considérées comme des structures de séchage édifiées dès la récolte au champ ou près des villages. Mais ce sont aussi des structures de stockage qui permettent surtout de différer l'opération de battage et d'alléger ainsi la charge de travail des producteurs très intense en période de récolte.



Les meules

Les gerbes de fonio récoltées en fin d'hivernage sont généralement stockées en meules cylindriques près des habitations ou directement au champ. Ces meules sont érigées sur des plateformes en rondins de bois surélevées d'une cinquantaine de centimètres du sol pour favoriser l'aération et faciliter le séchage naturel au soleil (figure 4.2). Les meules sont édifiées en empilant les gerbes en cercles concentriques sur 1,5 à 2 m de hauteur, les épis dirigés vers l'intérieur de la meule pour éviter l'attaque des oiseaux. Une meule peut contenir jusqu'à un millier de gerbes correspondant à plus de 300 kg de grains (Cruz *et al.*, 2011).

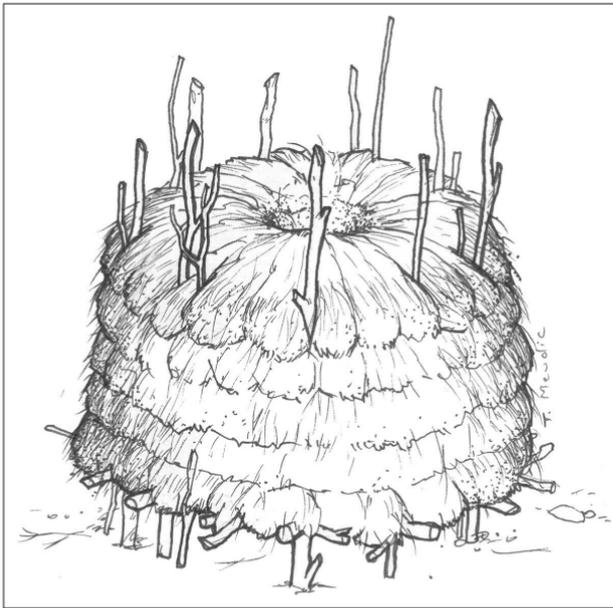


Figure 4.2.
Meule de gerbes
de fonio
(© Tristan Meudic).

Pour le riz, les meules de taille relativement modeste sont parfois édifiées sur une plateforme de rondins de bois (voir cahier couleur, photo 17) ou protégées par une toiture végétale comme le *paillol* en Amazonie brésilienne (voir cahier couleur, photo 18).

Des meules de grande dimension sont traditionnellement réalisées dans certaines plaines rizicoles comme dans la région du lac Alaotra à Madagascar (photo 4.3). Après la coupe à la faucille, les panicules de riz sont mises à sécher puis regroupées en gerbes pour édifier des meules sur une partie haute de la rizière. Les gerbes sont ainsi

stockées au champ avant l'opération de battage, dépiquage aux bœufs ou au tracteur, qui se déroule au moins un mois après la récolte, lorsque la rizière a été bien asséchée.



Photo 4.3.

Meule de paddy dans une rizière à Madagascar (© Éric Penot, Cirad).

Le grenier ebliva

Le grenier *ebliva* sans paroi est très fréquent dans les zones méridionales du Bénin ou du Togo. Au Ghana il est appelé *ewe barn*. Il s'agit d'un grenier de forme cylindrique constitué en périphérie d'une rangée d'épis de maïs en spathes correctement empilés et maintenus par un cerclage de fibres à différentes hauteurs (figure 4.3 et photo 4.4). Le grenier est édifié sur une plateforme à environ 50 cm du sol et constitué de rondins de bois reposant sur de nombreux pieux. À l'intérieur de la structure, les épis de maïs sont stockés en vrac. L'ensemble est recouvert d'un toit de paille conique. La taille des greniers est variable en fonction de l'importance de la récolte mais en général les diamètres varient de 2 à 3 m et la hauteur d'épis de 1,20 à 1,50 m. Certains greniers peuvent avoir plus de 6 m de diamètre (voir cahier couleur, photo 19).

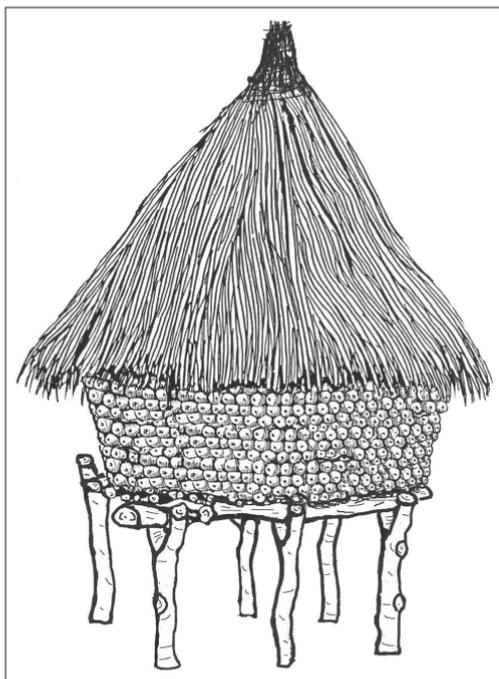


Figure 4.3.
Grenier *ebliva*.



Photo 4.4.
Paroi de l'*ebliva* (© Francis Troude, Cirad).

La forme arrondie de ces greniers et la disposition des épis intimement serrés les uns aux autres et non déspathés ne favorisent pas une bonne ventilation du maïs. Des problèmes de moisissures sont fréquemment observés, notamment au cœur des greniers de grande taille.

Des greniers de ce type, caractéristiques du stockage du maïs en épis sont également construits par certains producteurs dans les îles du Cap-Vert. Ceux qui ont pu être observés étaient édifiés à même le sol dans la cour des habitations.

▮ Les greniers fermés

Les greniers fermés sont typiques des zones sèches comme les régions soudano-sahéliennes où l'on rencontre de nombreux greniers en banco d'aspects variés. Le plus souvent de forme cylindrique, ces petites structures traditionnelles de stockage sont construites en terre argileuse plus ou moins additionnée de fibres végétales ou brins de pailles (fonio, riz...) pour améliorer la solidité (Chantereau *et al.*, 2013).

La base des greniers est constituée de grosses pierres pour faciliter l'assise et surtout éviter les remontées d'humidité du sol par capillarité. Cette base supporte souvent une plateforme de rondins de bois sur laquelle est érigé le grenier. La construction est réalisée pendant la saison sèche par des spécialistes du travail de la terre comme certains potiers. Les parois des greniers en banco, généralement de faible épaisseur (5 à 10 cm), sont montées par bande selon la technique du colombin. La construction d'un grenier est relativement longue et peut durer plusieurs semaines car il est nécessaire d'attendre le séchage d'une bande avant de poser la bande suivante.

Un toit conique, en paille, recouvre l'ensemble et protège l'ouverture de remplissage située au sommet de l'édifice (photo 4.5a). Les ouvertures qui sont parfois situées sur le côté des greniers sont protégées par des petites portes souvent sculptées qui font aujourd'hui l'objet d'un commerce pour les amateurs d'art africain. Lorsque le haut du grenier se termine en coupole, l'ouverture sommitale est plus réduite et, dans certains cas, est simplement recouverte d'une pierre plate lutée à l'argile.

Les greniers de forme quadrangulaire, plus rares, sont construits par certaines populations comme les Gourounsi au Burkina Faso (photo 4.5b) ou les Dogons au Mali (voir cahier couleur photo 23). Ces greniers doivent être réalisés avec soin car ils sont plus fragiles



Photo 4.5a.
Grenier cylindrique
(© Cirad).



Photo 4.5b.
Grenier quadrangulaire
(© Thierry Ferré, Cirad).



Photo 4.6.
Intérieur compartimenté du *kpéou* (© Jean-François Cruz, Cirad).

notamment dans les angles. Pour faciliter la construction, on a parfois recours aux briques de banco préalablement séchées. Cette technique, classiquement utilisée pour la construction des habitations, permet une réalisation plus rapide des greniers et nécessite moins de savoir-faire de la part des opérateurs.

Le volume courant des greniers en banco est de 5 à 10 m³ ce qui correspond à des capacités de quelques tonnes, même si certains grands greniers peuvent dépasser la dizaine de tonnes comme c'est le cas au Niger. L'intérieur des greniers est parfois compartimenté en plusieurs cellules pour permettre le stockage de différents produits. Le sorgho et le mil sont souvent stockés en épis, mais aussi en grains. Comme les greniers ne sont pas aérés, il est indispensable de ne stocker que des produits bien secs et dont l'humidité est inférieure à 12 % pour éviter les risques de moisissures. Dans le cas d'un stockage en vrac à l'intérieur des greniers, certains paysans ont coutume de mélanger les grains avec du sable fin ou des cendres afin de limiter l'infestation des grains par les insectes déprédateurs.

Un cas particulier de grenier familial est représenté par le *kpéou* du Togo. Il s'agit d'un grenier en banco généralement à trois pieds reposant sur trois pierres pour empêcher les remontées d'humidité du sol. Ces petits greniers ouverts à leur partie supérieure sont souvent divisés



en compartiments visibles ou non extérieurement (photo 4.6) et recouverts de toits en paille. Une première jupe protège le corps du grenier et un toit amovible protège l'ouverture sommitale. Différents produits sont stockés dans des compartiments séparés comme par exemple des céréales, des haricots et des arachides ou même des cossettes de manioc.

Un autre cas particulier est celui des maisons *Tatas Sombas* dans la région montagneuse de l'Atacora, au nord du Bénin et du Togo, où les greniers sont situés au sommet des tourelles caractéristiques de cet habitat traditionnel (figure 4.4). Les greniers compartimentés des hommes sont remplis de céréales comme le fonio, le sorgho, le mil ou le riz alors que ceux des femmes contiennent plutôt des légumineuses (haricot, arachide, pois voandzou...).

En raison des matériaux utilisés, la durée de vie des greniers en banco est nettement supérieure à celle des greniers en paille tressée et peut atteindre plusieurs dizaines d'années selon la qualité de la construction. Les entretiens les plus fréquents concernent la réfection du toit en paille, le colmatage des fissures à l'argile ou le recrépissage du grenier.

▮ Les autres structures de conservation

Lorsque les quantités de produits à stocker sont faibles comme pour les semences ou les réserves destinées à être prélevées quotidiennement pour la préparation de repas, les grains sont alors conservés dans des récipients plus petits souvent placés à l'intérieur des habitations.

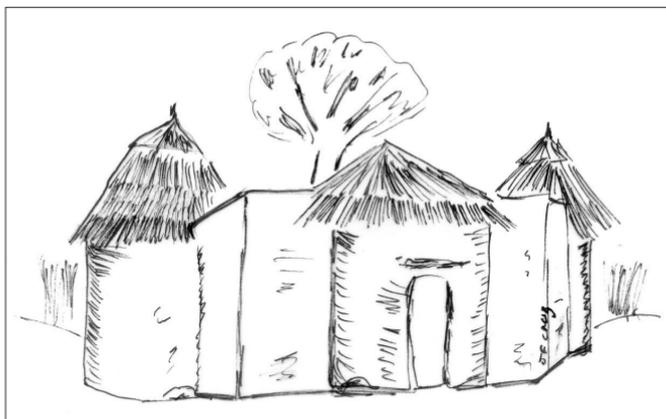


Figure 4.4.
Tata Somba du nord Bénin.

Dans de nombreuses régions du monde, des coffres en bois ont été et sont encore couramment utilisés pour le stockage de céréales comme le riz ou le blé (figure 4.5). Les familles se servent aussi de paniers finement tressés de plus ou moins grande taille et pouvant contenir plusieurs dizaines de kilogrammes de produit. Aujourd'hui l'emploi de sacs en jute ou en polypropylène tissé se généralise car les sacs sont très facilement disponibles puisqu'ils sont encore couramment utilisés dans le commerce des grains dans les pays du Sud.

Pour les très petites quantités de grains et notamment pour le stockage des semences et des graines de légumineuses, certains paysans utilisent des jarres d'argiles, des Calebasses, des gourdes, des bonbonnes (figure 4.6) ou des bouteilles en verre. Ces récipients sont très pratiques car ils peuvent être fermés hermétiquement par des bouchons de glaise ou de liège pour les bouteilles en verre. Ils conservent très bien les produits à l'abri des attaques des déprédateurs comme les rongeurs ou les insectes. Il est néanmoins nécessaire d'y stocker des grains bien secs (10 à 11 % d'humidité) pour éviter tout risque de moisissures qui entraîneraient une perte rapide de la valeur alimentaire des grains ou de la capacité germinative des semences.



Figure 4.5.
Coffre à grains.

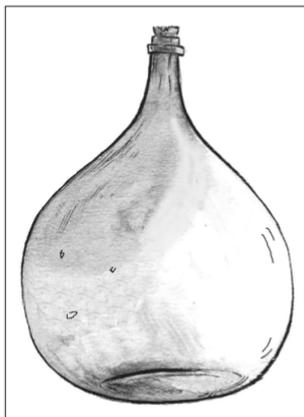


Figure 4.6.
Bonbonne pour grains
ou semences.

Cas particulier du stockage souterrain

Le stockage souterrain des grains en silo (terme espagnol signifiant « fosse à grains ») est une technique de stockage très ancienne qui date de la préhistoire. C'est aussi la méthode qui a été, jusqu'au



xix^e siècle, la plus universellement utilisée puisqu'elle existe dans presque toutes les régions du monde : Chine, Inde, Moyen Orient, Europe, Bassin méditerranéen, Afrique, Madagascar et Amérique du Nord (Sigaut, 1977). En France, le célèbre site de l'oppidum d'Enserune dans le département de l'Hérault est creusé de dizaines de silos à grains datant de 2500 ans (photo 4.7). En 2015, un mega-site gaulois de plusieurs centaines de silos à grains a été découvert dans le Puy-de-Dôme.



Photo 4.7.

Silos à grains à l'oppidum d'Enserune (France) (© Jean-François Cruz, Cirad).

Ces fosses à grains (figure 4.7), cylindriques, sphériques, tronconiques, en forme d'amphore etc., ont des dimensions courantes de 2 à 3 m de haut et de 1 à 2 m de large avec un diamètre d'ouverture d'environ 60 cm pour permettre le passage d'un homme. Les capacités unitaires varient ainsi de quelques tonnes à une dizaine de tonnes même si certaines grandes fosses peuvent contenir davantage. Ces fosses sont construites, isolées ou groupées, en zones rurales ou en zones urbaines et parfois à l'intérieur même des habitations. Dans certaines régions les parois sont séchées au feu et lissées à l'argile. Après la récolte, le battage et le séchage, les grains sont stockés en vrac en remplissant la fosse jusqu'en haut sauf quelques centimètres que l'on remplit de paille ou de balles (riz, orge..). Parfois, les parois elles-mêmes sont

recouvertes de paille ou de nattes de paille. Le tout est ensuite recouvert d'une pierre plate lutée à l'argile ou de planches de bois, puis d'une couche de paille hachée et enfin d'une couche de terre compacte de 50cm et aplanie pour ne pas trahir la présence du silo.

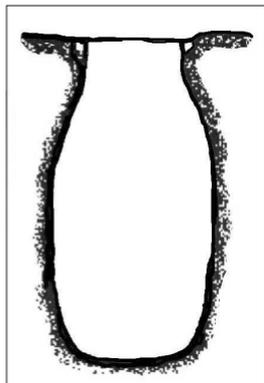


Figure 4.7.
Fosse à grains.

Ce procédé a toujours concerné la conservation des grains sur de longues périodes et certains écrits parlent de conservation du riz paddy en Chine durant plusieurs dizaines d'années. Si ces pratiques de stockage à long terme sont aujourd'hui devenues rares, elles sont encore mises en œuvre dans certains pays. En Afrique du Nord, les silos *matmoras*, de forme tronconique, servent encore aujourd'hui au stockage villageois de l'orge ou du blé dur (Bartali, 1987). À Madagascar, la technique de stockage en fosse du riz paddy est encore pratiquée au centre du pays, dans la région d'Amoron'i Mania, pour lutter contre les vols de céréales. En Inde, dans la région du Karnataka, des céréales comme l'éleusine, le mil ou le sorgho sont traditionnellement stockées dans un silo appelé localement *hagevu*. En Éthiopie, dans certaines régions très sèches où les matériaux végétaux sont rares, de nombreux producteurs stockent leurs grains de sorgho dans des fosses souterraines. Ces fosses sont habituellement creusées dans des sols sableux ou pierreux bien drainés pour éviter l'humidité et les risques de moisissures. Pour la plupart des paysans, cette technique peu coûteuse a pour principal avantage de cacher les réserves et de les protéger contre les pillages ou les attaques de déprédateurs.

Amélioration du stockage villageois

Dans les régions humides, l'amélioration du stockage dépend en premier lieu de l'amélioration du séchage. Les différentes techniques



familiales ou artisanales qui peuvent être mises en œuvre pour parfaire le séchage concernent l'utilisation d'aires de séchage, de bâches, de claies, de cribs... (voir chapitre 3).

▮ L'amélioration des structures de stockage

L'amélioration des structures au niveau villageois comporte deux types d'interventions : d'une part, la modification partielle des structures traditionnelles existantes et d'autre part, l'introduction de structures nouvelles. La première doit toujours être envisagée avec prudence et modestie car les structures locales, élaborées au cours des siècles, sont généralement bien adaptées aux conditions climatiques locales et bien maîtrisées par les agriculteurs.

Les greniers aérés

Pour les greniers aérés, les améliorations doivent favoriser l'aération des épis et mieux protéger contre les attaques des rongeurs.

Les cribs

Dans les régions humides où les épis de maïs sont récoltés dès la maturité des grains, l'emploi du crib est recommandé car il constitue à la fois une structure de séchage et une structure de stockage. Des cribs améliorés sont décrits au chapitre 3. Dans les zones très humides où le maïs est récolté à 30-35 % d'humidité, la largeur des cribs ne devrait pas dépasser 60 cm. Dans les zones plus sèches où le maïs est récolté à 25 % d'humidité, la largeur peut atteindre 1 m et même 1,2 à 1,5 m dans les zones très sèches. Les poteaux du crib doivent être équipés de tôles ou de cônes métalliques pour empêcher les attaques de rongeurs (figure 3.7).

Le grenier ebliva

Afin d'accroître la ventilation des épis, certaines améliorations ont été proposées. L'idée consiste à équiper le grenier d'une cheminée centrale de manière à réduire de moitié la largeur de la couche d'épis que doit traverser l'air et à améliorer ainsi la ventilation naturelle du stock (Cruz et Allal, 1986). La cheminée centrale peut être réalisée en branchage ou constituée d'un fût métallique percé (figure 4.8). La plateforme du grenier doit être davantage surélevée et reposer sur un nombre plus restreint de poteaux afin de pouvoir les équiper de barrières anti-rats.

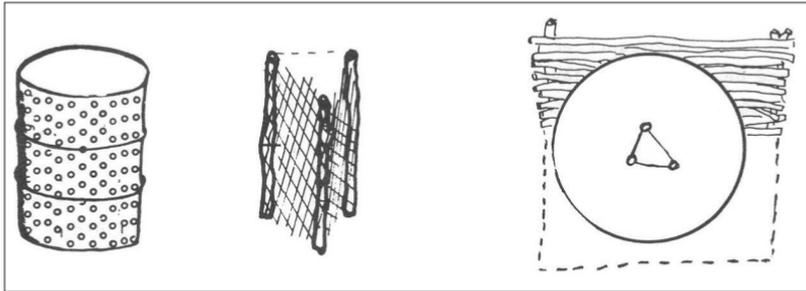


Figure 4.8.
Amélioration de l'*ebliwa* (Cruz et Allal, 1986).

Certains ont proposé que la cheminée centrale soit de forme conique et constituée de rondins de bois (Afomasse, 1994).

Les greniers fermés

Pour les greniers traditionnels en banco des zones sèches, l'effort doit porter sur l'entretien fréquent des structures et de leur toiture. Un lissage annuel de l'intérieur et des parois externes du grenier permet de combler les fissures qui constituent souvent des refuges pour les insectes déprédateurs.

Des propositions d'amélioration des greniers en terre ont été faites en conservant les structures traditionnelles et en y apportant des éléments susceptibles de moderniser leur utilisation. Par exemple les greniers en terre du nord du Bénin ont été équipés de canaux de vidange, d'une jupe en paille de protection des parois externes et d'une dalle de fermeture (figure 4.9) (Diop *et al.*, 1997). Certaines propositions portaient sur l'incorporation de ciment au banco ou sur l'utilisation d'un film en plastique polyéthylène pour doubler les parois des greniers afin d'en améliorer l'étanchéité à l'eau et aux gaz comme dans le cas des cellules *pusa* en Inde.

Les fosses à grains

Pour réduire les transferts d'eau et de chaleur entre le fond et les parois de la fosse et les grains, les agriculteurs marocains avaient pour habitude de tapisser la fosse d'une couche de paille parfois mélangée à des déjections de bovins ou de dromadaires. Aujourd'hui cette paille est de plus en plus souvent remplacée par une bâche en plastique clouée aux parois. Cette couche de plastique est souvent composée de sacs de récupération (sacs d'engrais...) disponibles dans les exploitations agricoles (Bartali, 1987). Des produits insecticides ou répulsifs pour les



insectes et les rongeurs (argile pilée, cendres de bois, feuilles d'eucalyptus...) peuvent être ajoutés au grain lors du remplissage. En fin de remplissage, une couche de paille est disposée sur la masse de grains et la fosse est fermée d'une pierre plate sur laquelle on dispose une feuille de plastique recouverte de terre (figure 4.10). Cette technique permettrait d'assurer une bonne étanchéité.



Figure 4.9.
Grenier amélioré
au Bénin (d'après
Fiagan, 1994).

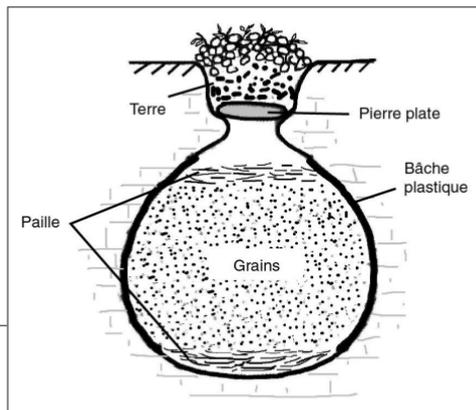


Figure 4.10.
Fosse à grains au Maroc
(d'après Bartali, 1987).

Les structures dites améliorées

Au cours des années 1970 et 1980, de nombreux projets ont cherché à améliorer les greniers traditionnels en proposant la diffusion de nouvelles structures de stockage en terre ou en ciment.

Les petits silos en terre stabilisée et en ciment

Des petits silos (issus des projets soutenus par l'USAID, États-Unis) d'une capacité d'une tonne de maïs grains ont été expérimentés au Nigeria. Ce petit grenier cylindrique repose sur une dalle de béton armé supportée par des fondations en béton ou en pierres. Les parois construites en parpaings de terre sont enduites de ciment et surmontées d'un dôme de couverture (figure 4.11). Dans le même style de grenier construit en briques de terre stabilisée, le silo *burkino* a un toit en dôme pour rappeler les greniers traditionnels mais nécessite souvent l'intervention de maçons spécialistes pour mettre en œuvre cette technique (figure 4.12).

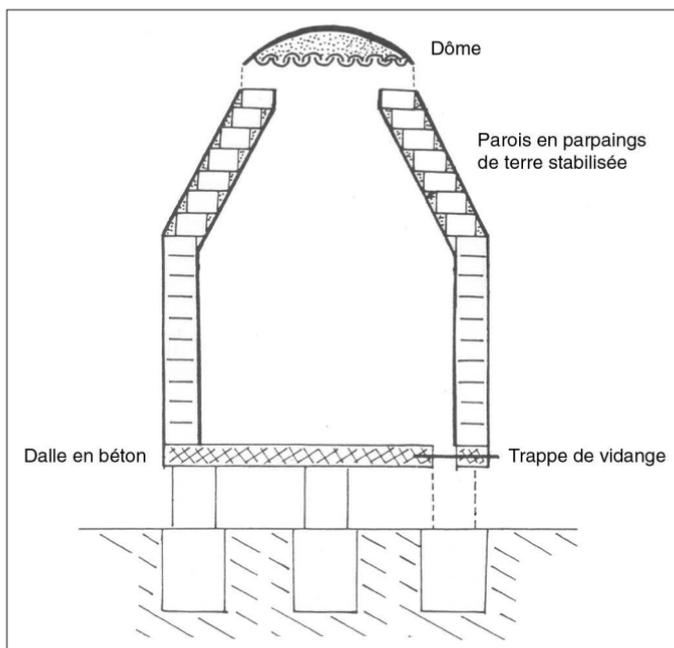


Figure 4.11.

Silo des projets USAID (d'après Cruz *et al.*, 1988).

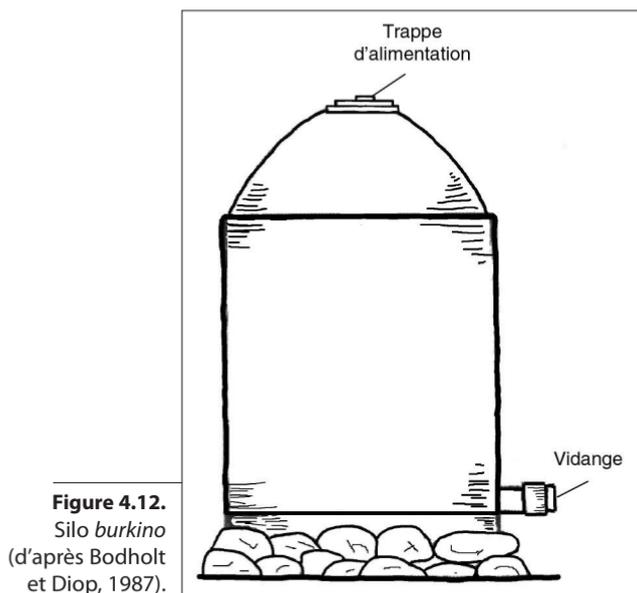


Figure 4.12.
Silo *burkino*
(d'après Bodholt
et Diop, 1987).

Les petits silos en ciment

Plus de 250 petits silos en douves de ciment ont été testés au Bénin par les services agricoles en collaboration avec le *Peace Corps* des États-Unis. Ces structures d'une capacité de 2,5 ou 4,5 tonnes sont constituées de douves de ciment maintenues serrées par des câbles extérieurs et reposant sur une dalle de béton posée sur des piliers (figure 4.13). L'ensemble est recouvert d'une dalle bétonnée dans laquelle est aménagé un trou d'homme protégé d'un couvercle. Un trou de vidange à la base de la paroi permet de vider le grenier destiné au stockage en vrac des céréales.

En Zambie, la technique du ferrociment a été mise en œuvre pour la fabrication d'un petit silo villageois appelé *ferrumbu* (figure 4.14). La base du silo est constituée d'un amas de pierres, empilées sur 80 cm de hauteur, recouvert d'une fine couche de béton. Une ossature grillagée de forme cylindrique et se terminant en tronc de cône est réalisée pour être recouverte intérieurement et extérieurement d'un mortier de ciment. Après séchage le silo est crépi d'un enduit de ciment. Un couvercle conique amovible permet de couvrir l'orifice de remplissage et un tube de vidange permet de récupérer les grains. Un silo de 1,1 m de diamètre et de 1,5 m de hauteur permet de stocker environ 1 tonne de grains.

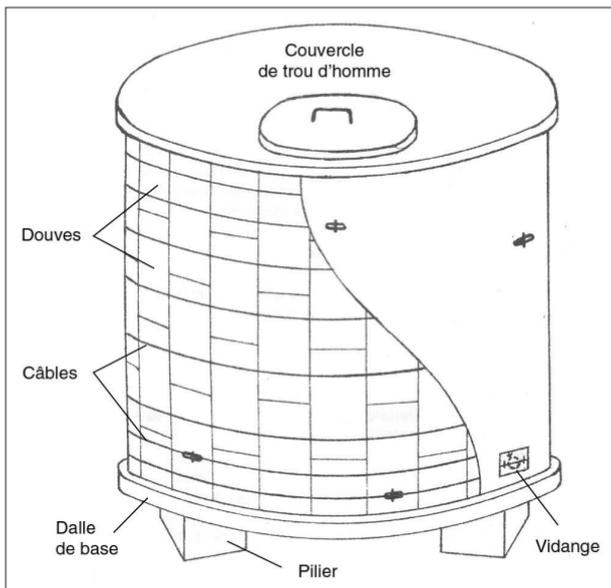


Figure 4.13.
Silo en douves (d'après Lindblad *et al.*, 1974).

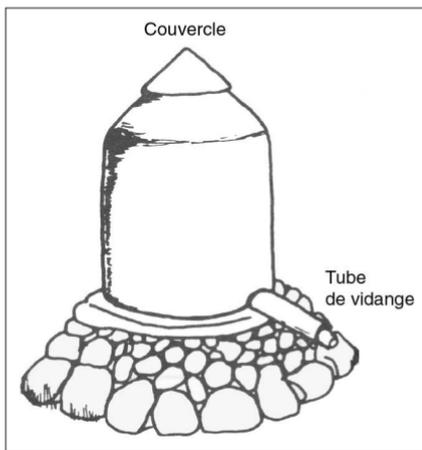


Figure 4.14.
Silo ferrumbu
(d'après Cruz et Allal,
1986).

Toutes ces structures améliorées n'ont jamais connu le succès escompté car elles nécessitaient des matériaux et un savoir-faire nouveaux. L'investissement requis comparé au bénéfice en termes de réduction des pertes post-récolte n'était bien souvent pas compétitif par rapport aux structures traditionnelles de stockage villageois.



Les petites cellules métalliques

Les fûts métalliques de 200 litres utilisés pour le commerce des produits pétroliers sont parfois réutilisés, après nettoyage, en récipients pour le stockage des grains (Appert, 1985). Ils constituent, en effet, une structure étanche apte à la conservation de grains qui doivent préalablement avoir été correctement séchés (figure 4.15). Même si le processus est lent, la respiration des grains dans cette atmosphère confinée conduit à une raréfaction de l'oxygène qui constitue un des moyens de lutte contre le développement des insectes (Cruz et Allal, 1986). Les grains stockés en fûts sont par ailleurs inaccessibles aux rongeurs. La capacité, d'environ 150kg de grains par fût, reste faible mais peut convenir au stockage de légumineuses (haricot, niébé...) souvent stockés en petites quantités et dont la conservation par les méthodes traditionnelles reste problématique. Pour éviter les trop fortes températures, il est recommandé d'entreposer les fûts sous abri ou à l'intérieur des habitations. Les fûts ont une durée de vie d'une dizaine d'années s'ils ne servent qu'au stockage des grains et s'ils sont correctement entretenus.

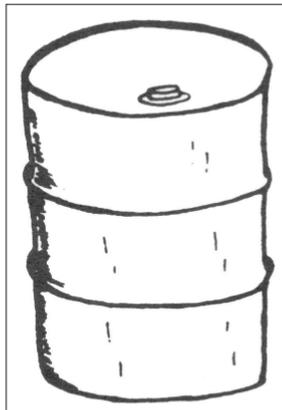


Figure 4.15.
Fût métallique.

Les petites cellules métalliques de 1 à 3 tonnes de capacité ont connu un certain succès en Amérique centrale et en Amérique du Sud où elles sont utilisées depuis plusieurs décennies (voir cahier couleur, photo 24). En Afrique, l'IRAT (Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières) proposait, dès le début des années 1970, des petits silos métalliques de 2 à 3 tonnes de capacité sur la station expérimentale de Niaouli au Bénin (figure 4.16). Ces cellules en tôle, qui peuvent être fabriquées par des artisans locaux, offrent une bonne protection contre les attaques des insectes et des rongeurs. Au cours des dernières années, les projets de la FAO ont diffusé plusieurs

milliers de petits silos métalliques familiaux, d'une capacité de 300 kg à 3000 kg, dans de nombreux pays d'Amérique du Sud, d'Afrique ou d'Asie (figure 4.17). Le coût de production d'un silo métallique de 1 tonne de capacité serait inférieur à 100 euros, pour une durée de vie estimée à une quinzaine d'années. Mais en Afrique ce coût peut paraître prohibitif pour de nombreux petits producteurs qui ont à stocker des produits d'assez faible valeur marchande comme les mils et les sorghos et dont les taux de pertes dans les greniers traditionnels restent limités.

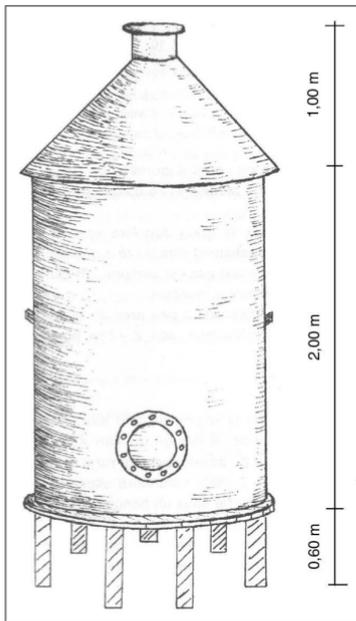


Figure 4.16.
Silo métallique diffusé par l'IRAT.

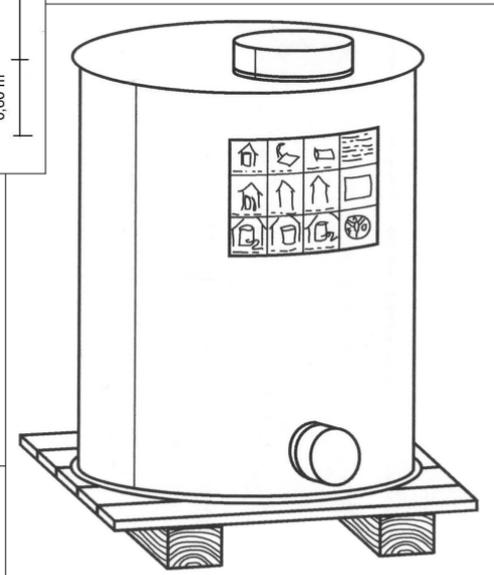


Figure 4.17.
Cellule métallique diffusée par les projets de la FAO (d'après FAO, 2005).



Les sacs et bidons en plastique

Les sacs en plastique sont fréquemment utilisés pour le stockage des grains et la technique du triple emballage a été vulgarisée par l'Université américaine de Purdue et ses partenaires africains pour le stockage du niébé. La technique appelée «PICS» (*Purdue Improved Cowpea Storage*) consiste à stocker les graines bien sèches dans deux sacs superposés en polyéthylène de haute densité d'une épaisseur de 80 microns (Kitch et Ntoukam, 1991). Les sacs sont insérés dans un troisième sac protecteur en polypropylène tissé (figure 4.18). Les sacs peuvent contenir environ 50kg de graines de niébé. Leur fermeture hermétique en col de cygne crée une atmosphère confinée qui, par la propre respiration des grains, appauvrit le milieu en oxygène et stoppe le développement des insectes (bruches). Les sacs en plastique restent cependant des structures relativement fragiles qui ne protègent pas contre l'attaque des rongeurs. Une solution est d'entreposer des sacs sur une plateforme équipée de barrières anti-rats (figure 4.19).

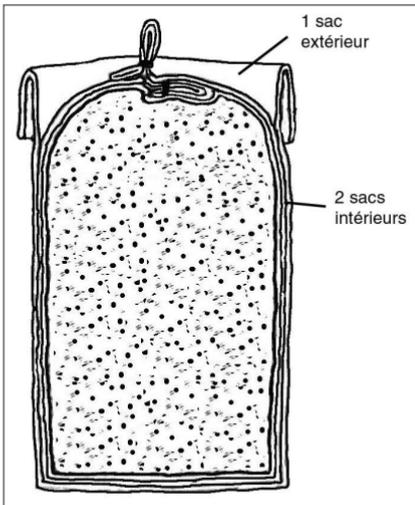


Figure 4.18.
Triple ensachage
(d'après Kitch
et Ntoukam, 1991).

Les fûts ou bidons en plastique de polyéthylène haute densité sont des structures idéales pour le stockage des grains en petites quantités (photo 4.8). Les fermetures par vis garantissent une parfaite étanchéité et permettent l'obtention d'une atmosphère confinée assurant une lutte physique efficace contre les insectes. Un fût de 68 litres (50 kg de grains) coûte environ 50 euros et a une durée de vie de plus de 10 ans s'il est correctement entreposé. L'utilisation de fûts en plastique de récupération et ayant contenu des produits chimiques est totalement à proscrire.

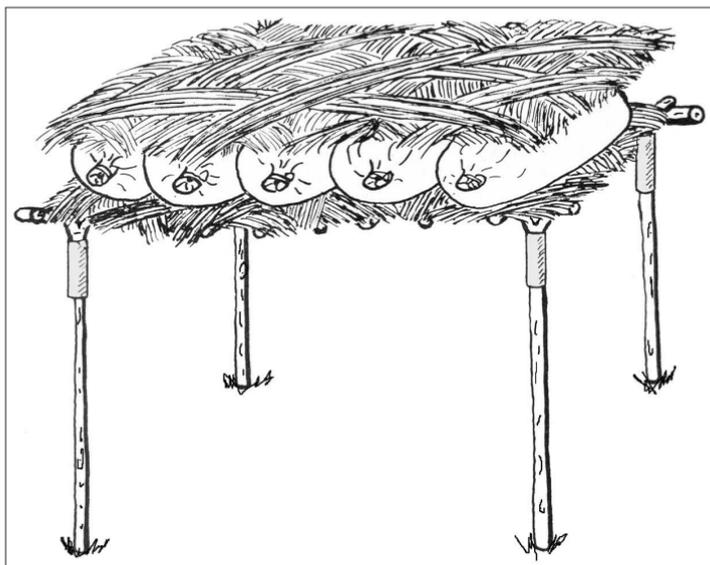


Figure 4.19.
Sacs sur plateforme (d'après Cruz et Allal, 1986).



Photo 4.8.
Bidons en plastique alimentaire
(© Jean-François Cruz, Cirad).



Aujourd'hui, les paysans sont souvent confrontés à une pénurie de matériaux végétaux (bois, pailles...) pour construire leurs greniers traditionnels et ils ont de plus en plus recours au stockage des grains dans des sacs en polypropylène tissé entreposés à l'intérieur même des habitations ou dans des petits entrepôts villageois à l'instar de ce qui se fait pour les stocks commerciaux (voir chapitre 5).

Dans de nombreux pays, les préoccupations environnementales visent actuellement à réduire et, à terme, à interdire l'utilisation de plastique non dégradable. La technique du *triple bagging* deviendra inapplicable, alors que le stockage dans des bidons en plastique sera sans doute davantage toléré. Pour le stockage en sacs, on pourrait relancer l'utilisation de sacs en fibres végétales comme le jute ou le sisal.

▮ L'amélioration des pratiques post-récolte

L'amélioration du séchage

Outre l'amélioration des structures de stockage, la réduction des pertes au niveau paysan ou villageois passe par une amélioration des pratiques post-récolte. La principale intervention doit concerner les pratiques de séchage pour éviter tout risque de développement des moisissures. Les techniques d'amélioration du séchage naturel et d'utilisation du séchage artificiel sont décrites au chapitre 3.

La lutte contre les déprédateurs

L'amélioration du stockage villageois passe aussi par la lutte contre les déprédateurs que sont les insectes et les rongeurs. Diverses méthodes traditionnelles de lutte contre les insectes sont utilisées dans les pays du Sud.

L'exposition des grains au soleil

Dans de nombreux pays du monde, les paysans ont coutume de sécher les produits récoltés par leur exposition directe au soleil. Cette pratique a un effet répulsif sur les insectes qui fuient la lumière vive et les fortes chaleurs. Les grains doivent cependant être étalés en couches minces. L'utilisation de petites bâches en plastique noires ou sombres (voir chapitre 3) accroît l'efficacité du phénomène.

L'enfumage des épis

En Amérique latine ou en Afrique, certains producteurs ont coutume de stocker les épis de maïs, et notamment ceux qui serviront pour la

semence, au-dessus du foyer domestique qui sert de cuisine (figure 4.20). Les épis sont ainsi enfumés fréquemment et cet enfumage, parfois qualifié à tort de fumigation, a une action insectifuge.

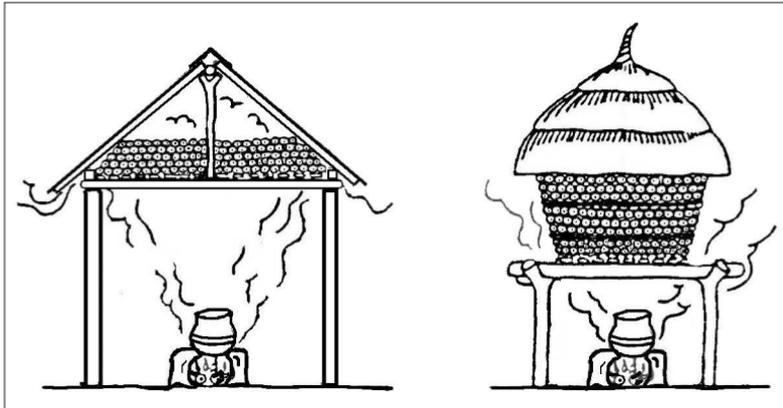


Figure 4.20.
Enfumage des épis de maïs (d'après Pantenius, 1988).

L'utilisation de plantes répulsives

Dans certaines régions, il est courant d'utiliser des plantes ou des extraits de plantes en mélange aux grains pour améliorer leur conservation. Ces plantes contiennent des substances qui ont des propriétés anti-appétantes, répulsives ou parfois même insecticides. L'exemple le plus souvent cité est celui du *neem* ou margousier (*Azadirachta indica*), arbre de la famille des Meliacées, dont les feuilles hachées ou des extraits de graines sont fréquemment utilisés sur les grains stockés.

L'addition de matières solides

L'addition de matières solides est une technique ancestrale de préservation des grains. Elle consiste à mélanger du sable fin ou de la cendre aux grains dans des proportions qui varient selon les régions. Au XIX^e siècle, les agronomes français conseillaient également la suie et le charbon pulvérisé. Il est nécessaire de disposer d'une matière solide suffisamment abondante et suffisamment fine pour remplir entièrement les vides interstitiels et constituer une barrière à la progression des insectes femelles en période de ponte. Outre leur rôle dissuasif, ces matériaux ont également une action abrasive sur la cuticule des insectes et donc un rôle létal, car ils provoquent la mort des déprédateurs par dessiccation (De Luca, 1979).



L'utilisation d'huile

Le mélange d'une huile végétale brute aux graines de légumineuses dans des proportions de 5 à 10 ml/kg est une technique parfois proposée dans la lutte contre les insectes. L'enrobage des graines par une fine pellicule d'huile a un effet dissuasif et empêche la ponte des femelles et la progression des larves. Cette technique, utilisable au niveau familial, reste limitée à de petites quantités de grains et s'appliquerait davantage aux semences qu'aux grains de consommation.

La lutte chimique

L'emploi d'insecticides chimiques est aujourd'hui développé au niveau villageois et les principaux produits sont des organophosphorés et des pyréthriinoïdes (voir chapitre 7). La lutte contre les rongeurs est présentée au chapitre 8.



5. Le stockage en sacs

Pérennité du stockage en sacs

La technique de stockage des grains en sacs dans des magasins ou des entrepôts est encore très largement répandue dans les pays du Sud alors qu'elle a pratiquement disparu dans les pays du Nord depuis le milieu du xx^e siècle. Dans les années 1980, de nombreux observateurs ou spécialistes considéraient que cette évolution était inéluctable et que le stockage commercial en vrac allait rapidement supplanter le stockage en sacs dans toutes les régions du globe.

En ce début du xxi^e siècle, le stockage commercial en sacs perdure en Afrique, en Amérique latine et en Asie car il reste bien adapté à la commercialisation des grains qui s'effectue prioritairement en sacs dans la plupart des régions agricoles de ces continents (voir cahier couleur, photos 26 et 27). Ce mode de stockage permet l'utilisation de bâtiments existants ou exige un investissement plus faible que le stockage en vrac lorsque la construction d'infrastructures neuves s'avère nécessaire. En situation d'urgence ou par manque d'infrastructures, le stockage en sacs peut même être réalisé à l'extérieur. Ce stockage à l'air libre est fréquemment utilisé pour le stockage des arachides sous la forme de pyramides de sacs qui peuvent contenir plusieurs centaines de tonnes de marchandise.

Conception des magasins de stockage en sacs

Les magasins de stockage des grains en sacs ne doivent pas être de simples abris comme c'est trop souvent le cas mais répondre à différents critères de conception de manière à limiter l'influence des différents facteurs de dégradation des stocks (voir chapitre 1).

Les principales exigences sont les suivantes :

- empêcher l'entrée d'eau ou d'humidité dans les magasins ;
- protéger les stocks contre les fortes températures ;
- éviter l'entrée des déprédateurs des stocks (insectes, rongeurs, oiseaux).

Par ailleurs, une bonne conception de l'infrastructure doit faciliter la manutention des sacs et les contrôles de la qualité des stocks et leur traitement éventuel.

Les principaux points que le responsable de la conception et de la construction d'un magasin doit prendre en compte sont les suivants :

- l'implantation et l'exposition;
- le dimensionnement et les ouvertures;
- la construction comprenant le sol, les élévations, la toiture, les ouvertures (les portes, les fenêtres, les aérations...);
- les équipements.

▮ Implantation et exposition

Le choix du site d'implantation est un facteur très important de réussite. L'implantation doit être prévue en bordure d'un axe routier praticable en toute saison, notamment en saison des pluies, et dans une zone alimentée par les réseaux d'eau et d'électricité, mais si possible à l'écart des zones d'habitation. La topographie des lieux est à prendre en compte pour éviter les zones basses, inondables, et la proximité d'eaux stagnantes ou courantes (rivières ou marigots), et préférer les points hauts comme les sommets d'une colline ou d'une butte d'où les eaux de ruissellement s'évacuent facilement (Proctor, 1994). Dans tous les cas, le porteur de projet a intérêt à consulter les services de l'équipement ou du génie rural avant de fixer le choix définitif de l'implantation.

Pour éviter de trop fortes températures dans le magasin, il est nécessaire de limiter les surfaces exposées au rayonnement solaire qui dans les régions tropicales est intense à l'Est et à l'Ouest. Le bâtiment doit donc être orienté est-ouest pour ne présenter que ses pignons (petites façades) aux rayons du soleil. Lorsque le soleil est au zénith et que le rayonnement est intense, les façades sont protégées par les avancées du toit. L'orientation du magasin doit aussi être choisie afin que l'axe longitudinal du bâtiment soit parallèle aux courbes de niveaux de manière à réduire au mieux les volumes de terre déplacés lors du nivellement.

▮ Conception et dimensionnement des magasins

Les dimensions d'un magasin de stockage sont fonction des quantités de produits à entreposer et de considérations relatives à la bonne gestion des stocks. Les principaux paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- le volume spécifique des denrées stockées en sac;
- l'individualisation du stock en plusieurs lots;
- la hauteur des piles de sacs selon la nature des sacs utilisés;



- la largeur des allées de manutention et de contrôle;
- la nécessité de locaux annexes (aire de travail, bureau, laboratoire, locaux de rangement).

Volume spécifique des denrées stockées en sac

Le volume spécifique des principales denrées stockées en sacs est donné dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1. Volume spécifique de quelques denrées stockées en sacs.

Produit stocké en sacs	Volume spécifique (m ³ /tonne)
Mil	1,25
Niébé, haricot, pois, lentille	1,30
Riz usiné, blé, café	1,60
Maïs, sorgho, arachide décortiquée	1,80
Riz paddy	1,90
Soja, cacao	2,00
Farine de maïs, farine de blé	2,10
Graines de coton	2,50

Hauteur des piles de sacs

Pour une quantité de produits donnée, l'emprise des stocks au sol est fonction de la hauteur des piles de sacs. Cette hauteur dépend d'abord de la nature des sacs utilisés. Les sacs en plastique de polypropylène tissé qui ont tendance à glisser les uns sur les autres ne doivent pas être empilés sur une hauteur supérieure à 3 m, alors que les sacs en fibres naturelles (jute ou sisal), plus rugueux et plus adhérents, peuvent être empilés sur des hauteurs de 5 à 6 m.

La hauteur des piles est également fonction de la nature du produit à stocker. Pour les grains conditionnés en sacs de jute, on peut empiler plus de 30 couches de sacs alors que pour les farines, on limite l'empilage à 20 couches pour éviter des compactations trop importantes au niveau des couches inférieures. Le savoir-faire du personnel pour édifier des piles de sacs stables est également une donnée importante à prendre en compte pour estimer les hauteurs d'empilement maximales.

Enfin, il faut tenir compte de la nécessité de laisser un espace suffisant au-dessus des piles de sacs pour que le personnel y accède et puisse contrôler les stocks. En pratique, la hauteur des piles est inférieure de 1 m à la hauteur des murs du magasin pour qu'un homme puisse se déplacer facilement en tous points de la surface du tas de sacs.

Séparation des stocks en plusieurs lots

Le stockage en un seul lot permet d'obtenir le meilleur coefficient d'utilisation du volume offert. Dans la pratique, cette solution est rarement applicable et n'est pas à recommander sauf peut-être pour des très petits magasins. Dans la plupart des cas, il est nécessaire d'individualiser les lots selon la nature des produits à stocker et si l'on stocke un seul produit, il est également recommandé de faire plusieurs tas de manière à faciliter la gestion des livraisons, les contrôles et les traitements éventuels. Il est indispensable de prévoir un couloir de circulation et d'inspection de 1 m de large entre les piles de sacs et les murs du magasin et de réserver des allées de manutention de 2 à 3 m de large.

Forme du bâtiment et locaux annexes

Pour faciliter la manutention et la gestion des stocks, l'usage montre qu'il est préférable de concevoir des bâtiments de forme rectangulaire. Dans la pratique, on préconise des proportions où la longueur est égale au double de la largeur (figure 5.1).

Afin d'améliorer le coefficient d'utilisation du volume offert par le magasin et de permettre une bonne gestion des stocks, il est généralement indispensable de prévoir des locaux annexes au bâtiment principal de stockage. Il est ainsi nécessaire de prévoir un bureau-laboratoire pour le magasinier, des locaux pour l'entreposage de différents matériels (bascules, sacherie, bâches en plastique, appareils et produits insecticides, matériels de nettoyage...) et une aire de travail pour le nettoyage, le traitement et le reconditionnement de lots de grains. Cette aire de service peut être réalisée en prolongeant la toiture en pignon ou en long pan afin d'aménager une aire couverte pour la

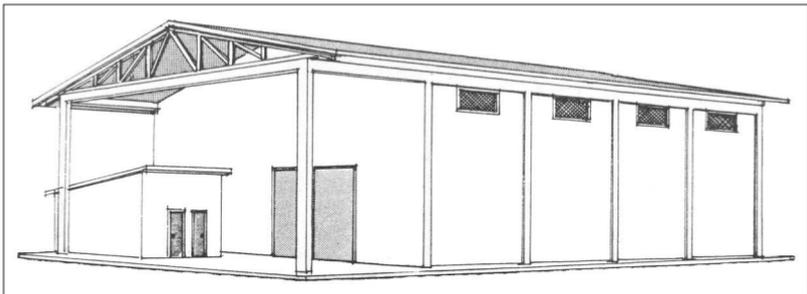


Figure 5.1.

Vue extérieure d'un magasin avec une aire de services en pignon (d'après Cruz *et al.*, 1989).



réception, le reconditionnement éventuel et l'expédition des sacs de grains (figure 5.1). Dans les centres de stockage importants comprenant plusieurs magasins, il est souvent préférable de prévoir un bâtiment propre dédié aux services et regroupant l'ensemble des locaux annexes.

▮ Principes de construction des magasins

Des plans standards pour magasins à grains ont été publiés par la FAO dans les années 1980 qui restent pour la plupart encore utilisables aujourd'hui. Il s'agit donc ici de rappeler quelques informations concernant la construction des magasins.

Les fondations

Pour l'implantation du magasin, il faut bannir les terrains argileux ou les remblais instables et choisir des sols bien drainés de bonnes portances avec une résistance à la pression supérieure à $0,2\text{N/mm}^2$ (ou 2kg/cm^2). Toutes les charges du bâtiment se répartissent sur des poteaux qui sont supportés, à la base, par des plots de fondation ou une semelle isolée en béton armé.

L'ossature du magasin et les murs

L'ossature du magasin est constituée des poteaux soutenant la charpente et reliés entre eux par des chaînages. Elle est généralement en béton armé mais elle peut aussi être constituée d'éléments métalliques. On doit éviter autant que possible l'édification de poteaux à l'intérieur du magasin car ils sont une gêne importante à l'édification et à la gestion des piles de sacs.

Les murs sont parfois constitués de parois légères réalisées en plaques de fibrociment ou en tôles d'acier galvanisé ou d'aluminium. Ces matériaux ont l'avantage d'être d'une mise en œuvre rapide mais ils ont l'inconvénient d'être fragiles et de faible inertie thermique. Les murs des magasins sont plus généralement réalisés en parpaings (blocs de béton ou briques) pour donner une certaine résistance au bâtiment et assurer une bonne inertie thermique. La face interne des murs du magasin ne doit présenter aucun décrochement susceptible de gêner les opérations de manutention et de contrôle des stocks. Les saillies des poteaux doivent donc toujours être prévues à l'extérieur du bâtiment. Enfin, il est nécessaire de prévoir tout autour du magasin, une dalle trottoir d'environ 1 m de large et légèrement pentue pour éviter que les eaux qui ruissellent du toit n'affouillent le bas des murs.

Les murs doivent être recouverts d'un enduit de ciment sur les deux faces et d'un badigeon de chaux sur la face externe pour renvoyer le rayonnement solaire et limiter l'accumulation de chaleur dans le magasin. L'intérieur du magasin est souvent recouvert d'une couche de peinture de couleur claire pour obtenir une surface aussi lisse que possible et faciliter ainsi le nettoyage des murs et la lutte contre les insectes.

Encadré 5.1. Exemple de calcul des dimensions d'un magasin de stockage des grains en sacs

Cet exemple de calcul théorique permet de déterminer rapidement les dimensions à choisir pour la réalisation d'un magasin en fonction des quantités de produits à stocker en sacs. Les valeurs définitives peuvent aussi être ajustées en fonction des standards de construction en vigueur localement.

Soit, par exemple, à concevoir un magasin de stockage de 1250 tonnes de maïs en sacs de jute. Pour faciliter le contrôle et la gestion du produit, le stock est séparé en 6 lots.

Surface au sol occupée par le produit

D'après le tableau donnant le volume spécifique des denrées stockées en sacs, le volume total occupé par 1250 tonnes de maïs est de :

$$1250 \text{ (t)} \times 1,8 \text{ (m}^3\text{/t)} = 2250 \text{ m}^3$$

En considérant que les sacs de maïs sont empilés sur une hauteur de 5 m, la surface au sol nécessaire sera de : $2250/5 = 450 \text{ m}^2$

Si on retient une longueur (L) de magasin égale au double de la largeur (l), la surface au sol est égale à $2 l^2$ soit $2 l^2 = 450 \text{ m}^2$ ou largeur (l) = 15 m et longueur (L) = 30 m.

La surface au sol occupée par les sacs de maïs partagés en 6 lots est représentée en figure 5.2.

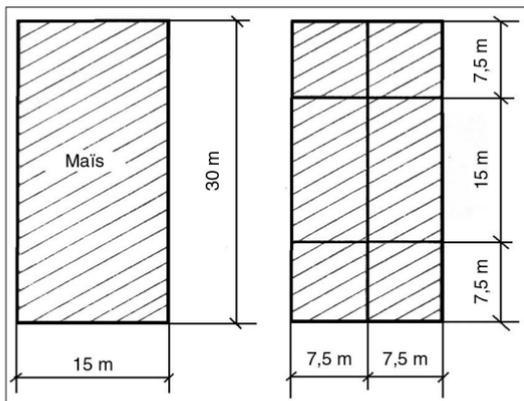


Figure 5.2.
Surface au sol occupée par le produit stocké.



Dimensions internes du magasin

Pour individualiser le stock en 6 lots, il est judicieux de prévoir une allée centrale de 3 m de large dans l'axe principal du magasin, deux allées médianes de 3 m de large (qui seront situées en face des portes d'accès), une allée de contrôle de 1 m de large le long des murs

L'individualisation des lots est illustrée en figure 5.3. Les dimensions internes du magasin sont alors de :

Longueur (L) = 1 m + 7,5 m + 3 m + 15 m + 3 m + 7,5 m + 1 m = 38 m

Largueur (l) = 1 m + 7,5 m + 3 m + 7,5 m + 1 m = 20 m

Soit une surface totale au sol de 760 m².

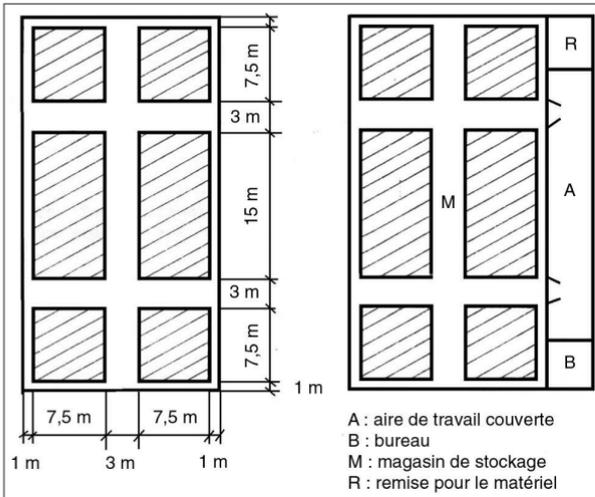


Figure 5.3. Schéma illustrant le calcul des dimensions d'un magasin de stockage.

Si l'on retient une hauteur des piles de sacs de 5 m, la hauteur des murs doit alors être de 6 m, comme cela a été signalé précédemment.

Le volume total du magasin est ainsi de $760\text{m}^2 \times 6\text{ m} = 4560\text{m}^3$. Comme le volume réellement occupé par le produit est de 2250m^3 , le coefficient d'utilisation du volume offert est légèrement inférieur à 50 %. Pour les petits magasins de quelques dizaines à quelques centaines de tonnes, ce coefficient est inférieur alors qu'il est supérieur pour les grands entrepôts.

Les ouvertures du magasin

Les ouvertures du magasin comprennent les portes et les aérations.

Les portes

Les petits magasins ne disposent généralement que d'une seule porte, ce qui rend difficile la bonne gestion des stocks. Il est toujours préférable de concevoir des bâtiments avec deux portes de manière à faciliter

la manutention des stocks et à permettre d'appliquer la règle dite «FIFO» (*first in, first out*). Situées d'un même côté du bâtiment, elles peuvent être protégées des pluies par l'avancée du toit et plus facilement surveillées depuis le bureau du magasinier (figure 5.6).

Les portes doivent être de dimensions suffisantes avec une largeur minimum de 3 m et une hauteur de 2,5 m. Elles doivent être réalisées avec soin pour assurer une bonne fermeture du magasin et empêcher l'entrée des insectes et des rongeurs. À cet effet, les portes à battants permettent une meilleure fermeture des magasins que les portes coulissantes. Il est préférable que les portes à battants s'ouvrent vers l'extérieur «à l'anglaise» pour ne pas encombrer l'intérieur du magasin et réduire le volume de stockage. Les portes métalliques sont souvent préférées aux portes en bois car elles sont plus résistantes. Dans le cas de portes en bois, il est indispensable de recouvrir la partie inférieure de la face externe d'un feuillard métallique pour les protéger de l'attaque des rongeurs (chapitre 8).

Les ouvertures d'aération

Les ouvertures d'aération sont indispensables pour assurer le renouvellement de l'air et réduire les risques d'échauffement à l'intérieur du magasin. Elles jouent également le rôle de fenêtres en assurant un éclairage naturel. Les aérations basses sont à proscrire car elles présentent plus d'inconvénients que d'avantages avec des risques d'entrées d'eau, de rongeurs...

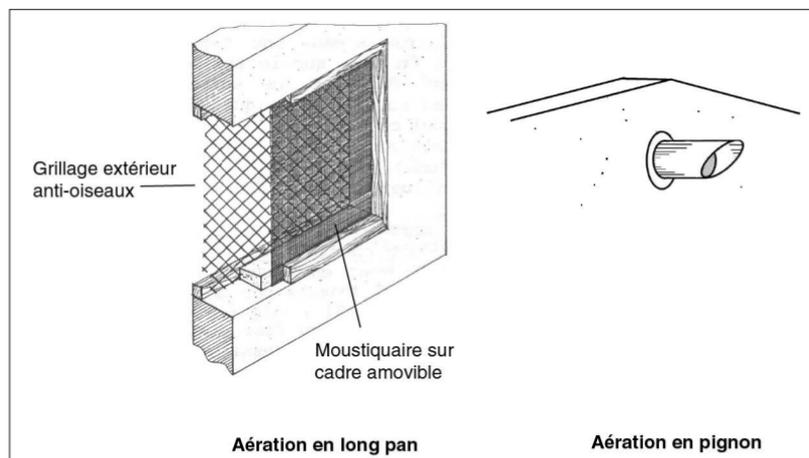


Figure 5.4. Aérations de magasins équipées de protections (d'après Cruz *et al.*, 1989).



Les aérations doivent être placées en partie haute des murs en long pan pour être protégées des pluies par l'avancée du toit. Elles doivent être en nombre suffisant (deux par travée) et de taille suffisante (au minimum 40 cm × 80 cm) pour jouer un rôle efficace.

Ces ouvertures doivent être équipées extérieurement d'un grillage anti-oiseaux et intérieurement d'une moustiquaire fixée sur un cadre amovible pour faciliter le nettoyage. La figure 5.4 montre que l'espace entre ces deux protections doit être suffisant (au moins 10 cm) pour éviter que les oiseaux ne viennent picorer les insectes retenus prisonniers dans la moustiquaire.

En haut des pignons, le magasin doit être pourvu d'une petite aération, également protégée par un grillage et une moustiquaire, pour évacuer l'air chaud et humide qui pourrait s'accumuler sous le faîtage du toit.

La toiture

La charpente des magasins est souvent réalisée en treillis métalliques. Les fermes sont ainsi constituées d'un entrait et d'arbalétriers en fers profilés reliés par un treillis de fers cornières soudés ou fixés au moyen de boulons ou de rivets. La charpente peut également être en bois, mais ce matériau est moins facile à entretenir et constitue un refuge pour les insectes déprédateurs. Les charpentes métalliques permettent des portées plus importantes que les fermes en bois. Il existe également des fermes portiques métalliques regroupant poteaux et charpentes mais elles sont rarement disponibles localement (Cruz *et al.*, 1988).

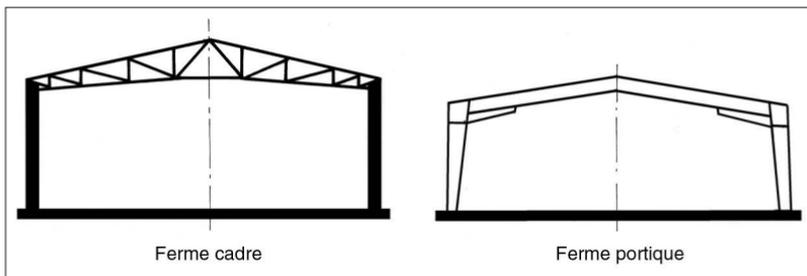


Figure 5.5.
Différents types de fermes métalliques.

Les pannes métalliques sont disposées longitudinalement et permettent d'espacer les fermes de 7 à 8 m alors que des pannes en bois limitent l'espacement entre fermes à 4 ou 5 m. Pour les bâtiments dont la

largeur dépasse 5 m il est conseillé de prévoir un toit à deux pans avec une pente suffisante d'au moins 15 % pour favoriser l'évacuation des eaux de pluies.

La couverture des bâtiments est souvent réalisée en matériau léger comme les tôles d'acier galvanisé ou d'aluminium. Les plaques en fibrociment sont plus isolantes que les tôles mais moins aisées à poser car elles sont plus lourdes et plus fragiles. Lors de la pose il faut un recouvrement d'au moins 20 cm sur la longueur et d'une onde en largeur. La jonction entre le haut des murs et le toit doit être très soignée pour assurer une bonne étanchéité et éviter l'entrée de déprédateurs (oiseaux, rongeurs, insectes).

Comme cela a été rappelé précédemment, il est nécessaire de prévoir un débordement de toiture d'environ 1 m pour protéger correctement les ouvertures d'aération et les murs des pluies et du rayonnement solaire direct. Du côté des portes, le débordement du toit peut atteindre plusieurs mètres de manière à couvrir totalement l'aire de travail (figure 5.6).

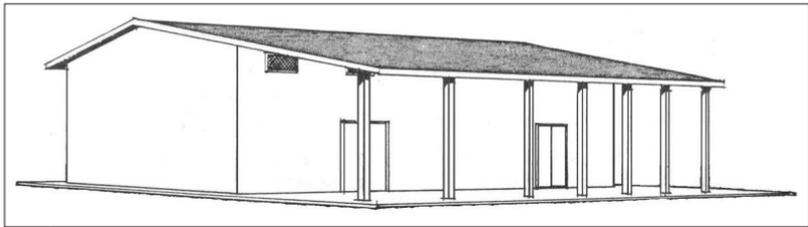


Figure 5.6.

Magasin avec aire couverte en long pan (d'après Cruz *et al.*, 1989).

Le sol du magasin

Le sol du magasin doit être réalisé après la pose du toit pour éviter que le rayonnement solaire direct n'entraîne une prise trop rapide du béton lors du coulage de la dalle. Un grand soin doit être porté à la réalisation du sol du magasin pour qu'il résiste à la charge des piles de sacs et pour éviter les remontées d'humidité du terrain sous-jacent. Sur le terrain compacté, on prépare une première couche de base, on la recouvre d'un béton de propreté puis on place un écran imperméable à l'eau (film de polyéthylène 150 μm ...) pour éviter les remontées capillaires et enfin on coule une dalle de béton armé (figure 5.7). Cette dalle doit comporter des joints de dilatation pour éviter d'éventuelles fissurations toujours difficiles à contrôler (refuge



pour les insectes). En finition, la dalle peut recevoir une chape de béton lissé de quelques centimètres.

Certains préconisent de construire des magasins avec dalle sur vide sanitaire afin que le sol soit surélevé de 1,2m pour faciliter le déchargement des camions. Cette solution se justifie rarement car elle est très onéreuse et peut entraîner un surcoût de construction d'environ 40 %.

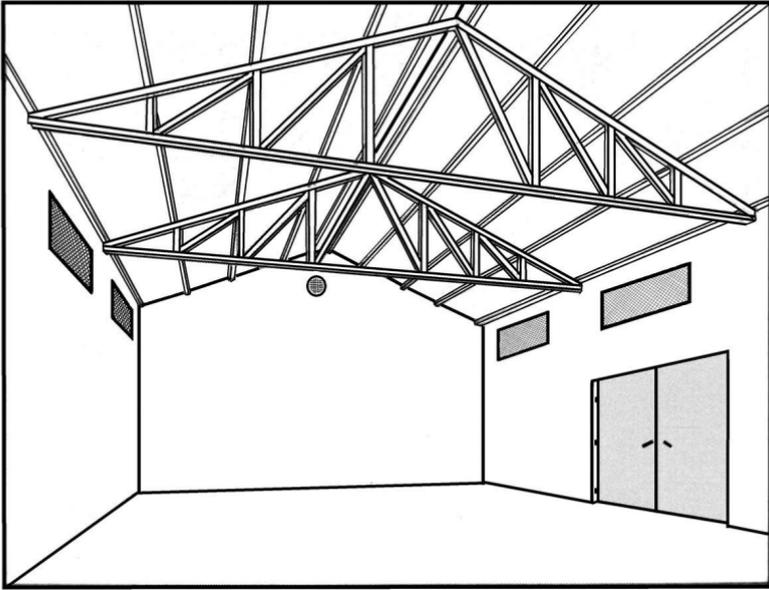


Figure 5.7.

Vue de l'intérieur d'un magasin de stockage.

Aménagement extérieur

La livraison et l'expédition des sacs de grains se fait habituellement par des charrettes, des remorques attelées à un tracteur ou par des camions. Le magasin de stockage doit être entouré d'une concession vaste et encluse permettant l'accès de ces différents véhicules de transport en toute saison. La concession doit être protégée des eaux de ruissellement par des fossés de drainage régulièrement entretenus. Enfin les abords des magasins doivent être entretenus régulièrement en maintenant tout autour des bâtiments une large bande de terrain parfaitement propre et exempte de toute végétation (arbre, broussailles...) ou de tout dépôt pour limiter la prolifération et l'attaque des rongeurs.

Équipements des magasins de stockage en sacs

Les magasins de stockage des grains en sacs doivent être équipés de matériels de base nécessaires à la bonne gestion technique des stocks.

▮ Les sacs et les palettes

Les sacs pour le conditionnement des grains

Pour éviter la contamination d'un stock correctement conservé, un magasin doit pouvoir disposer d'un lot de sacs neufs afin de reconditionner tous les emballages défectueux ou douteux (sacs endommagés, sacs infestés...) repérés lors des livraisons. Les sacs utilisés pour le stockage des denrées sont des sacs traditionnels en fibres végétales (jute, sisal, coton, lin ou chanvre) ou des sacs en plastique plus récents en polypropylène tissé. Le choix de tel ou tel type de sacs est important car il détermine la hauteur des piles de sacs et la capacité réelle du magasin.

Aujourd'hui seuls les sacs en jute et les sacs en polypropylène tissé sont d'une utilisation courante. Les sacs en coton sont encore utilisés pour le conditionnement de produits transformés comme la farine et le sucre alors que les sacs de lin ou de chanvre, d'un coût prohibitif, ont pratiquement disparu. Les sacs en sisal sont parfois utilisés pour le stockage des grains (café...) dans les pays où l'on produit cette fibre végétale comme le Brésil, la Tanzanie ou le Kenya. Dans la plupart des pays du Sud, les sacs de jute sont utilisés pour le conditionnement des grains. Importé ou fabriqué localement à partir de fibres produites en Inde ou au Bangladesh, le sac de jute est de plus en plus concurrencé par le sac en polypropylène tissé (tableau 5.2). Mais l'interdiction des emballages en plastique dans un nombre grandissant de pays pourrait donner un

Tableau 5.2. Comparaison des caractéristiques des sacs de jute et des sacs en polypropylène tissé.

Caractéristique	Sac de jute	Sac de polypropylène tissé
Hauteur d'empilement	Importante (jusqu'à 6 m)	Faible (limitée à 3 m)
Glissement	Faible	Important
Résistance mécanique	Bonne	Très bonne
Résistance aux ultra-violets	Bonne	Mauvaise
Résistance à l'humidité	Putrescible	Imputrescible
Biodégradabilité	Oui	Non



nouvel essor aux sacs en fibres végétales, réputés plus écologiques. Le conditionnement de certains produits de qualité comme les fèves de cacao, le café, etc. est réalisé exclusivement en sacs de jute.

Les palettes pour l'édification des piles

Il est souvent préférable de ne pas édifier les piles de sacs directement sur le sol du magasin. C'est le cas dans les régions humides ou lorsque des remontées d'humidité et des risques d'entrée d'eau dans le magasin sont à craindre. Les palettes, souvent réalisées en bois, sont utilisées comme plateformes de base à l'édification des piles de sacs. Ces palettes dont la gestion et la mise en place sont toujours contraignantes doivent être suffisamment légères pour être facilement manipulables par un seul opérateur et leurs dimensions doivent être adaptées aux dimensions du magasin. On conseille habituellement de limiter leurs dimensions à $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ ou $1,5\text{ m} \times 2\text{ m}$ comme cela est illustré en figure 5.8. Dans l'exemple du magasin schématisé en figure 5.3, il faut 200 palettes de $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ pour édifier les 6 piles de sacs.

Lors de la vidange même partielle du magasin, les palettes doivent être correctement nettoyées et traitées pour ne pas servir de refuge aux insectes. Elles peuvent être stockées dans un local spécialement réservé à cet effet. Dans l'exemple précédent, 200 palettes représentent un volume d'environ 70 m^3 soit un espace d'au moins 35 m^2 si on stocke les palettes sur 2 m de hauteur.

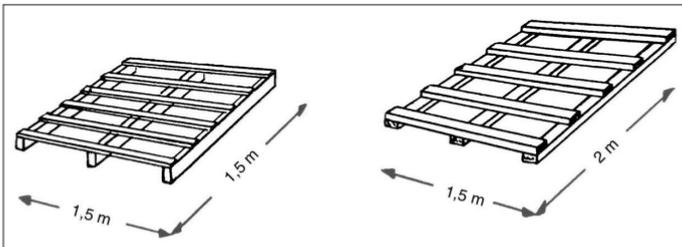


Figure 5.8.

Palettes pour équiper les magasins de stockage des grains.

▮ Les matériels de pesée

À la livraison comme à l'expédition, il est indispensable de procéder à un contrôle du poids des denrées réceptionnées ou expédiées. Dans les magasins on utilise habituellement des balances mécaniques de portée égale à 200 kg dont le nombre dépend du volume des stocks

(figure 5.9). Pour les centres de stockage plus importants, on peut recommander l'utilisation de pèse-roues ou pèse-essieux électroniques utilisables sur tracteurs, remorques ou poids lourds pour des portées variant de 5 à 20 tonnes.

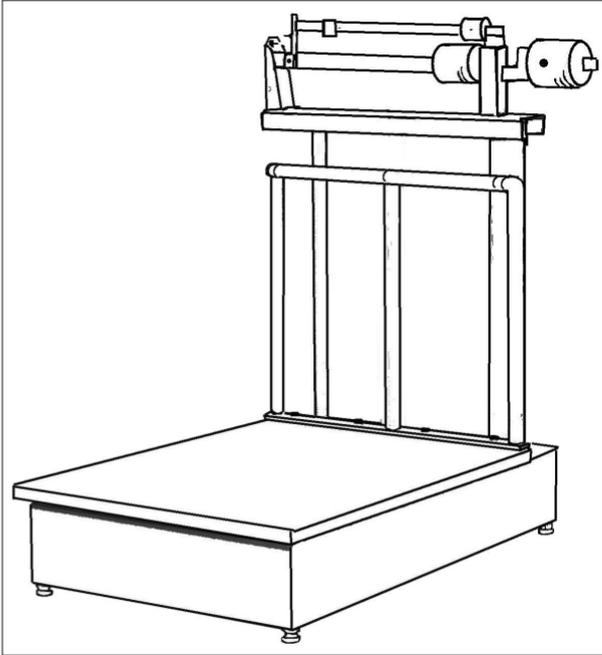


Figure 5.9.
Bascule
mécanique.

Dans les très grands centres de stockage regroupant plusieurs magasins importants on utilise des ponts bascules qui ont des portées de plusieurs dizaines de tonnes. Ces équipements sont onéreux et nécessitent une infrastructure particulière, comme une fosse de 1,5m de profondeur pour recevoir le mécanisme de pesée. Tous ces matériels doivent être périodiquement contrôlés par les services des poids et mesures.

▮ Les matériels de manutention

Le diable minotier

Dans les pays du Sud, la manutention des sacs est souvent effectuée à dos d'homme par des équipes de manœuvres. Pour limiter la fatigue des travailleurs, on peut recommander l'utilisation de diables minotiers (figure 5.10) qui permettent le transport des sacs à l'unité. Ces petits matériels très pratiques sont en bois ou en métal.



Le monte-sac mobile

L'édification des piles de sacs est une opération qui doit être réalisée avec un grand soin pour que les piles soient stables. Les piles sont souvent réalisées en escalier pour permettre de monter les sacs aux niveaux supérieurs. Cette charge de travail, très pénible, peut être allégée par l'utilisation d'un petit élévateur de sacs fonctionnant avec un moteur électrique ou thermique comme illustré en figure 5.11. Ce matériel qui ne requiert qu'une faible surface au sol, est très pratique pour les petits magasins dans lesquels il n'est pas possible d'utiliser les convoyeurs de sacs de type « sauterelle » trop volumineux.

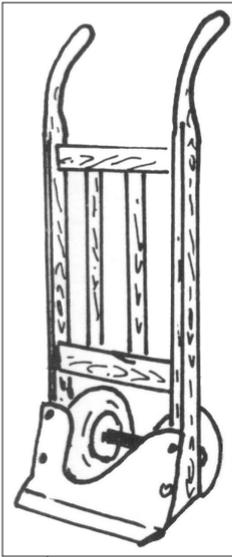


Figure 5.10.
Diable minotier
en bois.

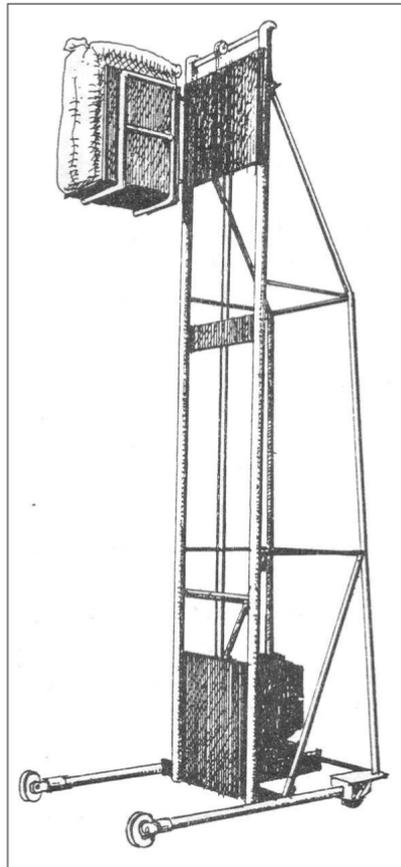


Figure 5.11.
Monte-sac mobile
(d'après Cruz et al., 1989).

Le convoyeur de sacs ou « sauterelle »

Le convoyeur de sacs, appelé aussi « sauterelle », est un matériel fréquemment utilisé pour l'édification des piles de sacs notamment dans les grands entrepôts. L'équipement représenté en figure 5.12 est constitué d'un tablier inclinable de 6 à 10m de long supportant une bande caoutchouc de 50 à 60cm de large généralement garnie de barrettes transversales. L'ensemble est monté sur un chariot mobile muni de bras verticaux permettant le réglage de l'inclinaison du tablier au moyen d'un treuil. La bande transporteuse est entraînée par un moteur thermique ou électrique de 1 à 3kW. Le convoyeur de sacs assure un bon débit de manutention car il peut être chargé de plusieurs sacs à la fois. Mais son emprise au sol est importante et, pour les petits magasins, on lui préfère alors le monte-sac décrit précédemment.

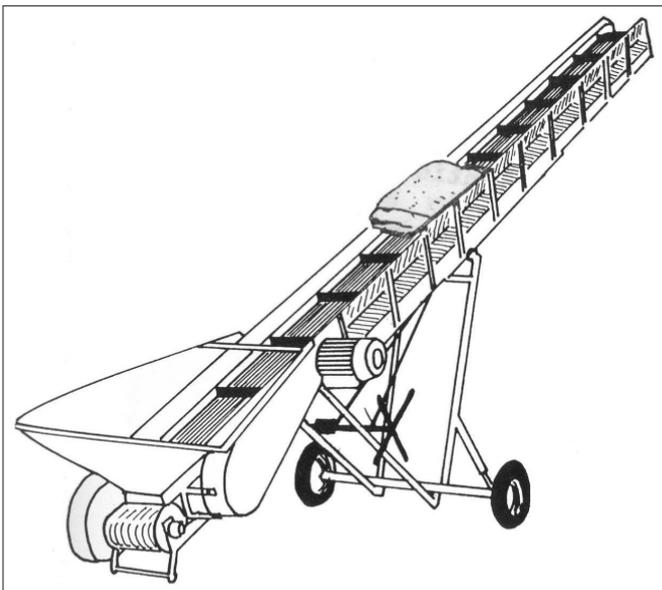


Figure 5.12.
« Sauterelle » (d'après Ceemat).

▮ Les matériels d'analyse et de traitement

Petits matériels de contrôle des stocks

Même pour les petits magasins, il est essentiel de disposer de quelques matériels permettant le contrôle des stocks par le prélèvement



d'échantillons (voir cahier couleur, photo 30) : sonde à sacs pour prises d'échantillons (photo 5.1), petite balance, humidimètre (photo 5.2), thermomètre ou sonde thermométrique, jeu de différents tamis, loupe.



Photo 5.1.

Sondes à sacs (© Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 5.2.

Humidimètres portatifs (© Jean-François Cruz, Cirad).

Matériels de traitement des stocks et des locaux

Le magasinier doit pouvoir disposer de matériels de traitement des grains et des locaux par des insecticides de contact tels que poudreuse, pulvérisateur... et parfois de matériels de base nécessaires aux fumigations (bâches étanches...).

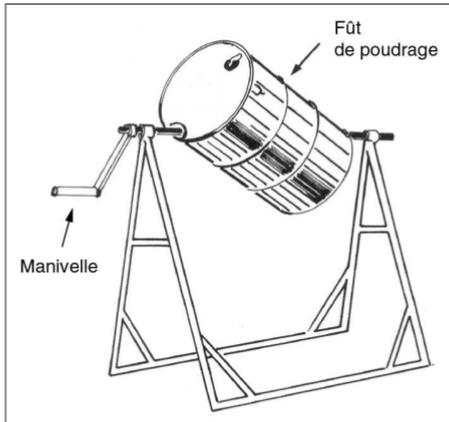


Figure 5.13.
Poudreuse « baratte »
(d'après Ceemat).

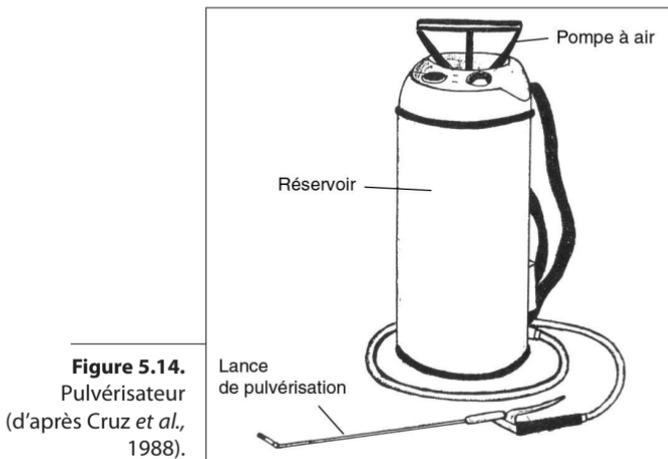


Figure 5.14.
Pulvérisateur
(d'après Cruz *et al.*,
1988).

Matériels de nettoyage et de reconditionnement des produits

Au niveau des centres de stockage, il peut être nécessaire de reconditionner une partie des livraisons si l'analyse des produits livrés révèle une qualité médiocre des grains (humidité trop élevée, impuretés



excessives...) ou des emballages (voir cahier couleur, photo 28). Équiper un centre de stockage d'une unité de nettoyage et de reconditionnement des produits permet alors d'éviter que les stocks déjà en place ne soient pollués par une livraison de qualité douteuse.

Une telle chaîne de reconditionnement schématisée en figure 5.15 peut être constituée des matériels suivants : une vis d'alimentation ou petit élévateur avec trémie de vidange des sacs, un nettoyeur séparateur plan ou un crible rotatif, une seconde vis d'alimentation avec traitement insecticide (au niveau de la trémie), un peseur ensacheur, une couseuse de sacs.

Le fonctionnement d'une unité de reconditionnement nécessite de disposer de courant électrique (réseau ou groupe électrogène).

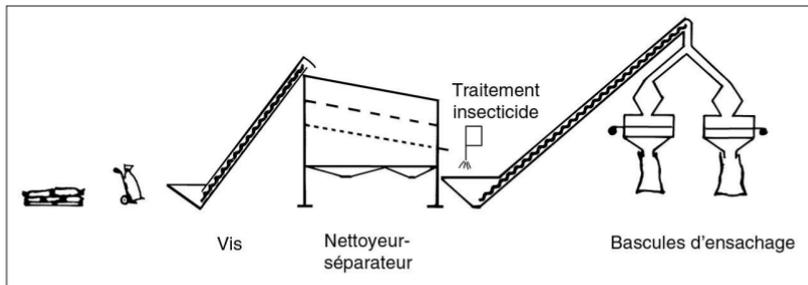


Figure 5.15.

Schéma d'une chaîne de reconditionnement.

Mise en place et gestion technique des stocks de grains

▮ Quelques règles de base de la gestion technique des stocks

Certaines règles générales sont à respecter pour faciliter la gestion technique des stocks.

- Connaître la capacité du magasin selon le nombre de piles que l'on prévoit de mettre en place pour éviter la réception de quantités excédentaires.
- Disposer de locaux sains et correctement protégés contre l'attaque éventuelle des déprédateurs. Au besoin, il faut réparer et nettoyer préalablement les locaux et traiter tout l'intérieur du magasin avec un insecticide de contact.

- Ne réceptionner que des produits sains, propres, suffisamment secs et bien conditionnés. Au besoin, il peut être nécessaire de sécher, nettoyer, traiter et reconditionner les livraisons de qualité douteuse.
- Individualiser les stocks selon le type de produit à conserver.
- Édifier les piles de sacs selon les règles de l'art en vérifiant bien leur stabilité.
- Contrôler périodiquement l'état de conservation des stocks en intervenant si nécessaire (traitement insecticide).
- Assurer une hygiène correcte des stocks des locaux et des abords des magasins pour permettre de bonnes conditions de stockage.
- Réaliser l'entretien et la maintenance des locaux et des équipements.
- Gérer les lots selon la règle du FIFO (*first in, first out*) qui signifie « premier entré, premier sorti ».

▮ La mise en place des stocks

Les palettes doivent être disposées dans les zones prévues pour l'édification des piles de sacs en réservant les allées de manutention et de contrôle. Les sacs, de même taille, sont empilés couche par couche en croisant les arrangements d'une manière qui dépend de la taille des sacs utilisés. La figure 5.16 montre deux modes d'arrangement sur des bases de 3 ou 5 sacs.

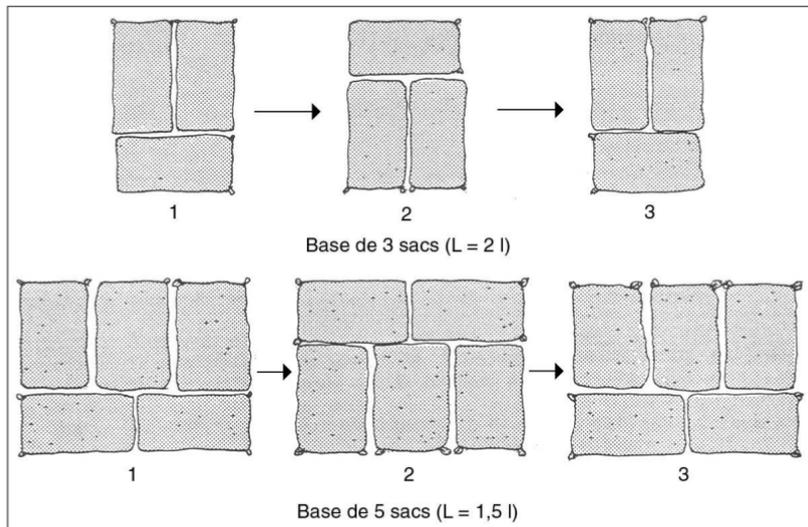


Figure 5.16.
Modes d'arrangement des sacs de grains.



Pour assurer une bonne stabilité des stocks, il est nécessaire que la hauteur d'une pile ne soit jamais supérieure à sa largeur. Il est également préférable de l'édifier de manière à ce que les parois aient une légère inclinaison vers l'intérieur du tas pour les sacs en jute. Pour une pile édifiée de façon régulière et avec un même type de sac, il est aisé de compter les sacs en multipliant le nombre de sacs de la base par le nombre de couches (figure 5.17). Pour les sacs en polypropylène réputés plus glissants, l'inclinaison des parois doit être beaucoup plus prononcée.

Les différentes piles de sacs doivent être clairement identifiées par une fiche précisant la nature du produit, le nombre de sacs soit la quantité stockée, la date de la réception du produit, la date de l'édification de la pile et le nombre et le type de traitements insecticides réalisés. Cette fiche doit être épinglée sur la pile pour être consultable à tout moment et un double doit être conservé au niveau du bureau du magasinier.

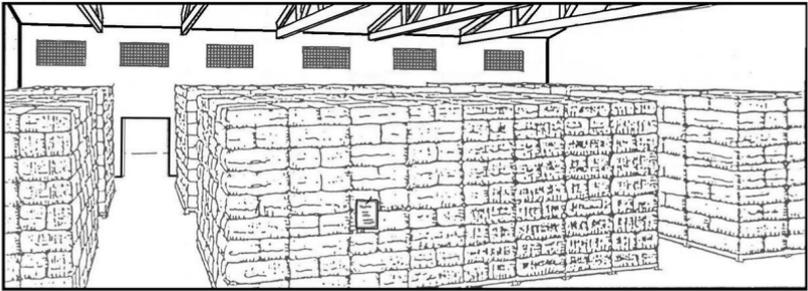


Figure 5.17.

Piles de sacs dans un magasin de stockage de grains.

▮ Le contrôle et l'hygiène des stocks

L'inspection des stocks doit être périodique pour contrôler l'état de conservation des denrées entreposées et l'état des infrastructures et des abords des magasins. Une rapide inspection visuelle journalière des stocks peut permettre de déceler tout problème apparent. Des inspections hebdomadaires ou bimensuelles plus détaillées, avec prélèvements d'échantillons et utilisation d'appareils portatifs (sondes, loupe, sondes thermométriques, humidimètres...) permettent d'identifier l'attaque de déprédateurs (insectes, rongeurs) et l'apparition d'échauffements éventuels. Enfin des inspections mensuelles complètes des stocks, des infrastructures et des abords sont nécessaires pour garantir les meilleures conditions de stockage des grains.

De bonnes conditions de stockage sont avant tout assurées par une hygiène correcte des locaux. Un balayage complet du sol des magasins doit être réalisé fréquemment pour éliminer les poussières qui peuvent constituer des foyers d'infestation par les insectes

Encadré 5.2. Cas particulier du stockage en plein air

Le stockage en plein air est souvent réservé à la constitution de stocks temporaires ou pour la réalisation de stocks d'urgence.

Le stockage de sacs en plein air est fréquemment utilisé dans les régions sèches pour l'entreposage d'arachide ou parfois pour la conservation temporaire de légumineuses comme le niébé ou de céréales (paddy, blé, maïs...). Cette technique est d'une mise en œuvre rapide et a pour principal avantage de ne nécessiter qu'un faible investissement pour la réalisation de la plateforme sur laquelle sont empilés les sacs (parpaings de ciment, palettes en bois...). Dans les zones présentant des risques de pluies éparses, il est évidemment nécessaire de recouvrir les pyramides de sacs par des bâches étanches à l'eau (photo 5.3).

Cette technique de stockage ne peut être que temporaire car elle n'offre aucune protection contre l'attaque des insectes ou des rongeurs. Lorsque les piles de sacs sont bâchées, les phénomènes de transferts de vapeur d'eau peuvent être importants avec une humidification des grains situés en partie supérieure des piles et des risques importants de condensation et de développement de moisissures. Pour éviter ces phénomènes il est alors essentiel de ne stocker que des grains très secs (< 11 %).



Photo 5.3.

Stockage de grains sous bâches en Chine (© Jean-François Cruz, Cirad).



(figure 5.18). Les balayures récupérées ne doivent pas être simplement jetées à l'extérieur du magasin mais détruites par le feu afin d'éliminer les larves ou les insectes adultes qui pourraient s'y trouver. L'observation des balayures peut renseigner sur l'état de conservation des stocks. La présence de beaucoup de grains signifie que des sacs sont endommagés (coutures défectueuses, attaque de rongeurs) et l'observation de crottes de rongeurs est un indice évident d'une attaque de souris ou de rats.

Tous les mois, le nettoyage des locaux doit être plus poussé et concerner les murs, la charpente..., et les abords des entrepôts doivent être parfaitement entretenus par fauchage, débroussaillage et en évacuant tous les dépôts d'objets.

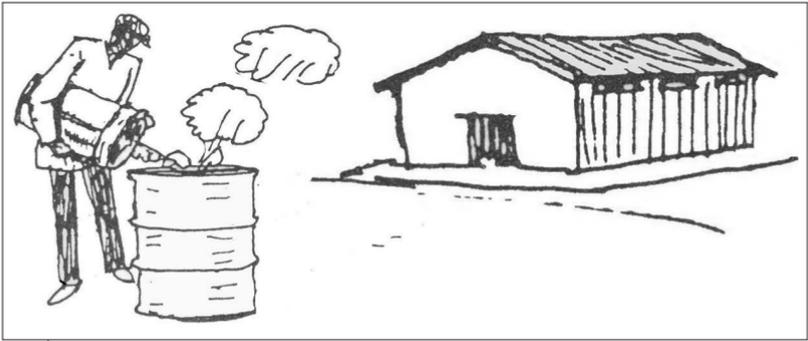


Figure 5.18.

Brûlage des balayures (d'après Cruz *et al.*, 1989).



Photo 1.

Comparaison de la taille de différents grains de céréales
(© Jean-François Cruz, Cirad).

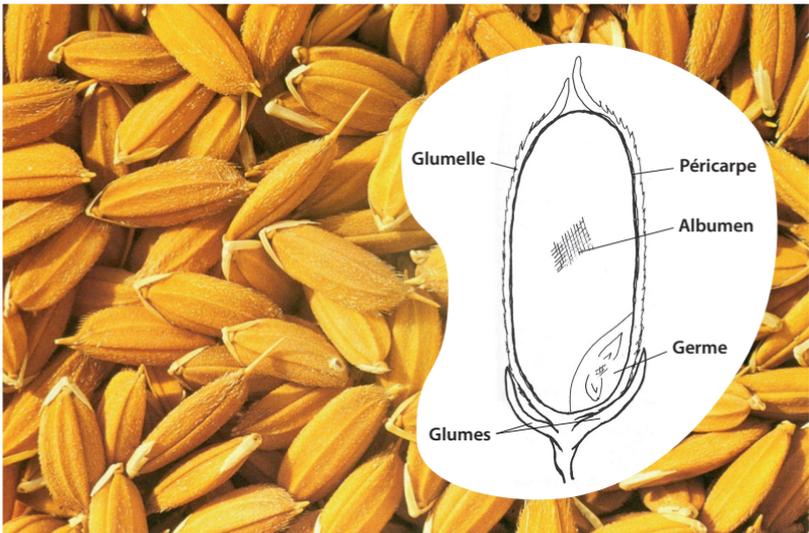


Photo 2.

Grains de riz paddy (© Christian Poisson) et structure (© Jean-François Cruz, Cirad).
(Longueur du grain = 10 à 15 mm)

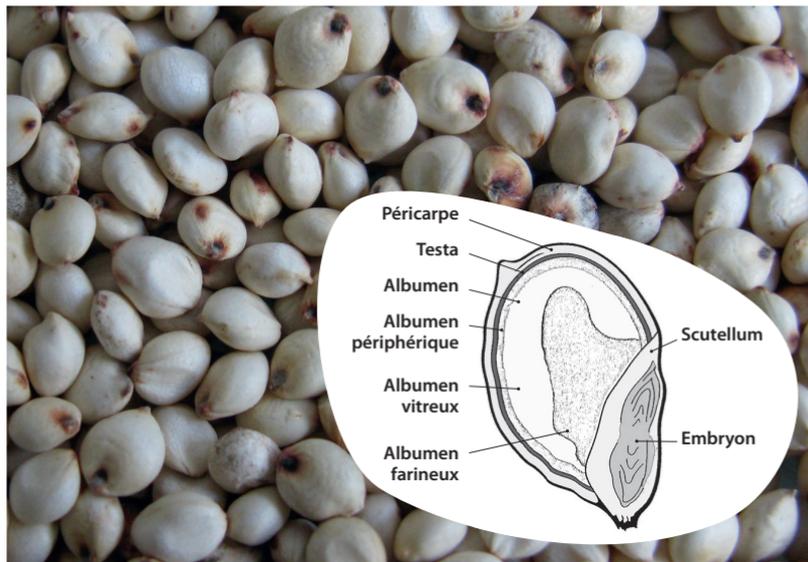


Photo 3.

Grains de sorgho blanc (© Jean-François Cruz, Cirad)

et structure (© Jean-Claude Miche, Cirad).

(Longueur du grain = 4 à 5 mm)

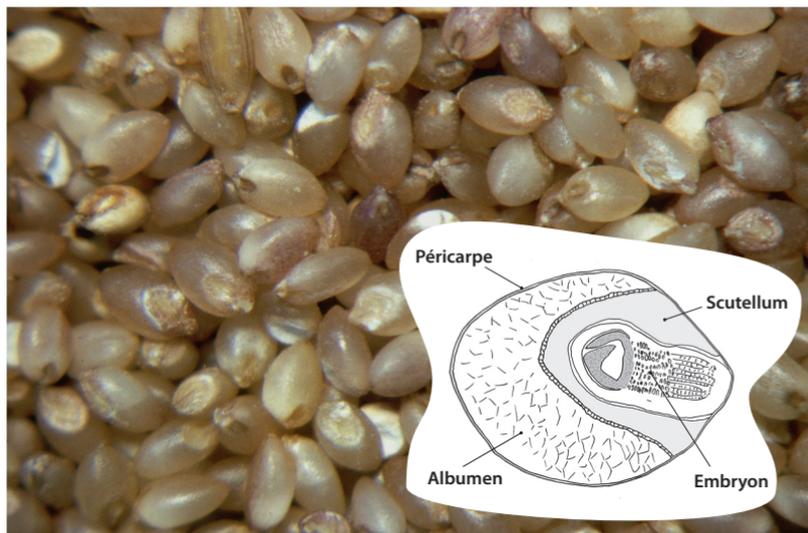


Photo 4.

Grains de fonio décortiqué et structure (©Jean-François Cruz, Cirad).

(Longueur du grain = 1,4 à 1,5 mm)



Photo 5.

Attaque de moisissures sur des épis de maïs stockés en crib
(© Francis Troude, Cirad).



Photo 6.

Altérations de sacs de riz (© Francis Troude, Cirad).



Photo 7.
Attaque de charançons (*Sitophilus zeamais*) sur un sac de maïs (© Michel Rivier, Cirad).



Photo 8.
Niébé attaqué par les bruches (*Callosobruchus maculatus*) (©Jean-François Cruz, Cirad).
(Longueur du grain = 7 à 8 mm)



Photo 9.
Séchage d'épis de maïs avec spathes en Afrique (© Francis Troude, Cirad).



Photo 10.
Séchage d'épis de maïs sur un toit aux Îles du Cap Vert (© Jean-François Cruz, Cirad).

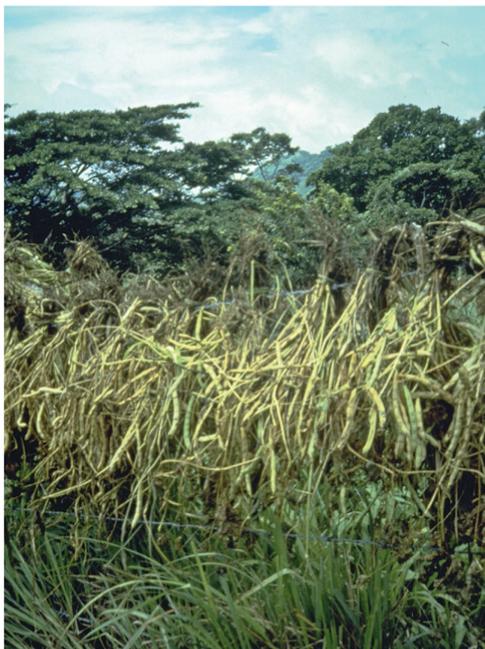


Photo 11.
Séchage de haricots en gousses sur fil au Nicaragua
(© Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 12.
Crib amélioré pour le séchage-stockage du maïs en Équateur
(© Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 13.

Aire de séchage du riz paddy en Indonésie (© Francis Troude, Cirad).



Photo 14.

Claies de séchage du café au Burundi (© Didier Snoeck, Cirad).



Photo 15.

Cases de séchage du riz paddy aux Comores (© Francis Troude, Cirad).



Photo 16.

Séchoir moderne (© Francis Troude, Cirad).



Photo 17.
Meule de gerbes de riz paddy en Côte d'Ivoire
(© Alfred Groos, Ceemat).



Photo 18.
Paillol : stockage de gerbes de riz en Amazonie brésilienne (© Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 19.
Grenier *ebliwa* pour le stockage du maïs au Togo (© Francis Troude, Cirad).



Photo 20.
Greniers en paille au Burkina Faso (© Thierry Ferré, Cirad).



Photo 21.
Greniers en terre
au Burkina Faso
(© Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 22.
Grenier traditionnel en Indonésie (© Guy Trébul, Cirad).



Photo 23.
Greniers traditionnels en pays Dogon au Mali (© Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 24.

Cellule métallique pour améliorer le stockage en Bolivie
(© Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 25.

Essai de stockage en atmosphère confinée en Côte d'Ivoire à l'Ensa d'Abidjan
(© Francis Fleurat-Lessard, Inra).



Photo 26.

Magasins traditionnels de stockage en Chine (©Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 27.

Intérieur d'un magasin moderne de stockage au Mozambique (© Francis Troude, Cirad).



Photo 28.
Vis pour le reconditionnement des sacs (© Francis Troude, Cirad).



Photo 29.
Bande transporteuse pour les grains en vrac (© Francis Troude, Cirad).



Photo 30.

Prélèvement d'un échantillon par sondage des sacs en Équateur
(© Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 31.

Sonde manuelle motorisée pour échantillonnage (© Francis Troude, Cirad).



Photo 32.

Silo avec cellules métalliques boulonnées en Afrique (©Jean-François Cruz, Cirad).



Photo 33.

Silo métallique soudé en Côte d'Ivoire (© Francis Troude, Cirad).



Photo 34.

Silo béton à Port la Nouvelle, France (© Les silos du Sud).



6. Le stockage en vrac

Importance du stockage en vrac

Le stockage en vrac est le mode de stockage le plus fréquemment utilisé dans les pays du Nord. En France, par exemple, ce sont plus de 50 millions de tonnes de grains qui sont stockés dans des silos en vrac par les coopératives agricoles. Dans de nombreux pays du Sud, où l'emploi du sac reste prédominant, cette technique est encore peu répandue. Cependant, dans certains pays émergents la mécanisation de l'agriculture s'est fortement accrue au cours des dernières décennies et l'augmentation des quantités produites oblige alors les grands producteurs à s'orienter vers des systèmes post-récolte mécanisés de type vrac comme dans les pays du Nord.

Dans beaucoup de pays qui disposent de zones portuaires par où transitent les importations ou les exportations de céréales il apparaît également indispensable de substituer le vrac au sac pour faciliter la manutention et assurer des bons coefficients de rotation des stocks. Partout, l'urbanisation croissante génère des pôles de consommation importants nécessitant des industries de transformation des denrées alimentaires. Ces grandes industries alimentaires que sont les rizeries, les semouleries, les minoteries, les brasseries qui traitent annuellement plusieurs milliers de tonnes de grains font souvent appel au vrac pour le stockage des matières premières.

Le choix entre le sac et le vrac doit tenir compte du contexte et des contraintes locales et le passage du sac au vrac qui, pour beaucoup de pays du Sud, représente une mutation importante, se fait beaucoup plus lentement qu'on ne le supposait dans les années 1980. Le stockage en vrac n'est qu'un élément de l'ensemble du système post-récolte qui comprend la livraison, la manutention, le nettoyage, le séchage, la ventilation, le traitement, l'expédition des grains et des étapes en amont comme la récolte et le transport. Dans les pays du Sud, certains échecs survenus lors d'expériences passées sont souvent liés à l'oubli d'une séquence du système.

Silos de stockage

Pour certains, le terme «silo» viendrait de la ville biblique de Siloh aujourd'hui Khirbat Seilun située au nord de Jérusalem et qui devait être un important centre céréalier de l'Antiquité. Pour d'autres, il s'agit d'un terme espagnol signifiant «fosse à grains».

▮ Les cellules de petite capacité

Les petits silos que constituent certains greniers villageois et les petites cellules de stockage amélioré en ciment ou métalliques ont été décrits au chapitre 4. Leur capacité varie de quelques centaines de kilogrammes à quelques tonnes.

Pour les plus grandes capacités d'une dizaine à une cinquantaine de tonnes, il existe des cellules dites fermières construites le plus souvent en tôle ondulée. L'intérêt de telles cellules est de pouvoir être érigées facilement par simple boulonnage de plaques préfabriquées. Les panneaux constituent alors des viroles qui sont assemblées avec des joints d'étanchéité sur une hauteur voisine de 4m. Compte tenu des contraintes exercées par le frottement des grains, il est nécessaire de renforcer les parois par des armatures extérieures verticales scellées au sol (figure 6.1). En général, les cellules sont ouvertes en partie supérieure et sont placées à l'intérieur d'un bâtiment ou sous un hangar mais elles peuvent être équipées d'un toit pour être disposées à l'extérieur.

Certains constructeurs proposent des cellules carrées ou rectangulaires constituées de panneaux soudés type palplanche qui ont l'avantage de mieux occuper la surface au sol sous abri que les cellules rondes mais qui sont généralement plus coûteuses. On peut également construire des petites cellules en bois (madriers, lames de parquet) ou en parpaings de ciment revêtus d'un enduit mais dont la hauteur est limitée à 2m ou 2,5m (figure 6.2). Des tirants intérieurs équilibrent la poussée des grains.

Certains fabricants commercialisent aussi des petits silos en résine de polyester parfois additionnées de fibres de verre pour des capacités de stockage de 5 à 20 tonnes (figure 6.3). Ces petites cellules peuvent servir au stockage des grains mais sont souvent utilisées pour le stockage de produits type aliment du bétail (pulvérulents ou pellets) dans les unités d'élevage. Le chargement de ces cellules est souvent pneumatique.

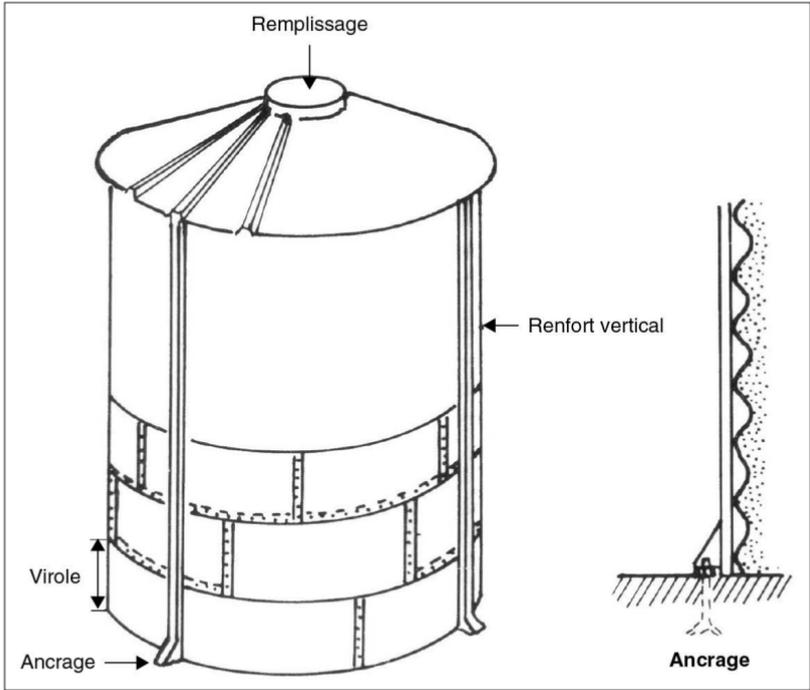


Figure 6.1.
Cellule fermière (d'après Ceemat).

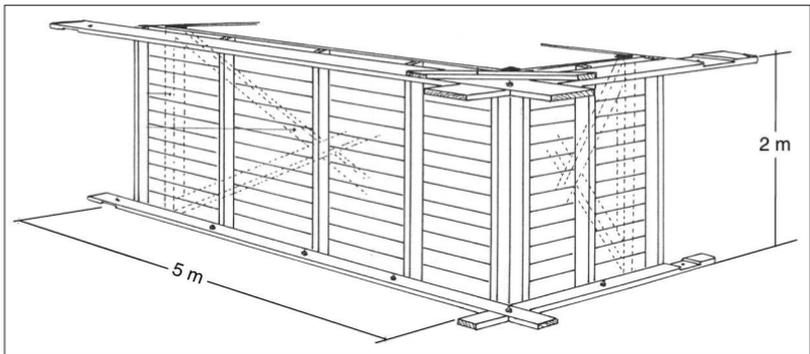


Figure 6.2.
Cellule rectangulaire en bois (d'après Cruz *et al.*, 1988).

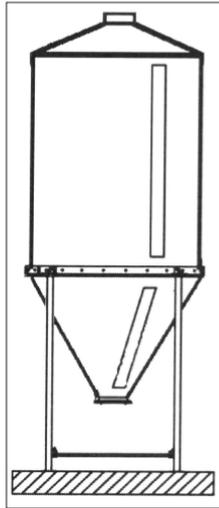


Figure 6.3.
Cellule en résine
de polyester.

▮ Les silos de grande capacité

Les silos de grande capacité sont des installations agricoles ou industrielles qui permettent de stocker de 500 tonnes à plusieurs centaines de milliers de tonnes. Extérieurement, ils apparaissent comme un ensemble de cellules auquel est accolée une tour de manutention et de traitement (figure 6.4).

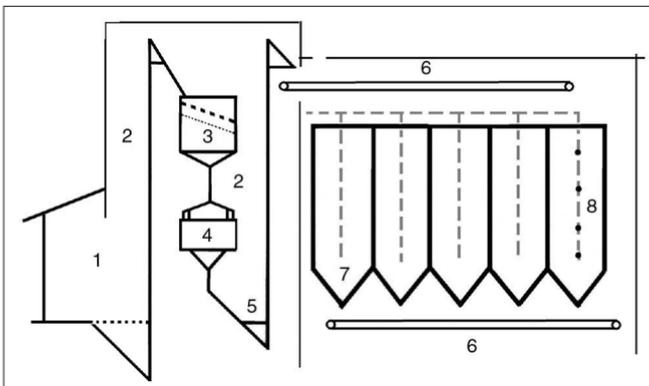


Figure 6.4.

Schéma d'une installation de stockage en vrac.

1. Fosse ou trémie de réception des grains – 2. Élévateurs – 3. Système de nettoyage
4. Système de pesage – 5. Traitement – désinsectisation – 6. Transporteurs horizontaux
7. Cellules de stockage – 8. Silothermométrie



Ces installations disposent généralement d'un poste de réception et d'expédition, de dispositifs de manutention (élévateurs, transporteurs horizontaux), d'équipements de nettoyage et de dépoussiérage, de matériels de pesée et de traitements insecticides, de systèmes de séchage et de cellules de stockage équipées de systèmes de ventilation.

Principaux types de silos

Il existe différents types de structures pour le stockage des grains en vrac parmi lesquels on distingue les silos verticaux et les silos horizontaux. Le choix de tel ou tel modèle n'est pas simplement technique mais résulte souvent d'un bon compromis technico-économique.

▮ Les silos verticaux

Dans les zones portuaires où l'espace est limité, le coût du terrain élevé et le coefficient de rotation des stocks souvent important, le choix porte généralement sur la construction de silos verticaux, de faible emprise au sol, qui permettent des débits de manutention élevés grâce à une vidange gravitaire des cellules de stockage.

Les silos métalliques

Cette technique est fréquemment utilisée car elle s'adapte à tous les besoins en termes de capacité de stockage par la mise en œuvre de petits ou de très grands centres de stockage.

Les silos métalliques légers

Ces silos sont constitués de cellules métalliques en tôles d'acier galvanisé ou d'aluminium, ondulées ou planes (voir cahier couleur, photo 32).

Les principaux avantages de cette technique sont les suivants :

- production standard et facilité de transport en pièces détachées;
- large gamme de capacités;
- construction légère nécessitant peu de génie civil;
- rapidité et facilité de montage.

Les cellules en tôle ondulée sont très en vogue car elles sont très faciles à construire. Les tôles cintrées et percées en usine sont boulonnées entre elles et sur des renforts verticaux régulièrement répartis (figure 6.5). Le montage des cellules est effectué en utilisant un mat central qui permet de soulever le toit puis les viroles successives au

fur et à mesure de leur assemblage. L'étanchéité entre les tôles est assurée par un joint dont la mise en place au cours du montage doit être particulièrement soignée pour les cellules construites à l'extérieur. Les diamètres des cellules à fond plat utilisées pour la réalisation de silos industriels varient habituellement de 3 à 30 m pour des hauteurs de 5 à 25 m. Pour un stockage extérieur où l'emprise au sol n'est pas une contrainte importante, ce sont en général les cellules de forme aplatie, où la hauteur est inférieure au diamètre, qui ont une meilleure capacité maximum par rapport à la superficie des parois et du toit. Ce choix nécessite cependant des systèmes de vidange plus importants qu'avec des cellules hautes et de moindre diamètre.

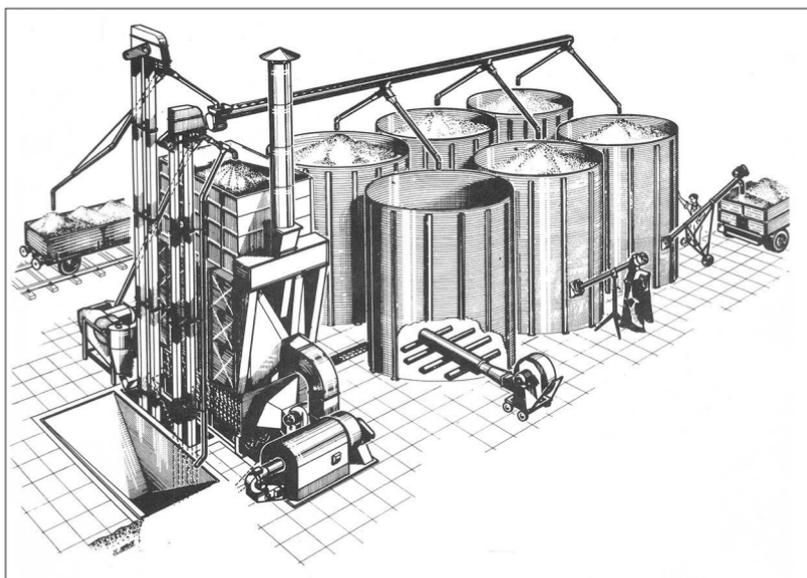


Figure 6.5.
Schéma d'un silo métallique léger (d'après doc BCMEA).

Un cas particulier est représenté par les silos métalliques spirales, autrefois qualifiés de silos Lipp. Ces cellules sont constituées à partir d'un ruban d'acier galvanisé déroulé en spirale et serti bord à bord au fur et à mesure de leur édification. Une machine spéciale permet de dérouler la bobine de métal et de serti les tôles. Ce procédé permet de réaliser des cellules cylindriques de 5 à 20 m de diamètre et jusqu'à 20 m de hauteur mais nécessite l'emploi d'une main-d'œuvre qualifiée et d'un équipement spécial.



Les silos métalliques type palplanche

Ces silos sont constitués de cellules à sections carrées ou rectangulaires ou même parfois polygonales avec des tirants intérieurs. Les cellules sont réalisées à partir d'éléments métalliques préfabriqués, soudés ou boulonnés. Chaque élément est constitué d'une tôle d'acier à ondes horizontales en profil oméga de type palplanche et rigidifiée par des flasques latéraux comme illustré en figure 6.6. Les panneaux ont des dimensions variables avec une largeur de 2 à 4 m et une longueur pouvant atteindre 10 m.

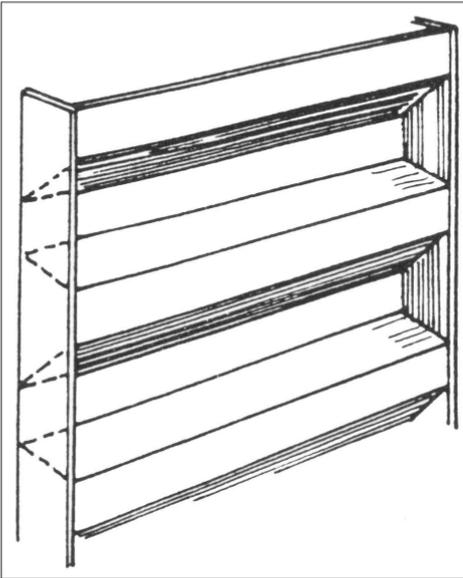


Figure 6.6.
Tôle palplanche.

Certains silos sont construits avec un acier spécial dit autopatinable pour mieux résister à la corrosion atmosphérique. Exposé aux intempéries, cet acier développe une fine couche protectrice d'oxyde couleur rouille qui le protège contre une corrosion plus avancée (voir cahier couleur, photo 33).

La construction des silos métalliques type palplanche est plus complexe et souvent plus onéreuse que celle des silos métalliques légers notamment lorsque les tôles d'acier sont assemblées par soudure (figure 6.7). Elle nécessite des moyens de montage plus importants et un personnel très qualifié pour la réalisation des joints par soudure. Cette technique permet cependant l'obtention de structures étanches lorsque l'on souhaite mettre en œuvre un stockage spécial sous gaz inerte.

Pour les silos de plus de 25 à 30m, les cellules métalliques nécessitent la mise en œuvre de renforts verticaux importants pour éviter leur effondrement lors de la vidange et la rentabilité des installations n'est plus assurée. On a alors recours aux silos en béton armé.

Les silos en béton armé

Pour les zones où l'emprise au sol des installations doit être réduite au maximum comme dans les zones portuaires, le silo en béton armé est souvent la solution idéale car il permet des constructions de grande hauteur (voir cahier couleur, photo 34). Les cellules construites en béton armé peuvent atteindre des hauteurs de 30 à 60m pour des diamètres de 6 à 10m (photo 6.1).

Le béton est un matériau intéressant, souvent disponible localement, car de nombreux pays du Sud disposent de cimenteries. Le béton armé a également l'avantage d'assurer une bonne isolation thermique ; ce qui constitue un avantage intéressant pour les installations implantées en régions chaudes. C'est un matériau durable qui résiste bien au temps sans exiger de revêtement ou d'entretien particulier. Il permet ainsi d'amortir les installations sur une longue période.

Le silo en béton armé constitue cependant une installation très lourde qui nécessite d'être implantée sur des sols de bonne portance. Le poids des cellules en béton armé est d'environ 200kg par tonne logée alors qu'il n'est que de 12 à 25kg pour les silos métalliques. Par ailleurs, le béton armé, qui est un matériau poreux aux gaz, est donc peu approprié pour la réalisation de cellules étanches. Il ne convient pas pour la mise en œuvre de techniques de désinsectisation au gaz carbonique (CO_2) car il absorbe ce gaz par le phénomène de carbonatation.

Les cellules en béton armé peuvent être construites par l'assemblage de dalles de béton armé ou douelles avec des joints réalisés au mortier étanche mais le plus souvent on fait appel à la technique du coffrage glissant. Cette technique, aujourd'hui utilisée dans le monde entier, a l'avantage de supprimer les reprises de bétonnage préjudiciables à l'étanchéité du béton. Elle fait appel à un coffrage constitué de deux cylindres concentriques d'environ 1,2m de hauteur et espacés de l'épaisseur de la paroi de la cellule. Le coffrage est levé en continu par des vérins qui prennent appui sur des barres d'acier qui sont ensuite extraites ou noyées dans le béton. Le versement du béton s'effectue en continu à des vitesses d'avancement du coffrage de 15 à 20cm par heure. Il faut donc en moyenne une dizaine de jours de travail continu, de jour comme de nuit, pour réaliser une cellule en béton armé de



Photo 6.1.

Silo en béton armé au Mozambique (© Francis Troude, Cirad).

40m de haut. De nombreux experts conseillent de réaliser des silos avec cellules indépendantes plutôt que des cellules reliées avec cellules intercalaires en forme d'as de carreau qui sont toujours difficiles à contrôler.

Les silos en béton armé ne peuvent être réalisés que par des entreprises spécialisées employant du personnel très qualifié.

▮ Les silos horizontaux

Les silos horizontaux sont généralement constitués de grands bâtiments équipés de cellules ou cases de stockage de faible hauteur (5 à 8 m) par rapport aux autres dimensions de manière à reporter l'essentiel de la pression des grains sur le sol plutôt que sur les parois. Ils nécessitent une emprise au sol importante.

Les cases de stockage peuvent être construites en métal, comme pour les silos de type palplanches, ou en béton armé traditionnel ou à partir d'éléments préfabriqués en béton armé de forme cornière ou demi-douve par exemple. La toiture de la structure est réalisée en matériau léger.

Le silo est équipé de transporteurs horizontaux pour répartir le chargement en grains sur toute la longueur du bâtiment et pour vidanger les cellules. Un élévateur vertical permet d'alimenter le transporteur haut généralement accroché à la charpente (figure 6.7).

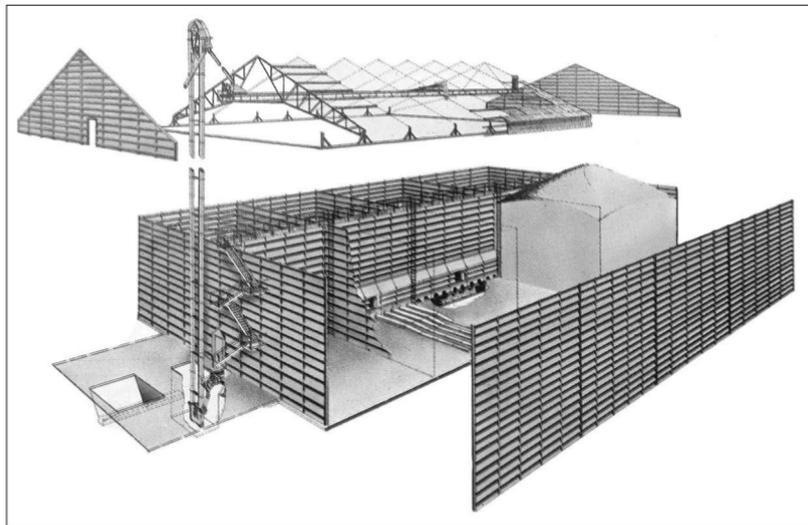


Figure 6.7.

Schéma d'un silo métallique à fond plat (d'après doc. ACMB).

▮ Les silos semi-enterrés et les silos plateforme

En Argentine, dès les années 1940, plusieurs milliers de tonnes de grains furent stockés en silos semi-enterrés. Les unités sont constituées d'une partie enterrée de section trapézoïdale et d'une partie aérienne de forme arrondie. La profondeur du silo est d'environ 5 m pour une largeur d'une dizaine de mètres et une longueur de plusieurs dizaines de mètres. Les parois et le toit construits en briques creuses et en béton sont recouverts d'un matériau imperméable à l'eau et aux gaz pour assurer un stockage hermétique des grains. À Chypre et au Kenya, ce sont des cellules semi-enterrées dites *Waller bin* qui ont été construites dans les années 1960. Chaque cellule d'une capacité supérieure à 1 000 tonnes est constituée d'une partie enterrée de forme conique recouverte d'un toit en forme de dôme. Les cellules sont construites en insérant une couche de matériau imperméable entre deux couches de béton armé.



Ces installations qui nécessitent de forts travaux de génie civil ont évolué vers la conception de silos plateforme pour limiter les coûts d'investissement. Cette technologie très simple a été largement développée en Australie au cours des dernières décennies. Le silo plateforme est constitué d'une large tranchée peu profonde et bien drainée. Le sol et les bords de la tranchée sont recouverts d'une bâche en plastique étanche. La tranchée est remplie de grains au moyen de remorques et par des systèmes de manutentions mécaniques ou pneumatiques jusqu'à atteindre l'angle du talus naturel des grains. Le tas ainsi formé est ensuite recouvert d'une bâche en plastique étanche. De chaque côté de la plateforme sont creusées des tranchées destinées à l'ancrage des bâches en plastique et plus loin des fossés de drainage (figure 6.8). Ce type de stockage, souvent utilisé de façon temporaire en attendant qu'un volume de stockage en silo conventionnel soit disponible, est en général réservé aux zones à climat sec ou semi-aride. Les grains doivent être stockés très secs pour éviter tout risque de développement de moisissures pouvant occasionner des pertes considérables. Ce type de silo étanche peut aisément être fumigé mais il reste vulnérable à l'attaque des rongeurs. Le silo bunker argentin (figure 6.9) est du même type mais il repose sur une plateforme, parfois bétonnée, réalisée directement sur le sol. Les parois du silo sont inclinées et constituées d'armatures métalliques recouvertes d'un grillage et d'un plastique ou

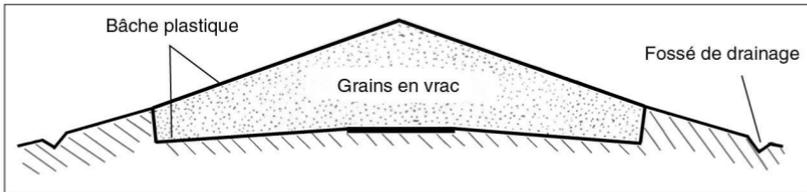


Figure 6.8.
Schéma d'un silo plateforme.

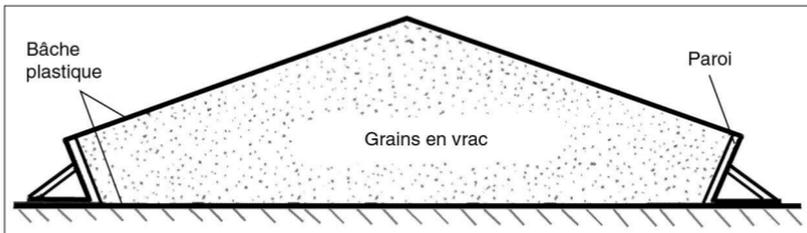


Figure 6.9.
Schéma d'un silo bunker argentin.

d'une paroi en tôle ondulée galvanisée. Comme pour le silo plateforme, le sol et les bords sont recouverts d'une bâche en plastique étanche. Le fond du silo peut également être équipé de gaines de ventilation.

▮ Les silos dôme

Certains silos à céréales sont construits selon la technique du dôme mise au point en Amérique du Nord et utilisée en architecture pour la construction de hangar ou de salles polyvalentes. Son intérêt principal réside dans sa rapidité de construction et son isolation thermique. Il s'agit d'un dôme hémisphérique qui repose sur des fondations en béton armé (figure 6.10). Une enveloppe gonflable sert de support à la réalisation du dôme. On projette tout d'abord une mousse de polyuréthane qui sert d'isolation puis on met en place le ferrailage sur lequel on projette un béton spécial de haute résistance. Le dôme mesure de 40 à 100 m de diamètre et constitue un espace de stockage entièrement libre permettant le stockage de céréales ou d'autres produits alimentaires (sucre, pommes de terre...) ou non alimentaires (engrais...).

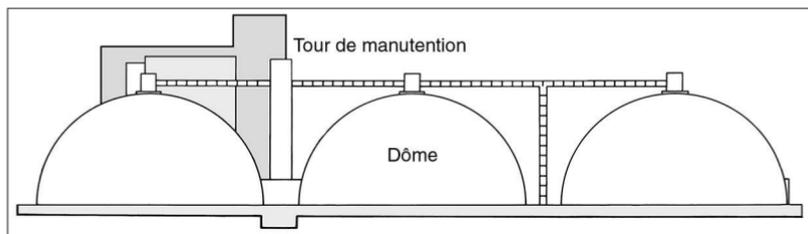


Figure 6.10.

Schéma d'un silo dôme (d'après doc Agridôme).

Équipements des silos de stockage

▮ La réception des grains

La pesée

À la livraison dans un centre de stockage, comme à l'expédition, les grains doivent être pesés pour pouvoir rémunérer les producteurs ou collecteurs et réaliser des bilans matière. L'équipement couramment utilisé dans les grands centres de stockage est le pont-bascule qui permet de peser des véhicules de 30 à 60 tonnes. Pour des centres plus petits, on peut utiliser des plateformes pèse-essieux de 5 à 20 tonnes de



portée. Une autre technique de pesée consiste à intégrer une bascule de circuit dans le système de manutention mais elle oblige alors à vider totalement la trémie de réception après chaque livraison pour connaître les quantités livrées. La bascule de circuit doit être alimentée de façon régulière pour fonctionner correctement avec des pesées unitaires de 50 à 100kg ou plus. Elle doit être régulièrement entretenue, nettoyée et réglée pour chaque type de grains. Enfin dans les grands centres de stockage, il existe également des systèmes de pesée sur convoyeur à bande en continu pour des débits de 100 à 200t/h.

La réception

Lorsque la livraison des grains se fait par route ou par voie ferrée, on utilise habituellement des fosses de réception de forme pyramidale et équipées d'une grille pour retenir les corps étrangers les plus volumineux. Le volume de la fosse de réception ne doit pas être inférieur à 8 m³ pour les petits centres, et à 20 m³ pour les centres de plus de 1 000 tonnes. Pour les livraisons par voie maritime ou fluviale, les grains sont généralement aspirés par un transporteur pneumatique avant de rejoindre le circuit de manutention.

▮ La manutention des grains

La manutention est généralement réalisée au moyen d'élévateurs verticaux et de transporteurs horizontaux pour transporter les grains du poste de réception jusqu'aux cellules de stockage puis ensuite jusqu'au poste d'expédition.

Les transporteurs verticaux

L'élévateur à godets est le matériel le plus utilisé pour la manutention verticale des grains dans les silos de stockage. Les godets métalliques ou en plastique sont fixés à intervalles réguliers sur une sangle tendue verticalement entre une poulie motrice et une poulie de pied comme illustré en figure 6.11. L'ensemble est enfermé dans un bâti métallique ou en bois.

Ces équipements sont adaptés à tous les types d'installations car les débits des élévateurs à godets peuvent varier dans des gammes de 5 t/h à plus de 1 000 t/h. Les hauteurs d'élévation peuvent dépasser 70 m.

La vitesse de la sangle de l'élévateur est de 2 à 6 m/s mais parfois cette vitesse est réduite à 1 m/s pour les produits fragiles comme les semences, le riz usiné ou les fèves de cacao.

Les godets sont habituellement métalliques en fer blanc ou en acier galvanisé mais aussi en plastique pour le transport des produits fragiles. Ils peuvent aussi être en inox ou en caoutchouc pour des usages spéciaux. On trouve également des godets sans fond qui ne sont remplis que tous les 10 éléments environ et qui permettent d'accroître le débit de l'appareil en créant une colonne de produit quasi continue.

Les vis élévatrices sous tube sont utilisées dans les petites unités de stockage. En élévation, elles fonctionnent souvent à un angle de 45°. Elles peuvent être fixes ou mobiles lorsqu'elles sont équipées d'un chariot. Leur débit est fonction du diamètre selon le tableau 6.1 donnant le débit d'une vis sous tube en fonctionnement à 45°.

Tableau 6.1. Débit d'une vis en fonction de son diamètre.

Diamètre (mm)	Débit (t/h)	Diamètre (mm)	Débit (t/h)
100	7	240	50
160	20	300	100

Les transporteurs horizontaux

Les convoyeurs à bande

Les bandes transporteuses sont des équipements couramment utilisés dans les silos pour la manutention des grains sur de longues distances (voir cahier couleur, photo 29). Elles sont constituées d'une trame en fibres synthétiques recouverte de caoutchouc ou de plastique et supportée par les rouleaux métalliques et entraînées par un tambour moteur (figure 6.12).

Les bandes utilisées dans les silos ont en général des longueurs de 20 à plus de 100m. Elles ont des largeurs de 30 à 80cm qui permettent d'atteindre des débits de 30 à 300t/h à une vitesse de 2 à 3m/s.

Pour le transport des grains en vrac on utilise des bandes avec les bords relevés à 30-35° dites en V. Pour franchir un dénivelé, les convoyeurs à bandes peuvent être utilisés avec une pente maximum de 20° en montant et de 15° en descendant mais ces valeurs peuvent être augmentées si l'on utilise des bandes avec barrettes ou chevrons.

Les convoyeurs à bande assurent une manutention très douce particulièrement adaptée au transport des produits fragiles comme les semences, les légumineuses ou le riz. Ils permettent également une vidange intégrale très appréciée pour éviter le mélange de grains. Ils

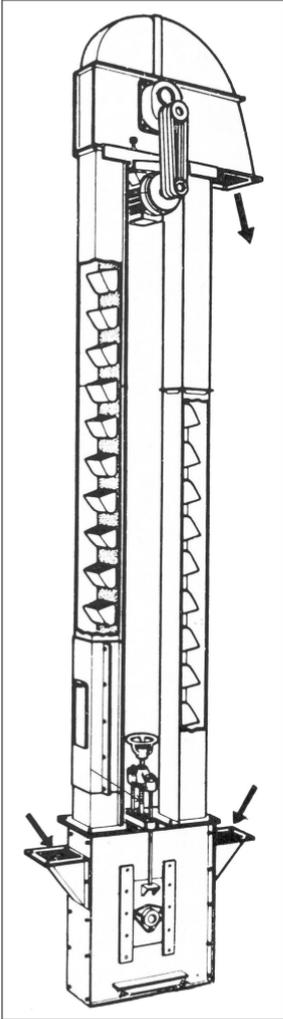
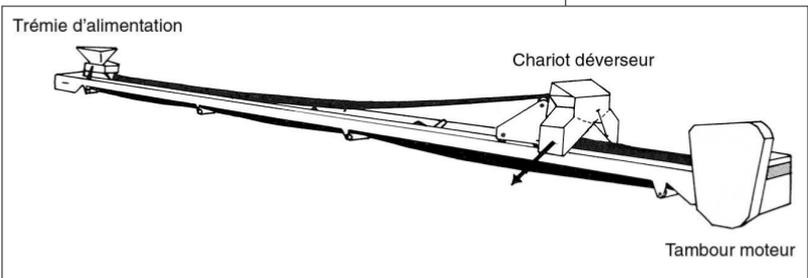


Figure 6.11.
Élévateur à godets
(d'après Ceemat).

Figure 6.12.
Conveyeur à bande
(d'après doc Denis).



ont cependant l'inconvénient de générer des poussières mais cette émission peut être limitée en utilisant des bandes sous tube.

Les transporteurs à chaîne

Les transporteurs à chaîne sont également très utilisés pour le transport horizontal ou incliné des produits granulaires.

Ces équipements sont constitués d'une chaîne sans fin composée de maillons sur lesquels sont fixés des barrettes latérales qui forment des raclettes (figure 6.13). Cette chaîne circule à vitesse lente de 0,4 à 0,6 m/s dans un carter métallique et entraîne un flux continu de grains de la trémie d'alimentation vers la trappe de sortie (Williams et Gracey, 1994).

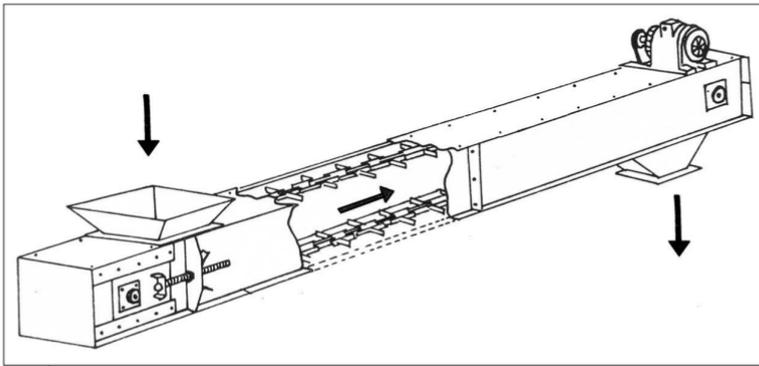


Figure 6.13.
Transporteur à chaîne (d'après Ceemat).

Le principal intérêt du transporteur à chaîne est son faible encombrement qui, à débit égal, nécessite une section nettement moins importante qu'un convoyeur à bande. Comme il dispose d'un carter étanche, le convoyeur à chaîne peut être utilisé en extérieur et il génère peu de poussières.

Son principal inconvénient reste sa consommation en énergie qui est plus du double de celle d'un convoyeur à bande. Par ailleurs, son fonctionnement ne permet pas une vidange intégrale, ce qui le rend inutilisable dans certaines installations comme les stations de semences. Enfin ce matériel est bruyant dans les sections où il fonctionne à vide.

Certains constructeurs proposent des transporteurs à câble dans lesquels la chaîne est remplacée par deux câbles parallèles sur lesquels sont fixées des barrettes en bois ou en polyéthylène haute densité. Les débits proposés vont de 10 à 500 t/h.



Un autre cas particulier est représenté par un matériel constitué d'une chaîne continue sur laquelle sont fixés des anneaux en nylon qui assurent la manutention des grains aussi bien à l'horizontale qu'à la verticale. Cet équipement présent aux États-Unis sous la marque *Grain Loop* est adapté aux silos dont les cellules sont disposées en ligne.

La manutention pneumatique

Le transport des produits granuleux ou pulvérulents est assuré par leur mise en suspension et en mouvement dans une veine d'air circulant dans une tuyauterie.

Un transporteur pneumatique se compose classiquement d'une tuyauterie d'alimentation, d'une chambre de séparation air-produit équipé d'une écluse, d'un dispositif d'épuration de l'air, d'un ventilateur et d'une tuyauterie de refoulement comme illustré en figure 6.14.

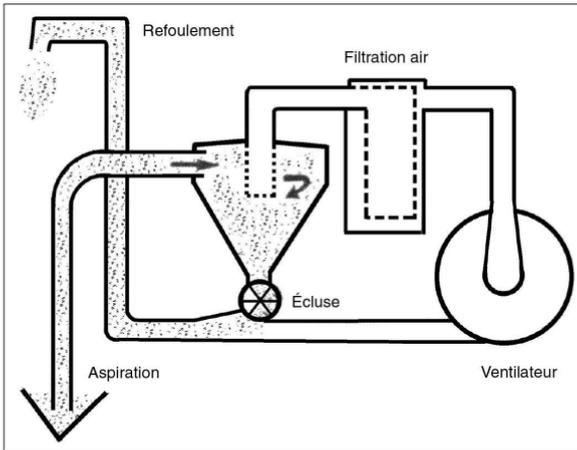


Figure 6.14.

Schéma du transporteur pneumatique
(d'après Cruz *et al.*, 1988).

Cette technique est souvent mise en œuvre lorsqu'il n'est pas possible d'avoir recours aux techniques classiques de manutention comme pour le déchargement des navires ou des péniches ou pour la vidange de cellules difficilement accessibles.

Des transporteurs pneumatiques sur charriot permettent d'atteindre des débits de plusieurs dizaines de tonnes à l'heure mais les puissances consommées sont importantes. Le transporteur pneumatique consomme cinq fois plus d'énergie qu'un transporteur mécanique classique.

▮ La vidange des cellules

Pour la vidange des cellules à fond plat, on laisse naturellement s'écouler les grains par gravité dans les orifices de vidange mais il reste toujours des talus ou cônes résiduels de grains selon l'angle de leur talus naturel. Selon le type de cellules de stockage utilisé, il existe divers systèmes de manutention qui permettent une vidange intégrale.

Vis de vidange intégrale

Cet équipement est utilisé pour la vidange intégrale des cellules cylindriques équipées de faux fond perforé. La vis est disposée à poste fixe dans la cellule et ramène dans l'auget central les grains du cône résiduel. Les grains sont ensuite évacués vers le circuit de manutention par une vis de reprise (figure 6.15).

Vidange par transracleur

Le transracleur est un équipement dédié à l'extraction des grains dans les cellules rectangulaires à fond plat. Il permet de racler les grains vers les orifices de vidange des cellules et le système de reprise (figure 6.16). Les débits peuvent atteindre plusieurs centaines de tonnes à l'heure. Le matériel est également utilisé lors du remplissage des cellules afin de niveler le haut du tas de grains.

Vidange par ventilation

La vidange des cellules carrées à fond plat est parfois réalisée par le système de ventilation. On parle alors de ventilation vidange. Les filets d'air refoulés par les gaines de ventilation sont orientés pour entraîner les grains vers les trappes de vidange. Cette technique développée en Australie et reprise par différents constructeurs a l'avantage de ne pas casser les grains mais elle génère de la poussière et consomme beaucoup d'énergie. Certains la considèrent comme un non-sens économique et écologique.

▮ Le nettoyage des grains

Il est nécessaire de bien nettoyer les grains avant leur stockage afin d'éliminer les matières étrangères susceptibles d'altérer leur bonne conservation. Au niveau des silos, le nettoyage est réalisé par des équipements qui sont généralement placés dans la tour de manutention et alimentés en dérivation du circuit des grains.

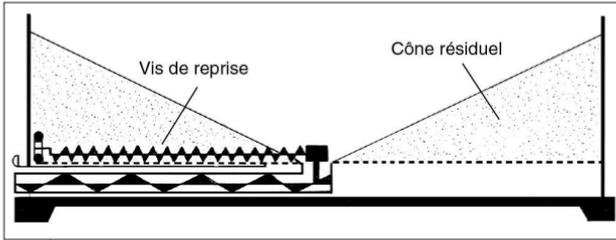


Figure 6.15.
Schéma de vidange intégrale par vis de reprise (d'après Ceemat).

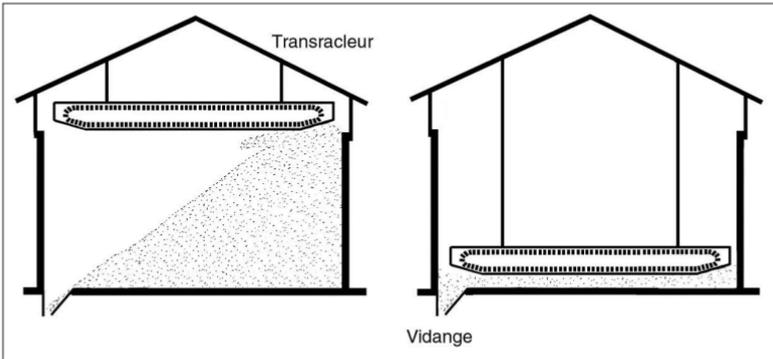


Figure 6.16.
Schéma de vidange intégrale par transracleur (d'après Cruz *et al.*, 1988).

Les différents types d'équipements généralement utilisés pour nettoyer les grains sont décrits ci-après.

Le pré-nettoyeur circulaire

Dans cet équipement, les grains sont distribués par une alimentation centrale et tombent sur un cône de répartition pour être traversés par un courant d'air (figure 6.17). Le pré-nettoyeur circulaire permet d'éliminer les impuretés légères (balles pailles, poussières...) et quelques fines brisures. La puissance requise est faible et reste voisine de 1 kW pour un débit d'environ 10 t/h.

Le nettoyeur rotatif

Le nettoyage des grains dans un nettoyeur rotatif est effectué à deux niveaux. À l'entrée des grains dans la machine, un nettoyeur permet d'aspirer et d'évacuer les particules légères puis les grains tombent dans un crible rotatif incliné, généralement formé de 3 cylindres, qui

sépare les différents éléments selon leur taille. Le premier cylindre à mailles fines permet de récupérer les impuretés fines comme les sables, le deuxième cylindre peut permettre de récupérer les brisures, le troisième cylindre récupère le bon grain, tandis que les impuretés grossières sont évacuées en bout de crible (figure 6.18). Différentes combinaisons sont possibles selon le choix des perforations de grilles.

Selon le nombre et le diamètre des cylindres les débits de nettoyage varient de 5 t/h à plusieurs dizaines de tonnes à l'heure.

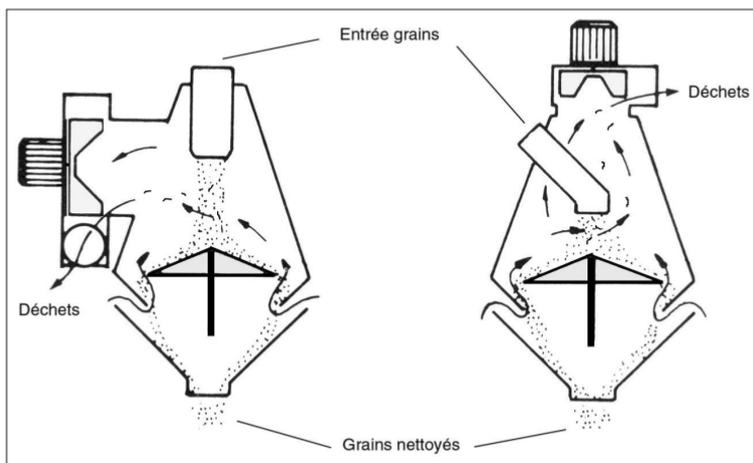


Figure 6.17.

Schéma de pré-nettoyeurs circulaires (d'après Ceemat).

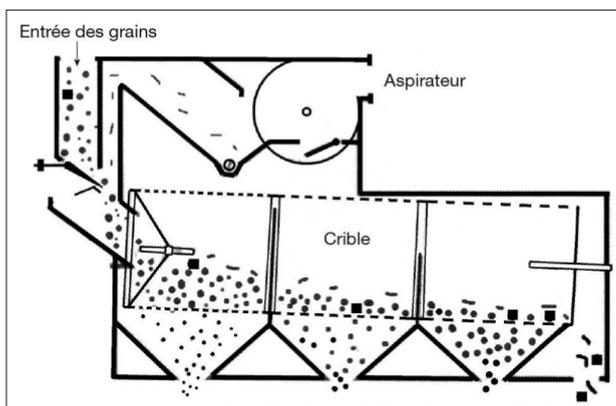


Figure 6.18.

Schéma de nettoyeur rotatif (d'après doc. Marot).



Le nettoyeur séparateur

Le nettoyeur séparateur est l'équipement le plus fréquemment utilisé pour le nettoyage des grains dans les grands centres de stockage (Cruz et Havard, 1994). Il est schématiquement constitué de deux grilles planes animées d'un mouvement alternatif et traversées par un courant d'air (figure 6.19).

Les grains sont introduits dans une trémie d'alimentation et distribués en nappe régulière sur toute la largeur de l'appareil. À la sortie de la trémie d'alimentation, une première aspiration entraîne les impuretés légères dans une chambre de détente. Les bons grains sont toujours récupérés entre les deux grilles alors que la grille supérieure ou tamis émotteur retient les grosses impuretés et que la grille inférieure ou tamis cribleur laisse passer les impuretés fines et lourdes comme les sables ou les fines brisures. En sortie des grains propres, une seconde aspiration élimine les fines impuretés légères restantes.

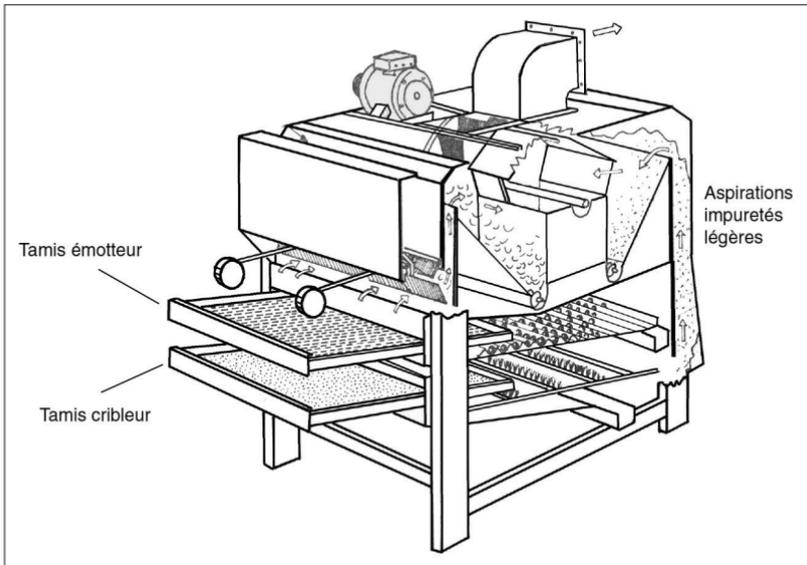


Figure 6.19.
Nettoyeur-séparateur (d'après doc. Dupuis).

Le choix des perforations de tamis est fonction du type de grains à nettoyer. Un dispositif de dégommage (boules caoutchouc, brosses) est prévu pour débarrasser les grilles des grains qui restent prisonniers dans les perforations.

Les débits des nettoyeurs-séparateurs sont couramment de 5 à 25 t/h. Des débits supérieurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de tonnes à l'heure sont obtenus avec des nettoyeurs équipés de deux caissons de grilles en parallèle.

▮ La ventilation des grains

La température est un facteur important de dégradation des grains stockés. Il a été rappelé (chapitre 1) que le dégagement de chaleur des céréales double lorsque leur température s'élève de 5°C. Il faut donc refroidir les grains pour mieux les conserver. L'idéal serait de conserver les grains à une température inférieure à 10 à 15°C ; ce qui est aisément réalisable dans les pays du Nord mais reste plus difficile à obtenir dans de nombreux pays du Sud. Dans tous les cas il faut chercher à utiliser les températures les plus basses dont on dispose et notamment les températures nocturnes pour refroidir les grains dès que l'écart de température entre les grains stockés et l'air ambiant est de 7 à 10°C.

La ventilation de refroidissement est ainsi utilisée pour refroidir les grains et pour évacuer la chaleur produite par leur métabolisme. Elle est possible grâce à la porosité de la masse de grains dans laquelle près de 40 % du volume est occupé par des vides interstitiels.

Dans les cellules de stockage, l'air est envoyé dans les grains au moyen d'un ventilateur et de gaines de répartition d'air disposées en fond de cellule ou d'un faux fond perforé comme c'est le cas pour de nombreuses cellules cylindriques métalliques (figure 6.20).

Il est couramment admis qu'il faut une dose spécifique d'environ 1000 m³ d'air pour refroidir un mètre cube de grains (Lasseran, 1982 ; Debouis *et al.*, 2008). Dans les cas les plus courants, les débits moyens de ventilation de refroidissement sont de 10 à 20 m³/h/m³ de grains pour les cellules où la hauteur des grains est de 10 à 20 m. Pour les cellules de plus grande hauteur, il faut diminuer ce débit de renouvellement de grains pour éviter de trop fortes pressions et un réchauffement excessif de l'air de ventilation. Il est éventuellement possible d'utiliser un air artificiellement réfrigéré mais cette solution est généralement coûteuse et ne peut se justifier que sur des filières particulières comme les semences.

Comme les échauffements ont souvent lieu à la partie supérieure des cellules, il existe des petits équipements qui permettent de ventiler localement un point chaud qui aurait pu être détecté jusqu'à environ



3 mètres de profondeur (Berhaut *et al.*, 2003). Ces aérateurs de grains sont constitués d'un tube perforé, équipé d'un ventilateur, qui peut être vissé dans la masse de grains (figure 6.21).

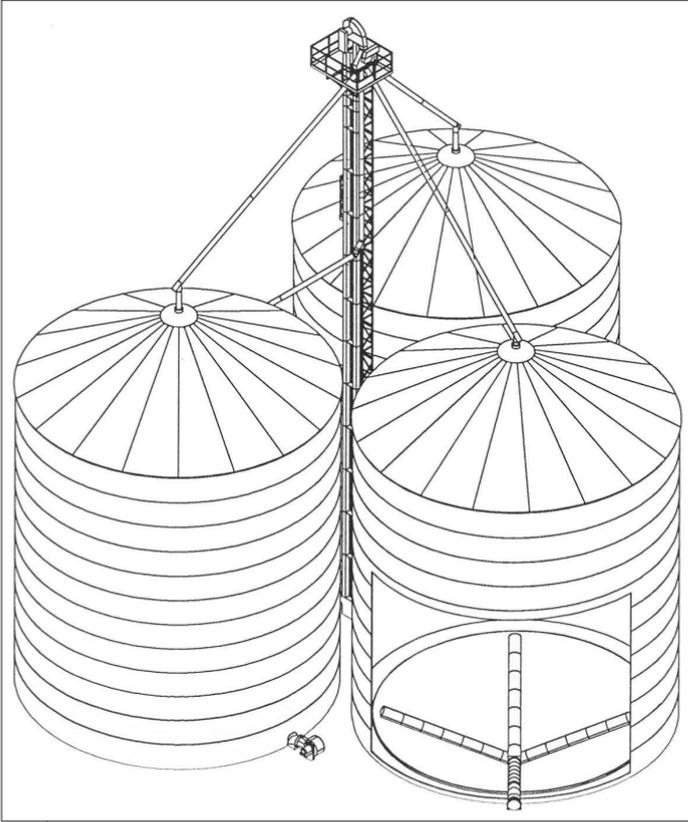


Figure 6.20.

Cellules métalliques avec système de ventilation (d'après doc Denis).

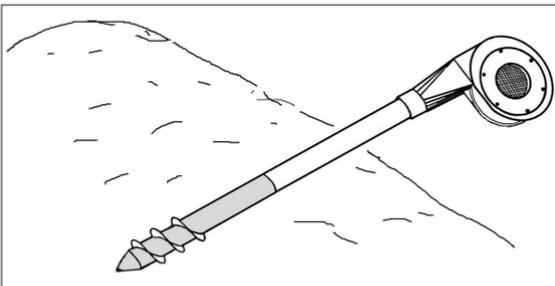


Figure 6.21.

Aérateur à grains
(d'après doc Denis).

La silothermométrie

La silothermométrie est la technique de mesure et de suivi des températures à l'intérieur d'un silo. Elle permet de gérer rationnellement la ventilation des stocks et de détecter les échauffements anormaux qui peuvent apparaître notamment en haut des cellules suite à des phénomènes de transfert de chaleur et de vapeur d'eau ou de développement d'insectes.

La silothermométrie est constituée d'un réseau de capteurs de température disposés de manière régulière dans les cellules de stockage. Ces capteurs de températures qui sont souvent des thermistances de précision sont disposés dans des câbles suspendus à la charpente et qui plongent dans la masse de grains (figure 6.22). Les différentes sondes sont reliées à une centrale et à un tableau synoptique qui permet au gestionnaire des stocks de contrôler à souhait la température des stocks.

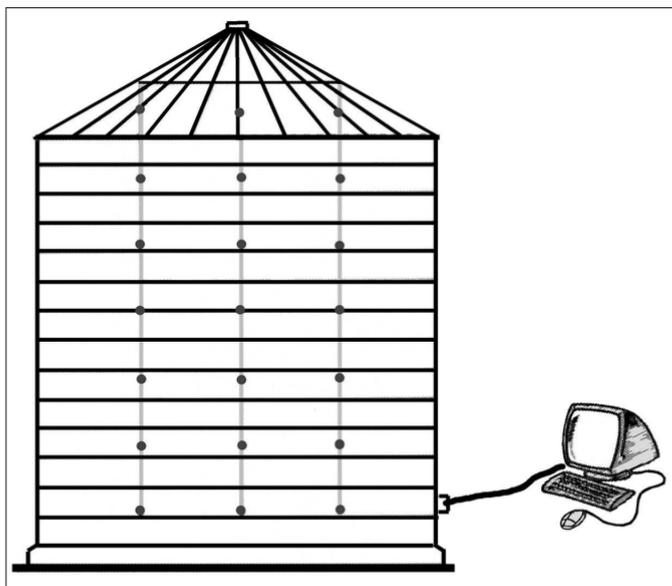


Figure 6.22.
Schéma de silothermométrie.

Cependant les grains ont une faible conductivité thermique et un échauffement qui ne serait pas situé à proximité d'une sonde peut ne pas être détecté. Dans la pratique, il est donc préconisé de faire une double scrutation thermométrique séparée d'une courte ventilation pour permettre la détection d'un éventuel point chaud par la sonde



située immédiatement au-dessus (Lasseran, 1982). Certaines normes préconisent de disposer d'un point de mesure par sphère de rayon de 3 à 5 m avec recouvrement des sphères. L'importance de disposer d'une sonde de capteurs dans l'axe des cellules a, par ailleurs, été démontrée.

Certains produits comme le maïs génèrent beaucoup de poussières et d'autres comme les oléagineux peuvent conduire, par fermentation, à la formation de gaz susceptibles d'accroître les risques d'explosion.

Encadré 6.1. Risques d'explosion

Depuis la première explosion de poussières dans un moulin en Italie à la fin du XVIII^e siècle, de nombreux accidents spectaculaires et dramatiques ont eu lieu dans des grands centres de stockage et de transformation des céréales. La manutention des grains produit des poussières en raison du frottement grain sur grain qui détache la poussière collée à leur surface et détache des morceaux d'enveloppes qui génèrent une nouvelle poussière.

Si ces poussières ne sont pas récupérées par des systèmes d'aspiration performants, elles se répandent dans l'atmosphère des locaux et se déposent dans toute la structure du silo (tour de manutention, système de manutention, haut de cellules, charpente...). Les poussières de grains constituent un matériau inflammable et explosif.

Pour qu'il y ait un incendie, il faut qu'il y ait un combustible (les poussières), un comburant (l'air) et une source de chaleur ou d'inflammation. On parle alors du triangle du feu. Pour qu'il y ait explosion il faut qu'il y ait trois autres facteurs additionnels. Le combustible doit être dispersé (poussières en suspension), un confinement suffisant doit exister et le mélange combustible et comburant doit être dans le domaine d'explosivité. Ces six conditions constituent l'hexagone de l'explosion (figure 6.23).

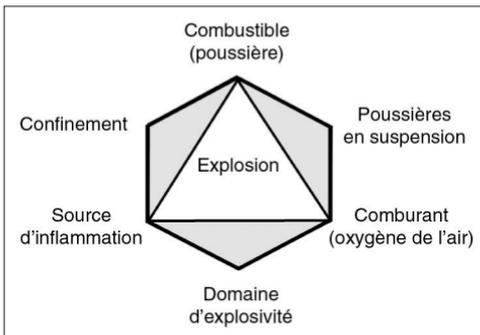


Figure 6.23. Hexagone de l'explosion de poussières.

Encadré 6.1. Risques d'explosion (suite)

La prévention des explosions de poussières consiste à agir sur un ou plusieurs des six facteurs responsables.

La réduction des poussières passe par la mise en place de systèmes d'aspiration de poussières là où elles sont produites et notamment au niveau des systèmes de manutention et des équipements de nettoyage, séchage, vidange... Il est également essentiel d'avoir des infrastructures bien conçues pour permettre un nettoyage correct et régulier des locaux et l'évacuation périodique des poussières par un personnel sensibilisé aux risques d'explosion. On doit agir également sur les sources d'inflammation qui peuvent être dues à des échauffements de pièces métalliques en cas de fonctionnement défectueux de certains équipements de manutention ou de traitement (nettoyage, séchage...) ou le plus souvent à des opérations d'entretien des infrastructures mal maîtrisées (meulage de pièces métalliques, soudage...).

Pour réduire les effets d'une éventuelle explosion, il faut réaliser des infrastructures suffisamment résistantes pour qu'elles ne s'effondrent pas et équipées d'événements de décharge correctement dimensionnés.

Pour parvenir à un niveau de sécurité suffisant, les mesures de prévention sur les poussières et les sources d'inflammation doivent être complétées par l'observation de règles strictes d'exploitation, de maintenance, de contrôle et d'hygiène des installations.

7. Les insectes des stocks et les méthodes de lutte

Caractères généraux des insectes des grains et graines

▮ Généralités, morphologie et comportement

Les insectes nuisibles aux denrées stockées à long terme ont un cycle de vie classique. L'œuf, pondu par une femelle préalablement fécondée, donne la vie à une larve d'allure vermiforme, qui, après une croissance par étapes à l'occasion de mues successives, se métamorphose (stade nymphal), pour donner finalement un adulte qui se reproduira peu de temps après l'émergence. C'est le cas des Coléoptères et des Lépidoptères. Chez d'autres ordres, la larve ressemble déjà à l'adulte et la métamorphose est incomplète. C'est le cas des Psocoptères par exemple. Les insectes ont un squelette externe constitué par une carapace de chitine, la cuticule, qui entoure tout le corps, composé de segments soudés les uns aux autres ou articulés. Le corps se compose de trois parties : la tête, le thorax et l'abdomen (figure 7.1).

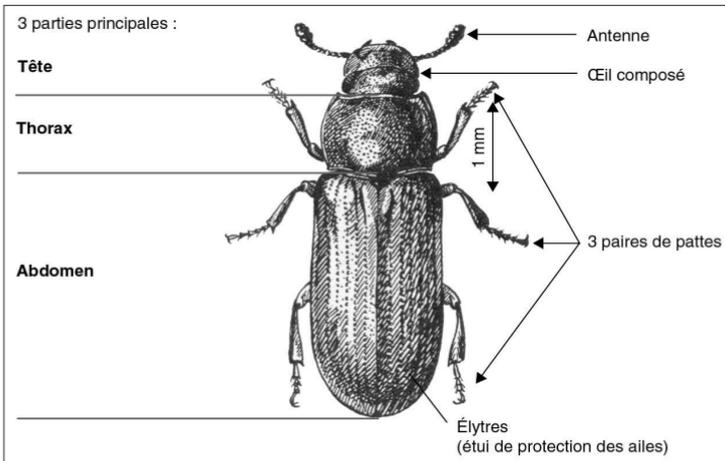


Figure 7.1. Morphologie générale d'un insecte des denrées stockées (Coléoptère *Tribolium castaneum*).

La grande majorité des espèces vivant dans les denrées stockées porte trois paires de pattes et deux paires d'ailes. Une paire est transformée en élytres chez les Coléoptères qui servent d'étui de protection des ailes membraneuses utilisées pour le vol. L'abdomen est dépourvu de tout appendice et héberge les principaux organes vitaux, tractus digestif, organes respiratoires, de réserve (corps gras) et système reproducteur. La tête porte les principaux organes sensoriels : les antennes à fonction olfactive, les yeux, la bouche et les pièces buccales (comme les mandibules chez les Coléoptères) (figure 7.2). L'ensemble des organes est baigné par l'hémolymphe, un liquide clair qui joue un rôle semblable au sang chez les animaux supérieurs. Les hormones qui circulent dans l'hémolymphe rythment les transformations successives et permettent à l'insecte de s'adapter rapidement aux modifications du milieu physique, comme les basses ou les hautes températures.

Les insectes qui vivent dans les stocks de grains sont, à l'origine, des ravageurs des cultures qui se sont progressivement adaptés à la vie dans la masse compacte des grains et des graines entreposés, au cours d'une évolution étalée sur des millions d'années. Cette adaptation très poussée de certaines espèces comme les charançons des céréales du genre *Sitophilus* font que l'infestation des grains et des graines par les insectes est un des fléaux les plus difficiles à enrayer et qui peut rapidement causer une dépréciation importante de la denrée en plus de la détérioration qualitative et quantitative. La lutte contre les insectes qui s'installent dans les denrées conservées à long terme après récolte est donc impérative, plus encore dans les pays chauds que dans les pays à climat tempéré.

▮ Physiologie générale et limites physiques de développement

Les insectes sont des poïkilothermes, c'est-à-dire que leur température corporelle est identique à celle du milieu environnant. Ils résistent néanmoins à la congélation à des températures nettement inférieures à 0°C. Les insectes sont également sensibles à la chaleur et ne supportent pas des températures de plus de 50°C pendant quelques heures et au-dessus de 60°C, ils meurent en quelques minutes.

Cette sensibilité à la chaleur peut être mise à profit pour la désinsectisation des denrées infestées par traitement à la chaleur sèche ou par exposition aux micro-ondes ou au rayonnement infra-rouge (figure 7.3).

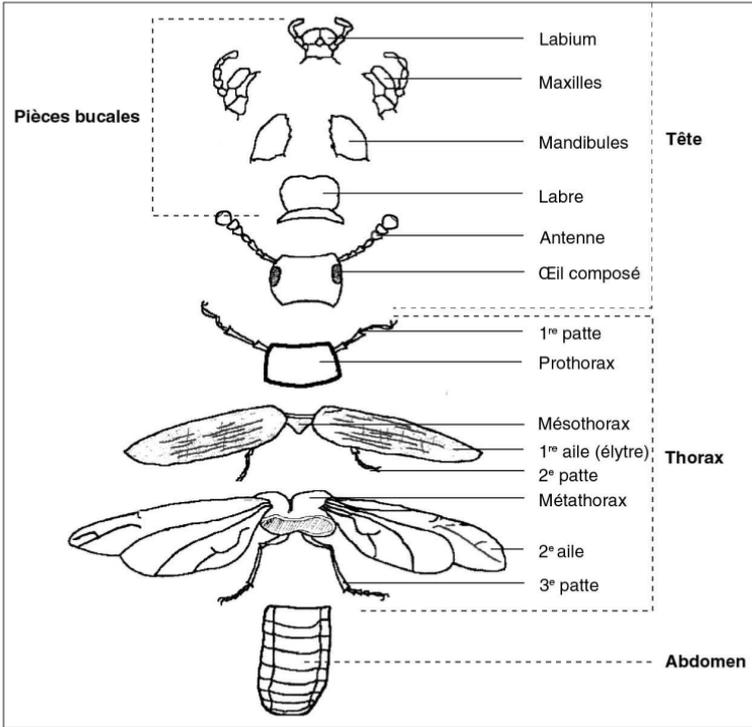


Figure 7.2.

Éléments morphologiques constitutifs d'un insecte des denrées stockées (*T. confusum*).

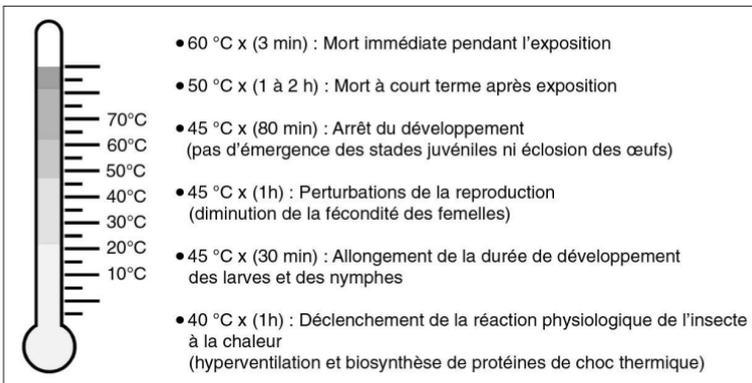


Figure 7.3.

Effets de la hausse des températures sur la durée de survie et perturbations du développement chez les insectes des denrées stockées.

II Régime alimentaire et spécialisation des espèces selon l'espèce hôte

Les insectes qui s'attaquent aux graines et grains entiers pour pouvoir accomplir tout ou partie de leur développement au sein de ces grains font preuve d'une remarquable adaptation (Lepesme, 1944). Celle-ci est d'abord comportementale (cas des charançons des céréales), mais elle peut se doubler d'une adaptation nutritionnelle lorsque certaines phases de développement ne peuvent s'effectuer sans la disponibilité de substances alimentaires particulières ou sans capacités spécifiques indispensables à la survie, comme la détoxification de substances antinutritionnelles, par exemple (cas des bruches des légumineuses). Certains auteurs parlent de coévolution entre ravageur et plante-hôte (Huignard *et al.*, 2011). Celle-ci conduit à un nombre restreint d'espèces pouvant s'attaquer directement aux graines et aux grains entiers, qui constituent le groupe des « ravageurs primaires ».

Le groupe des ravageurs primaires contient un petit nombre d'espèces qui sont capables de vivre à l'intérieur d'un grain pendant leur développement juvénile (encadré 7.1). On peut y associer les espèces qui vivent dans les produits déjà broyés et dont les larves reconstituent une loge autour d'elles pour se protéger des agressions extérieures pendant leur développement : la vrillette du pain, *Stegobium paniceum* et la cadelle, *Tenebroides mauritanicus*. Le dermeste des grains, *Trogoderma granarium*, figure également dans ce groupe, les larves grégaires profitant des loges creusées dans le grain ou confectionnées avec la toile des sacs de jute pour se protéger de l'écrasement au moment de la manutention des grains.

La majorité des autres espèces d'insectes nuisibles aux céréales ont un régime détritiphage (mangeurs de miettes) et on les rencontre indifféremment dans les tas de grains (à condition qu'il y ait des grains cassés ou des débris car ils n'attaquent pas directement le grain sain) et dans les produits de première transformation (farine, semoule), ainsi que dans les usines de transformation de produits agro-alimentaires (moulins, semouleries, malteries, boulangeries) (encadré 7.1). Un troisième groupe est constitué par les insectes à régime mycophage, saprophage ou nécrophage qui tirent parti d'une altération déjà existante causée par des ravageurs primaires ou qui s'installent à la suite d'un développement de microorganismes (mycophages et saprophages). Cette succession de ravageurs constitue une chaîne alimentaire dans le système du stock, si la durée de conservation se prolonge suffisamment longtemps.



À l'extrême, on trouve aussi dans le stock des espèces entomophages (bénéfiques), les plus fréquentes étant des micro-hyménoptères se développant sur ou dans le corps des larves de certaines espèces de ravageurs ou dans leurs œufs (qualifiées de parasitoïdes). D'autres espèces ont un comportement prédateur (mangeur de proie vivante). Elles se nourrissent d'œufs ou de larves d'espèces nuisibles comme la punaise prédatrice *Xylocoris flavipes* (Hémiptère), ou le prédateur du grand capucin, *Teretriosoma nigrescens* (Coléoptère). Certaines de ces espèces font l'objet d'élevages de masse en tant qu'auxiliaires de lutte biologique pour éviter tout recours à la lutte chimique pour les produits de l'agriculture biologique, par exemple. Pourtant, dans beaucoup de cas de découverte de ces espèces utiles ou accidentelles dans les denrées alimentaires, la réaction est de les considérer comme indésirables au même titre que les ravageurs, ce qui a pu induire nombre de mesures de lutte sans fondement, car inutiles puisque dirigées sur des cibles qui ne représentent aucun risque de dégât et qu'on peut séparer facilement du grain par des moyens mécaniques (tamisage, ventilation) (encadré 7.1).

Encadré 7.1. Listes des espèces d'insectes nuisibles aux grains et graines alimentaires entreposés

Ravageurs primaires

Stade adulte et stade larvaire attaquant les grains, granivores exclusifs

- Coléoptères

Prostephanus truncatus Horn, grand capucin du maïs

Rhizopertha dominica (F.), capucin des grains

Sitophilus oryzae (L.), charançon du riz

Sitophilus zeamais Motschulsky, charançon du maïs

Stade larvaire seulement attaquant les grains

- Coléoptères

Acanthoscelides obtectus (Say), bruche du haricot

Callosobruchus maculatus (F.), bruche du niébé et du pois chiche

Callosobruchus chinensis (L.), bruche chinoise

Caryedon serratus Olivier, bruche de l'arachide

Zabrotes subfasciatus (Boheman), bruche brésilienne

Stegobium paniceum (F.), vrillette du pain

Tenebroides mauritanicus (L.), cadelle

Trogoderma granarium Everts, dermeste des grains

Encadré 7.1. (suite)

- Lépidoptère

Sitotroga cerealella (Olivier), alucite des céréales

Ravageurs secondaires

Attaque de grains cassés ou de produits céréaliers au stade larvaire

- Coléoptères

Oryzaephilus surinamensis (L.) et *O. mercator* (Fauvel), silvains (dentés)

Cryptolestes ferrugineus (Stephens), petit silvain plat

Tribolium castaneum (Herbst) et *T. confusum* Jacquelin du Val, tribolium

Gnathocerus cornutus (F.), cornu

Latheticus oryzae Waterhouse, ténébrion du riz

- Lépidoptères

Ephesia kuehniella (Zeller), mite de la farine

Plodia interpunctella (Huebner), teigne des fruits secs et des semences

Nemapogon granella (L.), petite teigne des grains

Corcyra cephalonica (Stainton), mite du riz

Espèces mycophages et saprophages

- Coléoptères

Ahasverus advena (Waltl), cucujide denté

Typhaea stercorea (L.), mycétophage des grains

Alphitobius diaperinus (Panzer), ténébrion des poulaillers

Ptinus tectus Boieldieu, ptine australien

- Lépidoptère

Hofmannophila pseudospretella (Stainton), teigne des semences

- Psocoptères («poux des livres»)

Liposcelis divinatorius (Mueller)

Liposcelis bostrychophila (Badonnel)

Lepinotus reticulatus (Enderlein)

Prédateurs et parasitoïdes

Attaquent les insectes vivants (œufs ou larves) ou parasitent divers stades

- Hémiptère

Xylocoris flavipes (Reuter), punaise prédatrice

- Hyménoptères

Venturia canescens (Gravenhorst), ichneumon parasitoïde

Trichogramma evanescens Westwood, trichogramme parasitoïde

Lariophagus distinguendus (Foerster), pteromalide parasitoïde

Anisopteromalus calandrae (Howard) + *Bracon hebetor* (Say), microguêpes parasitoïdes



Encadré 7.1. (suite)

- Coléoptères

Teretriosoma nigrescens Lewis, prédateur du grand capucin

Tenebroides mauritanicus (L.), cadelle (occasionnellement prédatrice au stade adulte)

Nécrophages : nettoyeurs ou fossoyeurs des cadavres d'insectes nuisibles

- Coléoptères

Anthrenus verbasci (L.), anthrène des collections entomologiques

Attagenus megatoma (F.), attagène des tapis

Espèces accidentelles : rencontrées dans les greniers et réserves à grains

- Isoptères

Termites (dégâts aux denrées posées au sol ou destruction des supports de grenier en bois)

- Hyménoptères

Fourmis (recherche de nourritures sucrées ou de refuge pour fonder de nouvelles colonies)

Connaissance des groupes d'insectes et autres arthropodes vivant dans les denrées alimentaires

▮ Généralités

Parmi la cinquantaine d'espèces d'insectes que l'on peut trouver dans les réserves de cultures vivrières alimentaires, seule une petite minorité s'attaque directement aux grains et graines et est qualifiée de ravageurs primaires, c'est-à-dire capables de s'attaquer directement au grain pour s'installer à l'intérieur et y accomplir l'intégralité de leur cycle de développement. On parle alors de ravageurs «à formes cachées». Les autres espèces dangereuses sont considérées comme opportunistes et polyphages (Fleurat-Lessard, 1982). Elles n'ont pas de formes cachées car dans la plupart des situations, tous les stades de développement sont externes et vivent entre les grains ou profitent des dégâts causés par les ravageurs primaires pour y pénétrer ce qui leur vaut le qualificatif de «ravageurs secondaires». En réalité, ils n'ont de secondaires que le nom, car leur vitesse de multiplication et leurs populations peuvent atteindre des niveaux bien plus élevés que ceux des ravageurs primaires (tableau 7.1).

Pour prévenir l'infestation des denrées entreposées et lutter efficacement contre les attaques d'insectes ravageurs, que ce soit au niveau des stocks locaux près des lieux de production ou au niveau des stocks de regroupement pour l'approvisionnement des industries de la transformation agro-alimentaire ou plus directement des centres de consommation de masse, la connaissance précise de l'identité, de la biologie et du comportement des principales espèces nuisibles est un prérequis indispensable (Fleurat-Lessard, 1991).

▮ Caractéristiques physiologiques des insectes des produits secs

Les insectes étant des poïkilothermes, ils se développent tout au long de l'année en climat chaud, puisque la température moyenne y est constamment supérieure à la température seuil en dessous de laquelle leur développement s'interrompt (Lepigre, 1951). Les espèces d'insectes considérés comme des déprédateurs des denrées stockées sont généralement de petite taille, mais ont une capacité de multiplication élevée lorsque la température est favorable à leur multiplication ce qui peut engendrer de véritables pullulations en quelques mois. Leur capacité de multiplication est modulée par la température et secondairement par la nature et l'humidité du substrat alimentaire qu'ils exploitent (Mourier et d'Aguilar, 1994). Le seuil de température minimum à partir duquel le développement des insectes est possible est situé entre 14 et 20°C (tableau 7.1) (Sinha et Watters, 1985).

En dessous de ce niveau minimal de température, l'insecte entre en léthargie (quiescence) et peut passer plusieurs mois sans avancer dans son développement. Au-dessus de ce seuil, le développement des stades juvéniles est continu et est d'autant plus rapide que le niveau de température ambiante est proche de l'optimum, situé entre 26 et 34°C selon les espèces.

▮ Description des principales espèces d'insectes déprédateurs (ou nuisibles) des denrées alimentaires

Les Coléoptères

À l'état adulte, les Coléoptères sont caractérisés par leurs ailes antérieures indurées, transformées en élytres protégeant les ailes postérieures membraneuses servant au vol. Sur la face supérieure du corps, le premier segment du thorax recouvre les autres et forme le



Tableau 7.1. Conditions limites et optimales de développement des principales espèces d'arthropodes nuisibles ou indésirables dans les grains et graines alimentaires et taux de multiplication maximal.

Espèce Nom commun, nom scientifique ⁽¹⁾	Température minimale (°C)	Température maximale (°C)	Humidité relative optimale (%)	Taux de multiplication maximal /mois
Coléoptères				
Charançon du riz, <i>Sitophilus oryzae</i>	14	34	75	25
Charançon du maïs, <i>Sitophilus zeamais</i>	14	34	75	25
Bruche du niébé et du pois chiche, <i>Callosobruchus maculatus</i>	16	35	70	50
Bruche du haricot, <i>Acanthoscelides obtectus</i>	13	34	75	25
Bruche chinoise, <i>Callosobruchus chinensis</i>	17	33	90	30
Bruche de l'arachide, <i>Caryedon serratus</i>	20	30	70	6
Bruche brésilienne du pois, <i>Zabrotes subfasciatus</i>	18	35	70	20
Capucin des grains, <i>Rhizopertha dominica</i>	18	39	55	20
Grand capucin du maïs, <i>Prostephanus truncatus</i>	18	37	80	25
Vrillette du pain, <i>Stegobium paniceum</i>	15	35	95	7,5
Silvain, <i>Oryzaephilus surinamensis</i>	17	38	85	50
Petit silvain plat, <i>Cryptolestes ferrugineus</i>	18	40	75	60
Cucujide denté, <i>Ahasverus advena</i>	18	35	85	-
Tribolium roux, <i>Tribolium castaneum</i>	18	40	75	70

(1) Liste ordonnée du plus nuisible des ravageurs primaires au moins nuisible des ravageurs secondaires, excepté le prédateur du grand capucin du maïs

Tableau 7.1. Conditions limites et optimales de développement des principales espèces d'arthropodes nuisibles ou indésirables dans les grains et graines alimentaires et taux de multiplication maximal. (suite)

Espèce Nom commun, nom scientifique ⁽¹⁾	Température minimale (°C)	Température maximale (°C)	Humidité relative optimale (%)	Taux de multiplication maximal / mois
Coléoptères				
Tribolium cornu, <i>Gnathocerus cornutus</i>	16	36	75	15
Cadelle des moulins, <i>Tenebroides mauritanicus</i>	14	32	75	-
Dermeste des grains, <i>Trogoderma granarium</i>	22	41	25	12,5
Ptine australien des grains, <i>Ptinus tectus</i>	17	30	70	4
Prédateur du grand capucin du maïs, <i>Teretriosoma nigrescens</i>	17	35	80	-
Lépidoptères				
Alucite des céréales, <i>Sitotroga cerealella</i>	13	33	75	50
Mite du riz, <i>Corcyra cephalonica</i>	15	35	70	10
Teigne des fruits secs et semences, <i>Plodia interpunctella</i>	16	33	70	30
Petite teigne des grains, <i>Nemapogon granella</i>	7	30	90	-
Mite de la farine, <i>Ephestia kuehniella</i>	12	32	75	50
Psocoptères				
Pou des denrées entreposées, <i>Liposcelis divinatorius</i>	18	35	80	> 200
Pou des livres, <i>Lepinotus reticulatus</i>	15	33	80	> 100
Pou des grains, <i>Liposcelis bostrychophila</i>	15	33	80	> 100



prothorax. Les larves ont une allure vermiforme et sont pourvues de pattes, sauf chez les charançons. Les pièces buccales des adultes et des larves sont de type broyeur et les deux stades s'attaquent indifféremment aux grains (sauf pour quelques cas particuliers comme le dermeste des grains ou la vrillette du pain qui ne causent aucun dégât au stade adulte). Pour une grande majorité d'espèces, les adultes vivent plusieurs mois et pour quelques-unes, plus d'un an. Leur comportement est le plus souvent lucifuge, ce qui les rend difficiles à dépister pendant le jour. Certaines espèces vivent pendant une grande partie du cycle à l'intérieur d'un grain, celui-ci abritant en général un seul insecte. Dans ce cas, la seule forme externe assurant la reproduction est l'adulte qui vit entre les grains. On parle dans ce cas d'espèces à formes cachées (exemple: le charançon du riz, *S. oryzae*, figure 7.4a). D'autres espèces ont un développement complet qui s'effectue entre les grains qu'ils attaquent par la face externe. Tous les stades de développement sont libres (par exemple, le silvain, *O. surinamensis*, figure 7.4b).

Les adultes atteignent la maturité sexuelle en quelques jours après leur émergence et les accouplements commencent 2 à 3 jours après, puis ont lieu périodiquement pendant toute la vie adulte. Les œufs sont déposés de façon plus ou moins régulière, en petit nombre chaque jour (une dizaine au maximum), pendant des cycles de ponte étalés sur une longue période de temps (plusieurs mois). De ce fait, il n'existe pas de générations très marquées chez la plupart des Coléoptères des grains en liaison avec l'étalement de la ponte bien au-delà de la durée nécessaire pour l'accomplissement d'un cycle complet de développement. La durée de celui-ci est fortement dépendante de la température (figure 7.5).

Les charançons des céréales (famille des Curculionidés)

Les charançons granivores des céréales sont les insectes les plus fréquents dans les stocks de céréales de tous les pays du monde. Ils font partie de la famille des Curculionidés. Leur corps a une taille de 3 à 4 mm de longueur. La tête est prolongée par un rostre au bout duquel se trouvent les pièces buccales broyeuses (mandibules) avec lesquelles ils creusent des trous dans les grains pour se nourrir ou, pour la femelle, y déposer un œuf. Les stades juvéniles ne sont pas visibles car dès le stade œuf, le cycle de développement se déroule intégralement à l'intérieur d'un grain sous forme cachée (figure 7.4a). La larve est apode, de couleur blanchâtre et en forme de tranche d'orange (figure 7.6). Les céréales à grains vêtus (riz paddy, orge, avoine, épeautre, millet) sont moins sensibles que les céréales à grains nus (maïs, mil, sorgho, riz cargo, blé, seigle, triticale...) (Steffan, 1978).

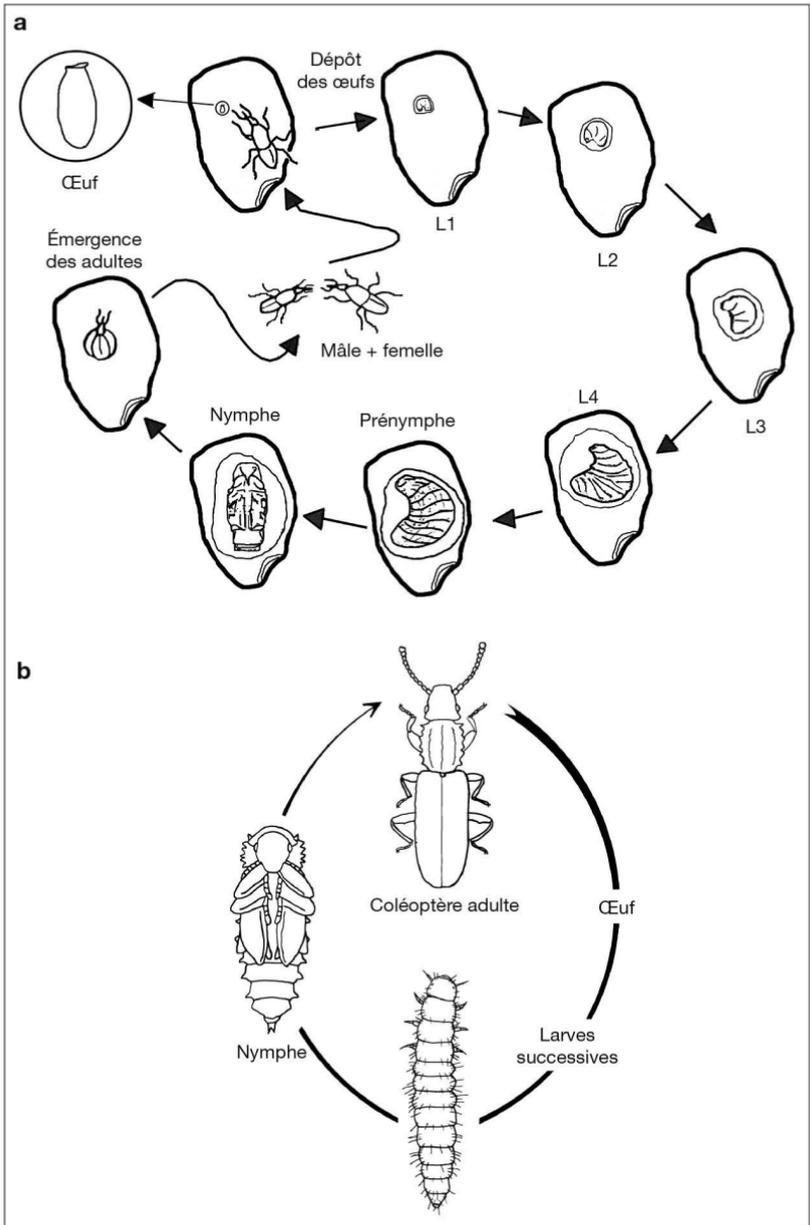


Figure 7.4.

Cycles comparés des charançons à formes cachées logées à l'intérieur du grain (a) et d'un Coléoptère sans forme cachée dans le grain (b = Silvain).

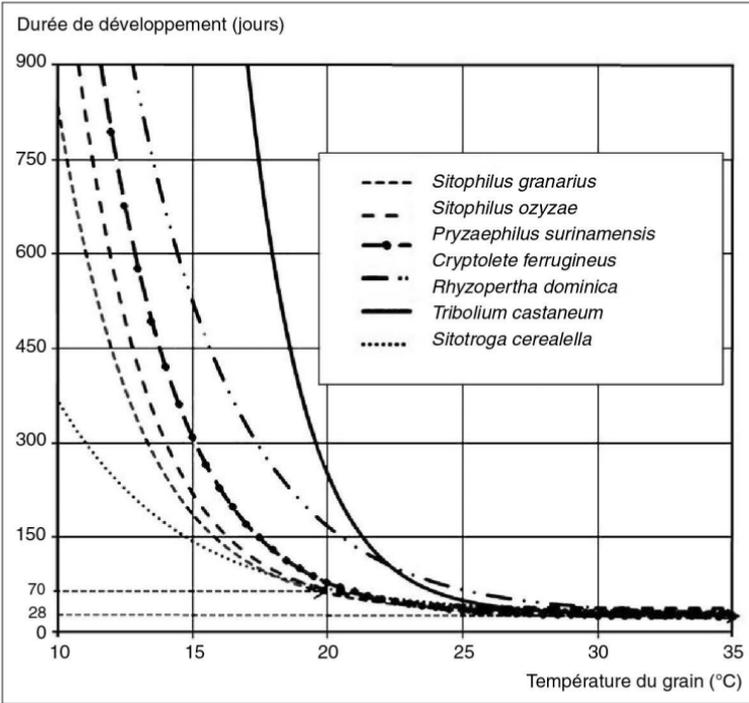


Figure 7.5.

Durée de développement des principales espèces d'insectes nuisibles aux céréales stockées en fonction de la température du grain.

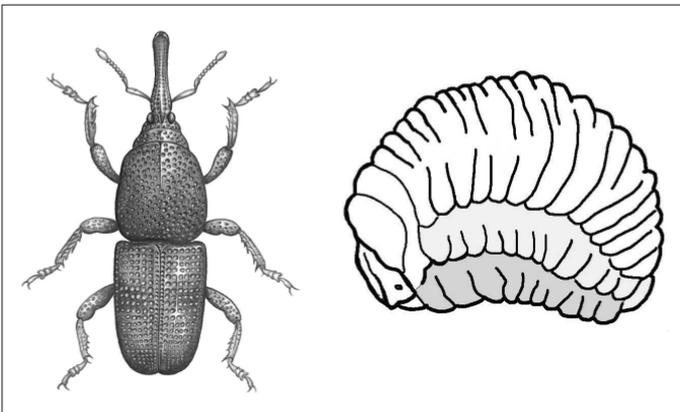


Figure 7.6.

Charançon du maïs : adulte et larve (d'après Doc. Roussel Uclaf).

En climat chaud, deux espèces cosmopolites sont particulièrement nuisibles aux réserves de maïs, de riz, de sorgho ou de mil : le charançon du riz, *Sitophilus oryzae* (L.) et le charançon du maïs, *S. zeamais* (figure 7.6). Les deux espèces se développent indifféremment sur n'importe quelle céréale, mais *S. zeamais* a une préférence marquée pour le maïs (voir cahier couleur, photo 7). Sous climat tropical, le maïs peut être attaqué en épi au champ bien avant la récolte. En climat tempéré frais, on trouve également le charançon des grains, *S. granarius*, dans les stocks de céréales. Le développement d'un charançon dans un grain réduit sa masse d'environ 35 à 40 %. Le dégât principal est donc fait par les larves en croissance, l'adulte ne creusant le grain que pour en sortir à l'émergence, pour des prises de nourriture épisodiques ou les femelles pour y pondre.

Le grand capucin du maïs et le capucin des grains
(famille des Bostrychidés)

Les capucins des céréales font partie de la famille des Bostrychidés qui ont la particularité d'avoir la tête enchâssée dans le thorax, ce qui ressemble à une capuche, d'où leur nom commun de capucin. Le petit capucin des grains, *Rhizopertha dominica* (figure 7.7) est cosmopolite dans toute la zone climatique intertropicale et les zones méditerranéennes et continentales sèches. Ainsi, on le trouve aussi bien sur le maïs aux États-Unis ou en Argentine, sur le riz en Asie, ou sur le blé en Australie, pays dans lesquels il est combattu activement (Reichmuth *et al.*, 2007). L'adulte mesure de 2,5 à 3,5 mm de longueur, mais c'est un grignoteur infatigable qui va réduire en poudre le contenu du grain en ne laissant qu'une enveloppe vide. Les œufs sont déposés à la surface du grain et la larve une fois éclosée va forer un grain pour s'installer à l'intérieur et poursuivre son développement juvénile sous forme cachée, comme les charançons. Les attaques par le capucin se traduisent par une production importante de poussière de grain et de déjections de l'insecte (appelé le frass) qui a une odeur caractéristique dérivée de celle des phéromones d'agrégation excrétées par les adultes.

Le grand capucin du maïs, *Prostephanus truncatus* (figure 7.8), est devenu un redoutable fléau du maïs (notamment en Afrique centrale et de l'Ouest) qu'il infeste dès la culture à l'approche de la maturité, pour ensuite détruire complètement les épis au cours du stockage (Delobel et Tran, 1993). Il a une morphologie comparable à celle du capucin des grains, mais avec une taille plus grande, de 4 à 5 mm de longueur (figure 7.8). L'espèce a été introduite en Tanzanie en 1981



en provenance d'Amérique centrale (probablement du Mexique) et son aire de répartition en Afrique s'est élargie aux autres pays de l'Afrique occidentale, orientale et australe dans les années 1985-1995. Les pertes occasionnées aux stocks de maïs en épis, avec ou sans spathes, peuvent atteindre 100 % si le stockage se prolonge sur plusieurs mois. Contrairement aux charançons, les dégâts des capucins sont principalement réalisés par les adultes.

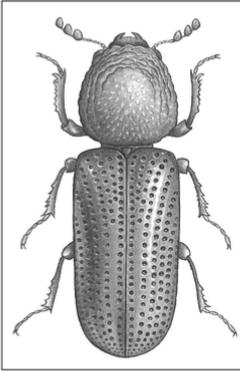


Figure 7.7.
Capucin des grains
(d'après Doc. Roussel Uclaf).

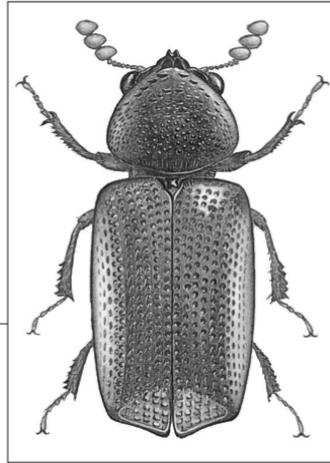


Figure 7.8.
Grand capucin du maïs
(d'après Doc. Roussel
Uclaf).

Les bruches des légumineuses (famille des Bruchidés)

Le groupe des bruches constitue une famille de Coléoptères dont chaque espèce est plus ou moins spécialisée dans l'attaque d'une espèce ou de quelques espèces de légumineuses à caractéristiques nutritionnelles très voisines. Ainsi, la bruche du haricot, *Acanthoscelides obtectus*, dont la taille varie de 3 à 4 mm (figure 7.9), n'est pas capable de se développer sur les graines de niébé ou de pois chiche. De plus, parmi les nombreuses espèces de bruches, seulement quelques espèces sont capables de se développer à partir des graines sèches en cours d'entreposage.

Ces espèces de bruches nuisibles aux stocks de légumineuses sèches peuvent accomplir plusieurs générations par an, indifféremment dans les réserves de graines sèches ou dans les cultures de légumineuses-hôtes

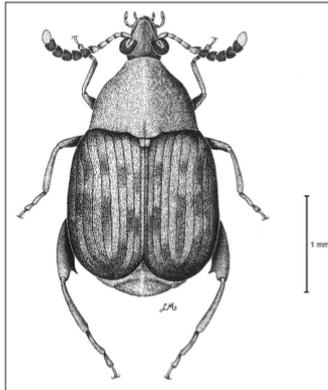


Figure 7.9.
Bruche du haricot
(d'après Doc. Gasga).

en y allant pondre au moment de la formation des gousses. Ces espèces sont de véritables fléaux pour les réserves de légumineuses et elles peuvent y occasionner des dégâts importants pouvant dépasser 30 % de perte pondérale sur niébé (Huignard *et al.*, 2011).

Les autres espèces de bruches n'ont qu'une ou deux générations par an selon qu'il y a une ou deux saisons de culture de légumineuses par an : elles ne peuvent pas se reproduire sur les graines sèches et sont qualifiées de monovoltines. Ces espèces ne constituent pas réellement un danger pour les réserves de légumineuses alimentaires ou de semences.

Les bruches nuisibles aux réserves de graines alimentaires déposent leurs œufs directement sur les graines sèches et leur cycle de développement est très voisin de celui du capucin. La larve de 1^{er} stade de certaines espèces (par exemple, la bruche du niébé) est mobile et après l'éclosion va percer le tégument de la graine pour s'introduire dans l'albumen. Pour d'autres espèces, l'œuf est collé au tégument de la graine et la larve de 1^{er} stade pénètre directement dans la graine sans sortir de l'enveloppe de l'œuf (le chorion). Le développement post-embryonnaire s'effectue à l'intérieur de la graine qui peut héberger plusieurs individus d'une même génération, comme c'est le cas pour la bruche du haricot, *Acanthoscelides obtectus*. Pour d'autres espèces comme la bruche du niébé et du pois chiche, *Callosobruchus maculatus* (photo 7.1), la graine n'héberge qu'un seul individu.

En plus de la bruche du haricot qui est cosmopolite, les espèces de bruches les plus dangereuses pour les stocks de légumineuses en climat chaud sont la bruche du niébé et du pois chiche *Callosobruchus maculatus* (voir cahier couleur, photo 8), la bruche de l'arachide, *Caryedon serratus*,



la bruche des grains de café, *Araecerus fasciculatus*, la bruche tropicale du pois, *Zabrotes subfasciatus* et la bruche chinoise, *Callosobruchus chinensis*. L'espèce dominante en Afrique est *Callosobruchus maculatus* qui s'attaque aux cultures de pois chiche et de niébé et qui poursuit ses dégâts sur les graines sèches conservées après la récolte.

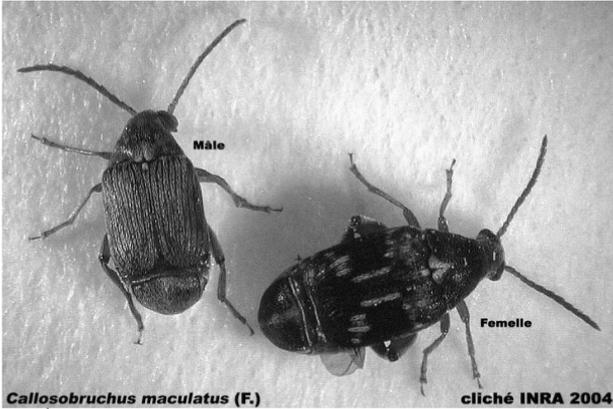


Photo 7.1.

Bruche du niébé (© S. Dupuis, Inra Bordeaux).

Les tribolium et ténébrions (famille des Tenebrionidés)

Les ténébrions sont les Coléoptères les plus fréquemment rencontrés dans les denrées alimentaires les plus sèches, avec plusieurs espèces pouvant coloniser les silos de stockage de céréales, les usines de transformation, les entrepôts des entreprises de distribution ou les magasins de détail et épiceries, jusqu'aux réserves des particuliers (farine, riz, biscuits). Les espèces les plus nuisibles sont celles qui colonisent les usines des industries des céréales (moulins, semouleries, malteries) et qui font partie du genre *Tribolium*. Le tribolium roux, *Tribolium castaneum* (figure 7.10), dont la taille varie de 3 à 4 mm, est bien adapté aux climats chauds et constitue un véritable fléau dans les moulins et les silos de céréales. Le tribolium sombre, *Tribolium confusum*, est plutôt fréquent en climat tempéré.

La prolificité de ces espèces est très élevée (tableau 7.1) et il est très difficile d'éradiquer complètement les populations une fois qu'elles ont colonisé l'ensemble des équipements et machines d'un moulin, par exemple. En climat chaud, un autre ténébrionidé, le cornu *Gnathocerus cornutus*, peut coloniser les réserves de grains et graines, sa taille varie de 3,5 à 4,5 mm (figure 7.11).

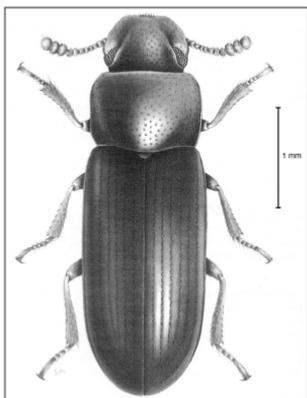


Figure 7.10.
Le tribolium rouge (Lepigre, 1951).

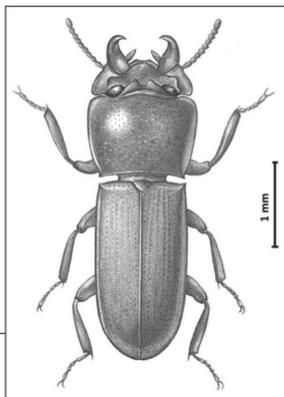


Figure 7.11.
Le cornu (Lepigre, 1951).

Les silvains (famille des Silvanidés ou des Cucujidés)

Les trois espèces les plus fréquentes dans les stocks de grains et graines (à forte teneur en grains cassés et en impuretés diverses) sont le silvain, *Oryzaephilus surinamensis*, le petit silvain plat, *Cryptolestes ferrugineus* et le silvain denté, *Ahasverus advena*. Ce sont des insectes de petite taille (1,5 à 3 mm), très mobiles et faciles à identifier par leur morphologie caractéristique. Le silvain commun a le pronotum portant une rangée de 6 dents saillantes sur chacun de ses côtés (figure 7.4b). Le petit silvain plat a la tête émergeant du pronotum à forme carrée avec les élytres de forme rectangulaire en prolongement direct (figure 7.12).

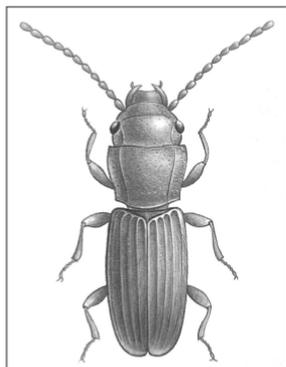


Figure 7.12.
Le petit silvain plat
(d'après Doc. Roussel Uclaf).



Les deux premières espèces à régime détritiphage sont très prolifiques et peuvent coloniser les grains, les fruits secs et certains oléagineux en tirant parti des grains cassés et des impuretés. Le silvain, *O. surinamensis*, est un fléau des grains stockés, mais n'ayant pas de formes cachées (figure 7.4b), il est moins dangereux que les charançons et plus facile à éradiquer dans les céréales. Le petit silvain plat, *C. ferrugineus*, est une espèce en recrudescence dans les moulins où sa petite taille lui permet de pénétrer à l'intérieur des conduits à farine et dans les machines pour y installer des colonies permanentes. Le silvain denté est une espèce détritiphage et mycophage peu préoccupante, même en climat tempéré (Fleurat-Lessard et Leblanc, 2013).

La cadelle des moulins (famille des Trogositidés)

La cadelle, *Tenebroides mauritanicus*, est un Coléoptère de plus grande taille que les espèces précédentes (8 à 10 mm au stade adulte) qui n'est pas de la famille des Ténébrionidés comme son nom pourrait le faire penser, mais de celle des Trogositidés. Les larves sont de grande taille (jusqu'à 15-18 mm de longueur au dernier stade) et à régime détritiphage. Leur aspect est caractéristique avec un tégument mou qui les fait ressembler à des chenilles de lépidoptères. La tête, les deux cornicules abdominales et la zone du corps en arrière de la tête sont de couleur noir brillant (figure 7.13). Le corps de l'adulte est également noir brillant avec la tête enchâssée à l'intérieur du pronotum avec deux fortes mandibules proéminentes. Il a un régime plutôt carnassier, à base de larves d'autres espèces.

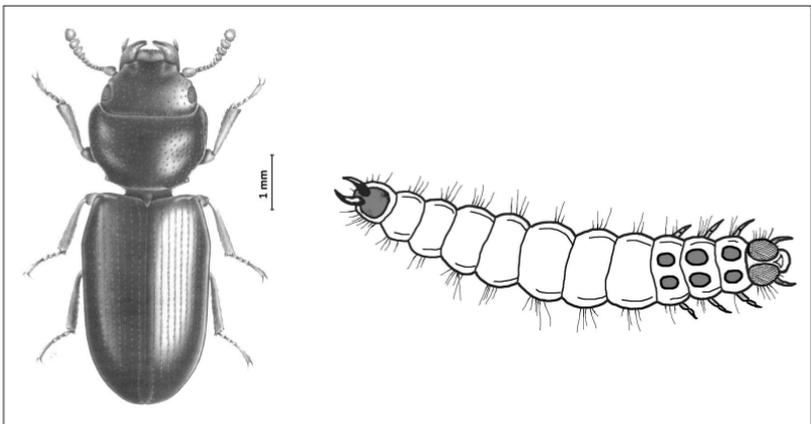


Figure 7.13.

La cadelle des moulins et sa larve caractéristique (d'après Doc. Roussel Uclaf).

Les infestations de cette espèce sont peu fréquentes dans les moulins ou les usines de fabrication des aliments des animaux, mais elles restent difficiles à détecter quand elles sont localisées dans la machinerie. En climat chaud, les larves de cadelles ont une préférence pour les tourteaux d'oléagineux et peuvent attaquer les grains de maïs déjà endommagés pour se loger à l'intérieur. Le cycle de développement de la cadelle est très long et l'espèce étant peu prolifique, elle n'est rencontrée que rarement dans la machinerie des usines des industries des céréales et n'est pas réellement nuisible.

Le dermeste des grains (famille des Dermestidés)

Le dermeste des grains, *Trogoderma granarium*, est une espèce typiquement tropicale dont la température optimale de développement est de 34°C et qui peut supporter des températures supérieures à 40°C qui inhibent le développement de la plupart des autres espèces de coléoptères nuisibles aux denrées stockées. Ce petit insecte de 2 à 3 mm (figure 7.14) peut supporter des chocs thermiques supérieurs à 50°C et les larves peuvent se mettre en diapause « estivale » lorsque la température atteint progressivement ces niveaux élevés de température, létaux pour la plupart des autres insectes des denrées. De plus, il est particulièrement tolérant à la fumigation (par les gaz insecticides : bromure de méthyle ou phosphine, par exemple) et peut se développer (au stade larvaire) sur des denrées extrêmement sèches (Champ et Dyte, 1976).

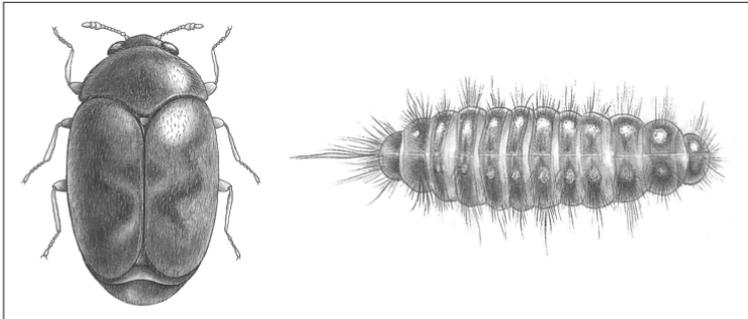


Figure 7.14.
Le dermeste des grains et sa larve caractéristique
(d'après Doc. Roussel Uclaf).

Du fait de ces caractéristiques de dangerosité, cette espèce est inscrite sur la liste des organismes de quarantaine dans tous les pays de la zone à climat tempéré. L'adulte est inoffensif et sa longévité est réduite à quelques semaines. Les larves de couleur rousse sont caractéristiques



des espèces de Dermestidés avec le corps couvert de lignes de soies courtes et raides. Elles ont un comportement grégaire et se réfugient dans des endroits protégés comme les tas de sacs de jute en contact avec les murs ou le sol des entrepôts de riz, arachides, tourteaux, céréales stockés en climat tropical (Fleurat-Lessard, 1996).

Les mycétophages des grains (familles Mycetophagidés et Lathridiidés)

Dans les stocks de céréales encore humides et en particulier juste après la récolte, on peut rencontrer des espèces opportunistes à régime mycophage qui tirent parti des moisissures des grains et impuretés humides. Une espèce en particulier, *Typhaea stercorea* est très souvent confondue avec les espèces du genre *Tribolium* dans les stocks de céréales : de taille et de couleur sensiblement identique à un tribolium, cette espèce s'en distingue au niveau du corps entièrement recouvert de soies courtes et sa forme plus effilée aux extrémités. Il est important d'identifier correctement cette espèce qui n'est pas dangereuse et qui disparaît dès que le grain est sec, simplement par l'absence de nourriture disponible. La présence de ces Coléoptères à régime mycophage dans les denrées stockées est un indicateur de mauvais état de conservation avec développement de microorganismes fongiques sur des produits trop humides.

Les Lépidoptères

Au stade adulte, ce sont des papillons très mobiles qui ont tous une bonne aptitude au vol pouvant les conduire à des distances importantes à partir du lieu d'émergence. La femelle a donc un rôle de dissémination, avec la capacité de détecter à distance les odeurs de denrées alimentaires de bonne qualité pour sa progéniture. Les papillons des espèces nuisibles aux denrées stockées (appelées communément mites alimentaires) sont de petite taille, 1 à 2 cm de longueur au repos, ce qui les fait qualifier parfois de « micro-lépidoptères ». Les chenilles qui causent les dégâts aux stocks de diverses denrées alimentaires stockées ont une morphologie de ver avec un tégument fin et déformable qui leur permet de se déplacer en rampant. Elles tissent un fil de soie au cours de tous leurs déplacements et la présence abondante de chenilles est accompagnée de l'apparition d'un voile soyeux à la surface des stocks de denrées qu'elles ont infestés. La chrysalide est protégée par un cocon de soie tissé par la chenille du dernier stade larvaire. Il peut être déposé dans différentes situations (dans ou en dehors du substrat selon l'espèce). Les papillons ont les ailes recouvertes d'écailles et ils n'ont pas de mandibules : leurs pièces buccales sont transformées en trompe rétractile suceuse ne leur permettant de s'alimenter qu'à

partir de substances liquides. Ils ne causent donc aucun dégât quand ils émergent des denrées stockées. Ils représentent le stade de dissémination et de reproduction de l'espèce. Leur couleur est terne et elle justifie leur appellation commune de mites (la mite du riz, *Corcyra cephalonica*) ou de teignes (la teigne des fruits secs, *Plodia interpunctella*). La durée de vie du papillon est très brève, de l'ordre de 1 à 3 semaines. L'accouplement a lieu quelques heures après l'émergence et différemment de ce qui a lieu avec les Coléoptères, la femelle pond une centaine d'œufs ou plus en 2 à 5 jours seulement. Ce sont les larves ou chenilles qui causent les dégâts aux stocks de grains qu'elles peuvent attaquer avec leurs mandibules bien développées (figure 7.15).

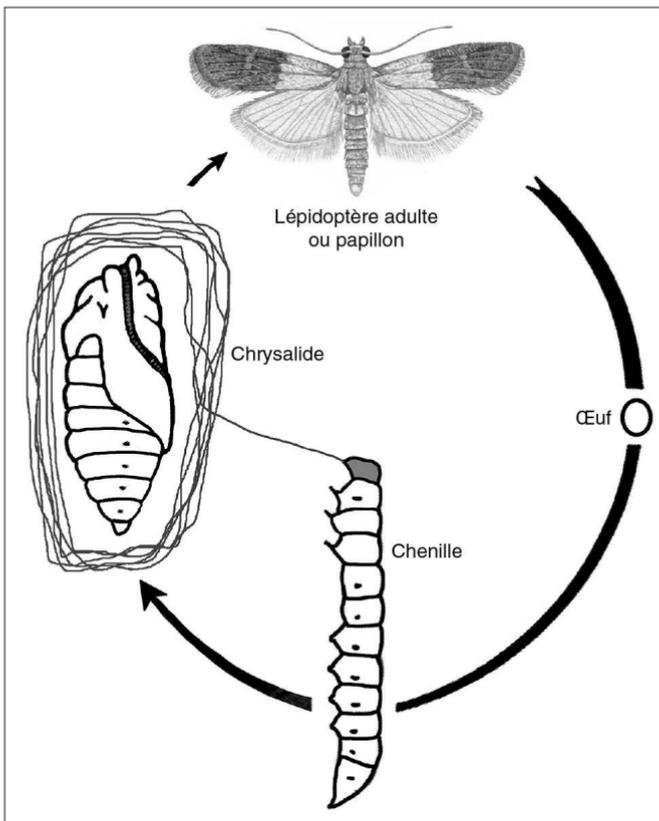


Figure 7.15.

Cycle de développement d'une espèce commune de Lépidoptère nuisible aux produits alimentaires amylacés (la mite de la farine, *Ephestia kuehniella*).



L'alucite des céréales (famille des Gelechiidés)

L'alucite des céréales, *Sitotroga cerealella*, est un petit papillon (10 à 15 mm d'envergure) de couleur beige clair (figure 7.16) qui dépose ses œufs principalement sur les épis avant maturité complète, en particulier lorsque les céréales sont récoltées tard en saison (maïs, sorgho, riz). La jeune chenille qui sort de l'œuf pénètre l'enveloppe du grain pour se développer ensuite à l'intérieur sous forme cachée. L'épi est infesté par les formes cachées de l'alucite dès la récolte. Les adultes de la génération suivante qui émergent dans les lots de grains entreposés ou dans les épis stockés en greniers peuvent immédiatement ré-infester les graines sèches, sans avoir à retourner dans les champs cultivés.

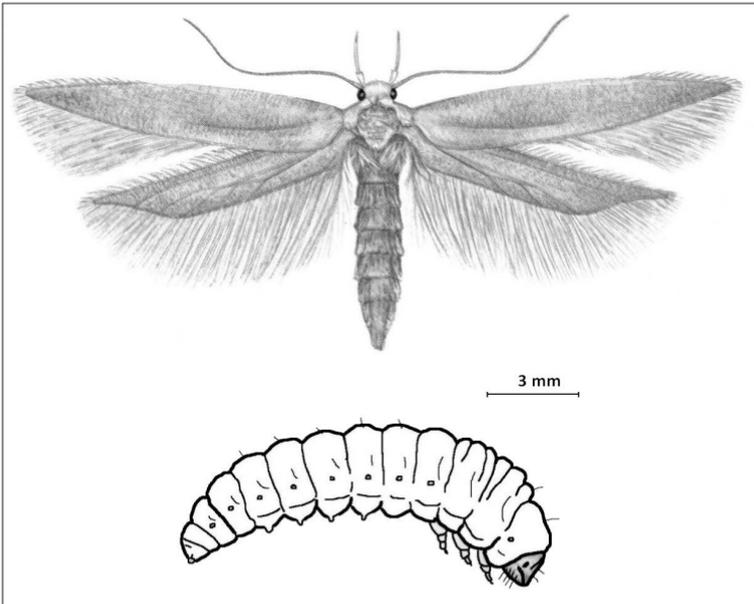


Figure 7.16.

L'alucite des céréales et sa chenille (d'après Doc. Roussel Uclaf).

Les pyrales de la farine, des fruits secs (famille des Pyralidés)

Les différentes pyrales des grains et des produits céréaliers appartiennent à la sous-famille des Phycitines et forment le groupe des mites alimentaires. Le papillon de la mite de la farine, *Ephestia kuehniella*, a une couleur grise caractéristique avec des bandes d'écailles sur les ailes antérieures qui forment un dessin caractéristique. C'est un fléau

des moulins avec des chenilles à comportement grégaire qui vivent dans les endroits où la nourriture est abondante et en particulier dans les circuits et conduits de transport et manutention de la farine. Lorsque plusieurs générations ont empilé les cocons de chrysalidation dans un conduit de transport de farine, il n'est pas rare de voir ce conduit finir par être complètement bouché par cet empilement de cocons ce qui nécessite l'arrêt prolongé de la production pour assurer le désengorgement. Depuis que les céréales sont nettoyées à sec dans les moulins modernes, les pullulations de mite de la farine sont devenues moins fréquentes.

La teigne des fruits secs, *Plodia interpunctella* est elle aussi facile à identifier. D'une envergure de 15 à 20 mm, elle a les ailes antérieures bicolores avec la partie distale de couleur beige clair et la partie proximale à couleur cuivrée d'aspect métallique (figure 7.17). La nuisibilité de cette espèce est particulièrement élevée du fait d'une part de sa grande polyphagie et d'autre part du passage par une chenille de dernier stade qui migre systématiquement en dehors du substrat qui l'a nourrie. Elle s'alimente indifféremment sur fruits secs sucrés et à coque, produits amylacés, farines et semoules, plantes séchées, chocolat, croquettes pour animaux, flocons de maïs...

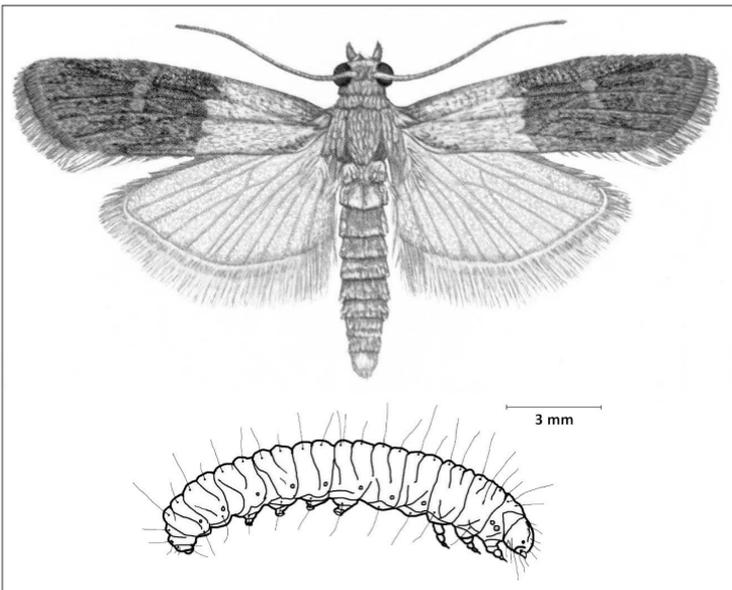


Figure 7.17.
La teigne des fruits secs et sa chenille (d'après Doc. Roussel Uclaf).



L'apparition soudaine de papillons de la teigne des fruits secs venant d'endroits sans denrée alimentaire ne facilite pas la localisation du foyer d'infestation. Aujourd'hui, cette mite alimentaire est la plus répandue dans la chaîne alimentaire des produits secs, depuis les matières premières alimentaires, jusqu'aux réserves des particuliers en passant par les usines de fabrication et les magasins de distribution. Les quatre espèces de pyrales des denrées stockées, *Ephestia kuehniella*, *Plodia interpunctella* ainsi que *Ephestia elutella* (pyrale du cacao) et *Cadra cautella* (teigne des entrepôts), ont un composé commun dans la phéromone sexuelle émise par les femelles pour attirer les mâles. Cela a permis la mise au point de pièges de surveillance des vols de papillons de ces pyrales dans les entrepôts de denrées sensibles aux attaques de ces mites alimentaires. Ces pièges à phéromone sont un excellent moyen de suivi des différentes générations de ces mites et pour localiser les endroits des foyers de multiplication.

La mite du riz (famille des Galleriidés)

La mite du riz, *Corcyra cephalonica*, est un petit papillon (envergure 15 à 25 mm) de couleur terne (figure 7.18) qui est répandu principalement dans les pays à climat chaud et qui recherche les réserves de maïs, d'arachides, les fèves de cacao ou le riz brun pour se reproduire. Les chenilles sont de couleur blanchâtre et ont un comportement particulier de fuite lorsqu'elles sont dérangées : elles se laissent tomber au sol

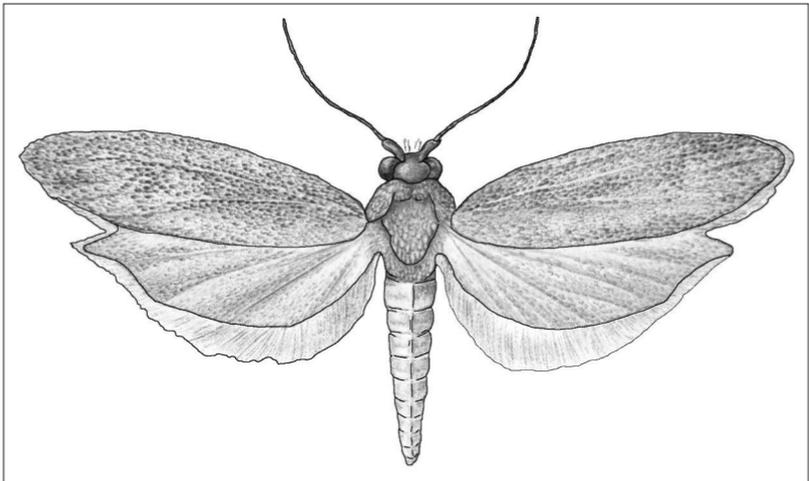


Figure 7.18.

La mite du riz (d'après Doc. Roussel Uclaf).

accrochées à un fil de soie rapidement tissé, au moment de la manutention de sacs de fèves de cacao, par exemple. Cette espèce ne peut pas être surveillée par des pièges à phéromone du fait de la complexité des comportements d'approche entre mâle et femelle, très différents de ceux des pyrales. Cette espèce est en recrudescence sur les stocks de fèves de cacao et elle fait partie des espèces nuisibles à éradiquer dans les zones de production, avant exportation.

D'autres arthropodes indésirables des stocks et structures de stockage

Les psoques (ordre des Psocoptères)

Ces petits insectes primitifs (1 à 2 mm) vivent surtout dans les denrées humides en début d'échauffement. Leur tégument est mince, plus ou moins translucide selon les espèces. Certaines ont une coloration brune à noire, d'autres une teinte rougeâtre, ce qui a probablement influencé leur appellation familière de poux comme, par exemple poux des bois ou poux des livres. Les larves ne diffèrent des adultes que par leur taille plus réduite et par l'absence d'ailes normales quand celles-ci existent chez l'adulte (figure 7.19) car plusieurs espèces en sont dépourvues (aptères). Très souvent, la reproduction est parthéno-génétique et les œufs pondus par les femelles non fécondées donnent des individus du même sexe. Les déplacements s'effectuent de façon saccadée sur de courts trajets. Les températures élevées (30 à 35 °C) sont très favorables à leur pullulation en milieu suffisamment humide et le cycle complet de développement s'effectue alors en moins de deux semaines. Les germes des céréales sont les plus souvent visés

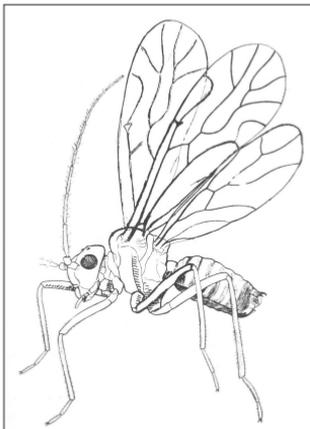


Figure 7.19.
Psoque ailé
(d'après Weidner et Rack, 1984).



dans les attaques faites par les psoques, mais on en rencontre souvent aussi dans les produits céréaliers (farines, semoules, aliments du bétail ou pour les volailles). Ils prolifèrent dans les grains stockés à température et humidité élevées en se nourrissant des moisissures qui se développent dans les zones les plus directement exposées à l'humidité de l'air. Dans certains cas de pullulation, le tas de grains infesté par les psoques semble recouvert à certains endroits de «poussière qui bouge». Ces pullulations sont en recrudescence dans les grains chauds et à humidité supérieure au seuil limite pour une conservation de longue durée en climat chaud.

Des arthropodes auxiliaires antagonistes des ravageurs nuisibles

Arthropodes à comportement prédateur

Il existe deux espèces d'insectes prédatrices importantes pour la lutte biologique dans les denrées stockées : la punaise des larves des Coléoptères des grains, *Xylocoris flavipes* et le coléoptère prédateur des larves du grand capucin, *Teretriosoma nigrescens*. Ces deux espèces se nourrissent des larves de Coléoptères dans les grains et sont utilisées dans de nombreux pays comme des auxiliaires utiles, puisque susceptibles de limiter la vitesse de multiplication de leurs proies respectives : les Coléoptères des grains stockés (tribolium, silvains ou espèces mycophages) et le grand capucin du maïs, *Prostephanus truncatus*.

Certains Acariens gamasides et cheylètes ont également un comportement prédateur. Le cheylète, *Cheyletus eruditus* (figure 7.20), est un prédateur d'acariens saprophytes, *Acarus siro* ou *Tyrophagus putrescentiae*, qui vivent sur les grains stockés envahis par des moisissures.

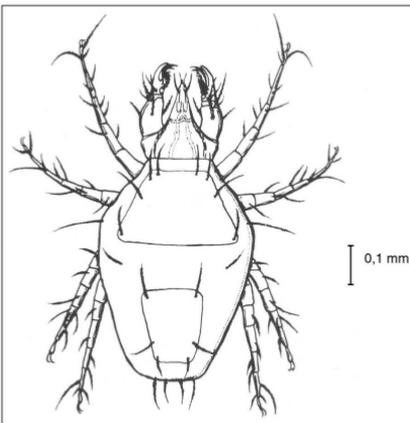


Figure 7.20.
Adulte de *Cheyletus eruditus*
(d'après Scotti, 1978).

Arthropodes parasitoïdes

La plupart des parasitoïdes d'insectes appartiennent à l'ordre des Hyménoptères (guêpes, abeilles, bourdons...). Ils sont de petite taille, voire de très petite taille, avec quelques exceptions comme certains ichneumons (Hyménoptères Ichneumonidés), par exemple, l'espèce *Venturia canescens*. Chaque espèce parasite une gamme limitée d'espèces nuisibles, soit en tant qu'endoparasitoïde de larves (*V. canescens* ou *Anisopteromalus calandrae*) ou d'œufs (*Trichogramma evanescens*), soit en tant que parasite externe de chenilles de Lépidoptères (par exemple, *Habrobracon hebetor*).

Approche préventive de la lutte contre les insectes granivores

Les bonnes pratiques de conservation des grains et graines (céréales, légumineuses, oléo-protéagineux) et produits dérivés (farine, semoule, tourteaux, issues diverses) reposent sur la prophylaxie, c'est-à-dire sur le nettoyage et l'assainissement des locaux et cellules ou récipients d'entreposage avant leur remplissage, l'aménagement des structures de stockage pour empêcher l'accès des prédateurs et le raisonnement des interventions quand elles sont indispensables. Toutefois, la préservation à long terme des stocks de grains et de graines alimentaires entreposés en climat chaud est très difficile et le dépistage précoce et la surveillance continue de la présence d'insectes sont des éléments-clés de la prévention des risques d'infestation. Les mesures de prévention contre une infestation d'origine externe sont reprises ci-après.

▮ Nettoyage et vide sanitaire dans les locaux et les cellules vides

C'est le plus souvent sur les lieux d'entreposage que les nouvelles récoltes sont infestées par les insectes nuisibles. Le nettoyage poussé des locaux d'entreposage, des cellules, récipients ou conteneurs de stockage vides et des greniers, accompagné d'un traitement de désinfestation des surfaces internes et externes est une précaution qui permet de réduire fortement les risques d'infestation après la mise en réserve des denrées après récolte. Les restes de stocks anciens doivent être systématiquement éliminés avant de réutiliser les structures de stockage pour y loger les nouvelles récoltes. Ces opérations de nettoyage poussé constituent la première étape de la démarche de protection



antiparasitaire intégrée préconisée dans les règlements nationaux ou internationaux sur l'hygiène des denrées alimentaires (Paquet hygiène des aliments de l'Union européenne ou *Food Safety Modernization Act* aux États-Unis, par exemple). Elle correspond au premier levier de la prévention des risques pour la qualité.

▮ Sécurité des locaux, des structures de stockage et des ateliers de transformation

Dans le cas de denrées saines au moment de la récolte, la principale mesure de prévention des risques de détérioration pendant la conservation consiste d'une part, à empêcher l'arrivée d'insectes venus de l'extérieur du local d'entreposage et d'autre part, à créer les conditions les plus défavorables possibles à la multiplication des insectes nuisibles. Pour remplir la première condition, les denrées doivent être stockées dans des locaux ou des récipients «étanches aux insectes». Les locaux d'entreposage doivent être maintenus les plus frais possible, ce qui se passe naturellement dans le cas des installations de stockage enterrées ou les structures souterraines creusées dans la roche ou l'argile en climat sec (par exemple, matmora marocaine, ou silo dôme semi-enterré).

Dans un entrepôt traditionnel, la température ne devrait pas dépasser 18°C pour réduire le taux d'accroissement des insectes à un niveau de risque acceptable sur le long terme. En effet, la plupart des espèces d'insectes des grains qui vivent dans les pays chauds ont un seuil thermique de développement rarement inférieur à 18°C. À cette température, la durée de développement des insectes est de plusieurs mois, ce qui laisse le temps d'utiliser la denrée avant qu'elle ne soit considérée comme visuellement infestée. Quand la structure de stockage peut être rendue hermétique, les risques d'une contamination venue de l'extérieur sont écartés et il devient plus facile d'appliquer des interventions correctives en cas de présence avérée d'insectes à l'intérieur (gazage, plantes aromatiques à propriétés insecticide ou insectifuge ou leurs huiles essentielles). De plus, la température est le facteur principal d'altération des semences en climat chaud et la capacité germinative ne peut être conservée que si elles sont maintenues à température modérée entre la récolte et leur utilisation. Pour éviter la détérioration des semences, la conservation au niveau villageois des semences dans des jarres en terre cuite, quelquefois enterrées partiellement dans le sol ou sous un abri isolant (en terre), rejoint cette préoccupation de les protéger contre les températures excessives.

II) Méthodes et outils de détection précoce et de surveillance des infestations

Dans les principes de la démarche d'assurance de qualité sanitaire, la détection précoce des premiers insectes colonisant une denrée entreposée et la surveillance continue du niveau des populations est indispensable pour déterminer le seuil de densité d'insectes supportable économiquement. Les outils de détection rapide et de surveillance continue de l'activité ou des déplacements des insectes dans les denrées entreposées constituent le second pilier de la protection antiparasitaire intégrée des denrées stockées. Les principaux outils disponibles sont les pièges à Coléoptères (rampants), les pièges lumineux pour les insectes volants et les pièges à phéromone pour les espèces de Lépidoptères qui sont insensibles aux rayonnements des pièges lumineux (pyrales des denrées). Les pièges à Coléoptères peuvent être améliorés par adjonction de substances attractives ou par des phéromones d'agrégation (cas du piège utilisé pour la vrillette du tabac, *L. serricornis*). L'ensemble de ces préconisations (sanitation, lutte préventive et *monitoring* de la présence d'insectes en cours de conservation) s'applique également aux installations de stockage industriel de denrées alimentaires associées aux grandes métropoles ou à l'approvisionnement des usines des industries de transformation.

Méthodes de lutte directe en cas d'infestation visible

La lutte contre les insectes nuisibles infestant les denrées stockées est complexe et doit être appliquée de façon réfléchie, dans le respect de la législation en vigueur (qui suit le principe de précaution) et en tenant le plus grand compte de la triple exigence de protection du consommateur, de l'environnement et la préservation des ressources naturelles (notion de « durabilité »). C'est une des raisons pour lesquelles, la lutte chimique avec application de spécialités insecticides à résidus persistants après le traitement, n'est autorisée que pour la protection des grains avant toute transformation. Les insecticides chimiques de protection des grains après récolte sont des substances actives issues de la chimie organique de synthèse qui ont obtenu l'autorisation d'usage pour l'assainissement et la désinsectisation des locaux et récipients ou conteneurs d'entreposage vides, des usines de première transformation des céréales et la désinsectisation des grains. Les avantages de la lutte chimique contre les ravageurs des grains avec des insecticides à longue persistance d'action sont liés à



son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et à la durée de protection qui peut se prolonger plusieurs mois après le traitement, tant que la teneur en résidus actifs reste supérieure au seuil légal pour les insectes cibles (charançons, capucins, tribolium, silvains...). Mais l'usage régulier d'insecticides persistants comporte aussi de sérieux inconvénients comme la possibilité de créer des races résistantes et de laisser des résidus jusque dans les produits transformés et les aliments à base de céréales.

Le gazage des denrées stockées et des magasins d'entreposage par des gaz insecticides (phosphine, bromure de méthyle, acide cyanhydrique, fluorure de sulfuryle, etc.) peut être utilisé sur une gamme beaucoup plus grande de denrées à désinsectiser, du fait qu'il ne laisse aucun résidu nocif après l'opération de fumigation. Ainsi, les céréales en grains, les légumes secs, les fruits secs, les produits de première transformation des grains et graines, les balles de tabac, les fèves de cacao, les épices... peuvent être désinsectisés par fumigation à la phosphine pourvu que l'on puisse confiner les lots à désinsectiser dans une enceinte étanche, que celle-ci soit réalisée de façon temporaire (sous bâche étanche) ou permanente (chambre de fumigation, cellule ou local étanche). Mais, le gazage étant très dangereux pour l'homme, les opérations de gazage doivent être réalisées par des opérateurs agréés ayant la formation, l'expérience et les qualifications nécessaires pour pouvoir les réaliser en toute sécurité et en assurant la meilleure efficacité possible. En effet, après la fumigation, une fois les denrées désinsectisées sorties de l'enceinte de gazage, elles ne sont plus protégées d'une ré-infestation éventuelle, si des insectes sont présents dans l'environnement de leur nouveau lieu d'entreposage ou si certains stades des insectes présents dans la denrée ont survécu au gazage (cas des œufs ou des nymphes de Coléoptères qui sont plus tolérants à la phosphine que les adultes et les larves). Pour toutes les denrées transformées qui ne peuvent recevoir légalement d'application insecticide, il faut se tourner vers les méthodes de lutte physique ou mécanique en association avec les mesures de prévention exposées plus haut.

▮ Lutte physique ou mécanique

Face aux inconvénients de la lutte chimique avec des produits insecticides rémanents et aux préconisations actuelles des grandes agences internationales chargées des denrées alimentaires (EFSA européenne, FDA américaine, JFSC japonaise, etc.), les procédés physiques de prévention et de protection des stocks de produits agricoles stockés à long terme ont connu un essor régulier au cours des dix dernières années, suite aux

nouvelles réglementations sur l'hygiène des aliments et la réduction des usages des pesticides, dans le cadre d'une agriculture durable et respectueuse de la santé du consommateur et de l'environnement. Pour ce qui concerne la préservation des grains stockés, la lutte physique contre les insectes est principalement basée sur le contrôle de la température. En pays chaud, le stockage enterré ou semi-enterré est un des moyens de conservation des grains à température moins élevée que dans les silos de surface. Les chocs thermiques (solarisation, passage rapide en séchoir, par exemple) peuvent réduire les taux d'infestation dans les lots récoltés (café, maïs, mil, légumineuses, manioc), pourvu qu'après le traitement par la chaleur ils soient conservés dans des récipients ou des conteneurs étanches aux insectes et dans un endroit frais.

L'alternative à la lutte chimique la plus prometteuse est la lutte thermique, les insectes ne supportant pas les températures supérieures ou égales à 60°C pendant plus de quelques minutes. En pays développés, des installations à gros débit ont été construites pour la désinfestation du blé destiné à l'exportation (comme en Australie). Toutefois, l'expansion de ce type de procédé thermique de désinsectisation (thermo-désinsectisation) est limitée principalement par le coût des équipements et de l'énergie électrique nécessaire, ainsi que par la difficulté de mise en œuvre de ces procédés à l'échelle pratique dans certaines situations éloignées des grands centres urbains.

L'usage de poudres abrasives et desséchantes est une autre alternative à la lutte chimique qui remonte à l'antiquité. À cette époque, les cendres de bois, l'argile réduite en poudre ou le sable fin étaient considérés comme de bons insecticides, que l'on pouvait facilement éliminer des grains avant utilisation alimentaire par criblage ou lavage préalable. Aujourd'hui, ces matériaux naturels ont été remplacés par la terre de diatomées qui est une roche sédimentaire constituée d'algues unicellulaires, les diatomées. Réduits en poudre fine, les squelettes de silice des diatomées ont des propriétés abrasives et déshydratantes. Lorsque la poudre de terre de diatomées est répandue sur le grain, elle finit par s'incruster dans la cuticule des insectes et cause des blessures aux articulations, ce qui provoque une fuite d'hémolymphe et la mort des insectes par déshydratation. Le traitement des parois des locaux et conteneurs de stockage vides par la terre de diatomées, avant leur remplissage, est une précaution qui limite les infestations venues de l'extérieur. Dans les usines de transformation de grains et graines, le traitement par la chaleur (dans les moulins, par exemple), ou l'application de formulations liquides de terre de diatomées sur les murs, les structures vides et les sols font partie des mesures de sanitation générale des locaux.



Les procédés physiques de désinsectisation des denrées infestées après-récolte sont en hausse constante dans le monde en tant qu'alternative à la lutte chimique ou pour donner des solutions dans les cas où la lutte chimique est interdite.

▮ Traitements insecticides autorisés seulement sur les grains

La lutte chimique autorisée pour la protection insecticide des grains bruts (issus de récolte, sans transformation autre que le séchage) englobe l'usage des insecticides naturels et des substances actives issues de chimie organique de synthèse, tirées des produits du pétrole. Les produits naturels sont appelés des phyto-insecticides ou produits de biocontrôle, tandis que les produits de synthèse chimique sont appelés communément pesticides.

Utilisation de phyto-insecticides et autres produits naturels

L'utilisation des extraits végétaux en protection des denrées entreposées a été expérimentée dans tous les pays en développement dans lesquels l'accès aux spécialités insecticides de l'agrochimie était limitée ou inaccessible financièrement. Certaines plantes aromatiques de climat méditerranéen ou subtropical contiennent des huiles essentielles à propriétés insecticides avérées. Les plus actives sont les essences de menthe, d'origan, de cannelle, de pyrèthre, de moutarde, de romarin, d'eucalyptus, d'écorces d'agrumes, de feuilles et graines de *neem*, de clous de girofle, de fleur de tagète... qui contiennent des terpènes plus ou moins volatils et qui agissent principalement par inhalation. Certains composés présents dans ces huiles essentielles provoquent la mort des insectes par intoxication directe par la voie respiratoire (par exemple, l'essence de moutarde), par leur activité ovicide et larvicide et/ou en réduisant l'activité reproductrice des espèces ciblées.

Toutefois, l'utilisation des extraits végétaux volatils présente quelques inconvénients majeurs qui ont limité leur emploi, tant en pays développés qu'en pays en développement :

- la plupart des huiles essentielles ont une persistance d'action limitée en relation avec leur tension de vapeur ce qui oblige à répéter les traitements régulièrement pour assurer une protection des lots de grains et graines stockés à long terme ;
- chaque huile essentielle est plus ou moins spécifique d'une espèce d'insecte cible ce qui nécessite de bien connaître les espèces d'insectes à combattre, ainsi que le spectre d'activité insecticide des huiles essentielles disponibles et autorisées à l'emploi ;

– la composition en principes actifs de chaque huile essentielle d'origine différente est susceptible de varier dans de larges limites selon la région de culture de la plante, le stade de récolte, le procédé d'extraction et la formulation finale, ce qui empêche tout développement d'une spécialité commerciale.

Aussi, beaucoup de ces plantes à huiles bio-insecticides (feuilles de *neem*, de thym, d'origan, branches de romarin, clous de girofle, graines de moutarde) sont utilisées directement incorporées dans les lots de grains confinés en conteneurs étanches pour éviter une disparition trop rapide des principes actifs volatils dans toutes les situations où les autres moyens de protection sont indisponibles ou inaccessibles économiquement. Les huiles essentielles ont également été prospectées pour leurs propriétés répulsives vis-à-vis des insectes nuisibles, notamment les insectes vecteurs de maladies graves (moustiques, mouches, poux, puces).

Utilisation des insecticides organiques de synthèse

Les produits insecticides contenant une substance active autorisée pour le traitement des grains et graines alimentaires sont des organophosphorés ou des pyréthrinoïdes. Dans chacune de ces deux familles d'insecticides, le nombre de substances actives qui sont autorisées pour fabriquer des spécialités commerciales insecticides destinés à une application directe sur les grains est extrêmement limité (tableau 7.2).

Autres produits chimiques disponibles

Comme les pyréthrinines naturelles, l'extrait de *neem* et le spinosad sont des insecticides qui ont un effet significatif sur les insectes des denrées, en particulier le capucin des grains, *Rhizopertha dominica*. Toutefois, ils nécessitent un temps d'exposition plus long pour un même résultat de mortalité que les insecticides conventionnels autorisés, sont beaucoup plus coûteux et peuvent se révéler toxiques par leurs résidus (cas de l'extrait de *neem*, considéré par certains auteurs comme un perturbateur endocrinien). Ce sont toutefois des produits naturels qui sont autorisés à l'emploi (seulement sous forme d'extraits végétaux) pour la protection des grains et des graines de l'agriculture biologique ou l'assainissement des structures et conteneurs de stockage vides.

Formulations disponibles et matériel d'application des insecticides

Les formulations liquides ou en poudre des pesticides disponibles sur le marché sont diverses, en relation avec un mode et un matériel d'application spécifique. Les formulations liquides les plus courantes, à diluer dans l'eau au moment de l'emploi, sont le concentré émulsionnable (CE),



Tableau 7.2. Matières actives insecticides utilisées avec ou sans homologation pour le traitement des grains et graines en pays chauds.

Matière active (MA)	Nom commercial de quelques spécialités insecticides	Formulation	Dose de matière active pour céréales (mg/kg)	Limite maximale de résidus pour céréales en grain (mg/kg)
Malathion	Zithiol ou Malagrain	poudre	Non autorisé	
Chlorpyrifos-méthyle	ReIdan	Poudre et CE	2,5	3,0
Chlorpyrifos-éthyle	Dursban	Poudre et CE	Non autorisé	non toléré < 0,02
Cyperméthrine	Talisma	Liquide (ULV)	1,67	2,0
Deltaméthrine	K-Obiol	Poudre et CE	0,5	2,0
Méthoprène	Dianex ou Diacon	CE	Non autorisé seul	
Pyrimiphos-méthyle	Actellic	Poudre et CE	4,0	5,0
Phosphure d'aluminium	Phostoxin	Générateur de gaz (solide)	1,5 à 3 g/m ³	0,1
Phosphure de magnésium	QuickPhos	Générateur de gaz (solide)	1,5 à 3 g/m ³	0,1
Spinosad	Conserve SC	CE	1,0	1,5
Butoxyde de piperonyle (synergiste de pyréthrinoides)	PBO	CE	Non autorisé avec pyréthrines naturelles	20

CE = concentré émulsifiable (à mélanger à l'eau avant l'emploi)

ULV = spécialité prête à l'emploi active à très bas volume (*Ultra Low Volume*)

la suspension concentrée (SC), qui est une dispersion stable de particules solides et de gouttelettes en phase aqueuse, et le concentré soluble (SL). Pour les traitements à grande échelle, les formulations liquides prêtes à l'emploi sont privilégiées (UL). Elles permettent de mettre en œuvre directement sans dilution une quantité de liquide extrêmement faible (très faible volume, ultra-bas volume ou ULV). Toutefois, ces formulations ULV ne sont appliquées qu'avec des appareils spéciaux, eu égard aux très faibles quantités à appliquer. Ces matériels, capables de délivrer le pesticide sous forme d'aérosol, sont bien adaptés à la réalisation de chantiers importants, généralement confiés à des entreprises spécialisées qui disposent de ces générateurs de «brouillard insecticide» à très fines particules (5 à 20 μm , transportés dans un flux d'air chaud ou froid, généré par une turbine à propulsion thermique ou électrique, respectivement). Ces solutions prêtes à l'emploi qui ne nécessitent aucune dilution préalable sont également plus sûres pour les applicateurs.

Les formulations de pesticides les plus utilisées par les producteurs locaux dans les pays du Sud pour le traitement des grains et graines stockés, des épis, des parois des greniers ou des sacs (vides ou remplis de grains) sont les poudres pour poudrage (PP). Les matériels d'application des insecticides de protection des grains en post-récolte sont des matériels pour pulvérisation de liquides comme les atomiseurs ou les pulvérisateurs manuels (figure 7.21) ou motorisés (figure 7.22) peuvent être utilisés. Cependant, la fixation et le contrôle de la dose de bouillie à appliquer sur le grain est plus difficile à ajuster qu'avec des poudres (la pesée est plus facile que la mesure de liquide) ce qui donne souvent lieu à des surdosages. Les doses préconisées pour le traitement des graines peuvent varier de 1 l/tonne avec un pulvérisateur classique utilisant un concentré émulsionnable dilué dans l'eau, à 0,1 l/tonne (100 ml) avec les spécialités prêtes à l'emploi, mises en œuvre avec un nébulisateur spécial de traitement par nébulisation fine à très bas volume. Les formulations en poudre sont encore largement utilisées au niveau villageois pour le traitement des grains et graines stockées. Les insecticides pour poudrage sont d'utilisation facile sur les grains après récolte et nécessitent des systèmes d'application rudimentaires comme des boîtes métalliques perforées pour saupoudrer les graines lorsque la récolte est en quantité limitée ou pour imprégner d'insecticide les sacs de grains. Toutefois, il existe également des poudreuses manuelles à soufflet actionné à la main ou à entraînement par manivelle (figure 5.13) qui permettent généralement un meilleur contrôle des doses à appliquer.

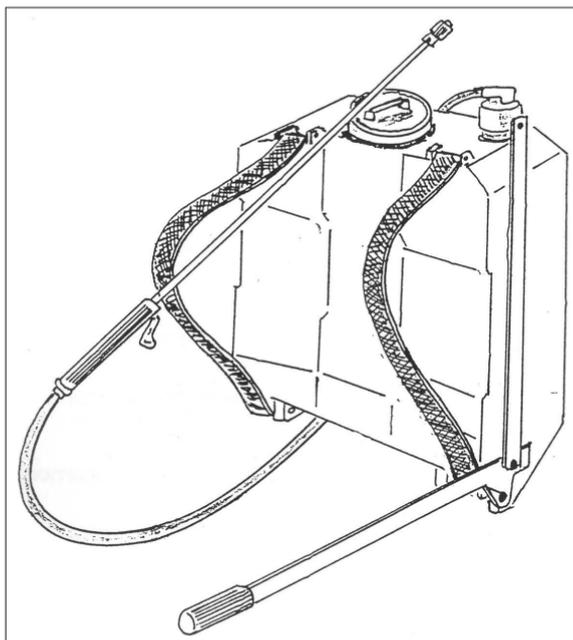


Figure 7.21.
Pulvérisateur manuel (d'après Ceemat).

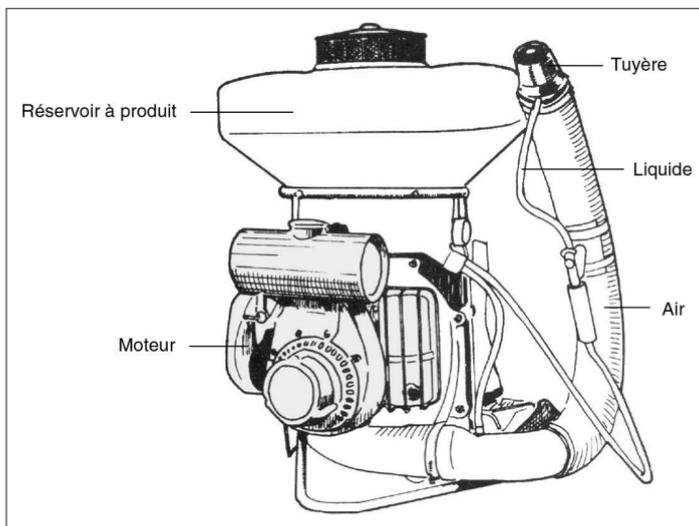


Figure 7.22.
Pulvérisateur pneumatique (d'après Ceemat).

Inconvénients de l'usage des insecticides persistants

L'augmentation constante du coût des pesticides au cours des dernières années et la généralisation des problèmes de résistance des ravageurs aux produits les plus utilisés a fait se détourner les petits producteurs de leur usage courant. Ces effets néfastes sont aggravés par une tendance assez générale à utiliser un produit autorisé à l'emploi sur une culture particulière pour un autre usage non autorisé (sur culture légumière ou fruitière, stock de céréales, hygiène domestique, et vétérinaire...). La connaissance des effets des pesticides sur la santé humaine est très insuffisante chez les producteurs. Ainsi, on rencontre fréquemment des situations où le producteur de légumineuses utilise des pesticides spécifiques du cotonnier pour traiter toutes les autres cultures, tout au long de l'année (comme le niébé ou la tomate), alors que ces pesticides du cotonnier ne sont pas autorisés à l'emploi sur produit végétal de consommation directe (Fleurat-Lessard, 2011). Cette notion de spécificité d'un pesticide pour une espèce à protéger, ignorée par certains utilisateurs, conditionne la composition en adjuvants de formulation et les spécialités autorisées pour le traitement des grains. Les formulations autorisées pour le traitement direct des grains et des graines alimentaires contiennent des adjuvants moins nocifs que ceux des formulations réservées à la protection des plantes. Ces pratiques de «détournement d'usage» représentent donc un danger toxique pour le consommateur final quand il s'agit de traitements appliqués sur des grains ou graines largement et régulièrement autoconsommés par la famille de l'agriculteur.

Dans les pays en développement, les circuits de distribution des pesticides ne sont pas toujours convenablement organisés jusqu'au niveau des petits producteurs éloignés des principaux centres urbains. De plus, ils échappent le plus souvent au contrôle de la qualité des produits phytosanitaires (concentration en matière active respectée, emballage inviolable, étiquette neuve, lisible et propre, contenant non détérioré...). Sur ce marché parallèle des pesticides, et non réglementé, cohabitent beaucoup de négociants formels et informels, ces derniers étant le plus souvent incontrôlables. Dans ces conditions de difficulté temporelle d'approvisionnement en intrants phytosanitaires des producteurs de cultures vivrières «de garde» (maïs, sorgho, riz, mil, fonio, pois, niébé, arachide...), les stratégies de gestion des populations de ravageurs doivent s'appuyer sur des pratiques alternatives, dérivées le plus souvent des méthodes traditionnelles au niveau villageois. La gestion durable des principaux problèmes de conservation des denrées de base de l'alimentation locale est plutôt basée sur la



prévention des risques, notamment par l'adaptation des pratiques de conservation qui peut amener à un investissement faible ou nul en pesticides : cultures de variétés moins sensibles aux ravageurs de stockage, tri et élimination rapide des grains avariés ou considérés inconsommables, conservation des lots en récipients étanches dès la récolte, incorporation de poudres minérales, d'extraits de plantes ou d'huiles essentielles de fabrication locale.

▮ Utilisation des gaz insecticides pour la fumigation

Domaine d'utilisation des gaz insecticides

Dans le cas où une structure étanche aux gaz est disponible, la désinfestation par gazage (appelée plus couramment fumigation) d'un stock de grains est réalisable en vue d'une éradication complète des insectes, quel que soit leur stade de développement. Le gaz pénètre profondément à l'intérieur des grains et tue les formes cachées, larves, nymphes et adultes pré-émergents, sans laisser de résidus dans le grain. La fumigation proprement dite consiste à maintenir la denrée à désinsectiser dans une enceinte étanche le temps nécessaire pour l'intoxication complète (par inhalation du gaz) des insectes présents dans les lots de grains, graines ou denrées agricoles non transformées à désinsectiser. Le gazage peut s'effectuer en enceinte étanche spécialisée (chambre de fumigation homologuée, autoclave de désinsectisation, chambre de gazage) ou non spécialisée (un fût ou un conteneur en plastique à fermeture hermétique, sous bâche en plastique étanche spéciale gazage recouvrant intégralement le lot de grains à désinsectiser, dans un local ou une pièce étanchée temporairement).

Les gaz homologués pour la fumigation des grains étant toxiques aussi pour l'homme, l'opération de gazage ne peut se pratiquer qu'en conditions drastiques de protection contre le risque d'asphyxie respiratoire. On doit également prendre des mesures de sécurité pour éviter les intrusions intempestives pendant la période durant laquelle la denrée doit rester confinée dans l'enceinte sous gaz pour que la désinsectisation soit effective. La fumigation se pratique donc logiquement pour le traitement de stocks commerciaux de denrées alimentaires sensibles à l'infestation par les insectes et destinées aux marchés contractuels (prévoyant une fumigation avant expédition vers leur destinataire), le plus souvent dans le cadre de l'exportation. Dans la plupart des cas, ces fumigations sont effectuées par des sociétés spécialisées implantées dans les grands centres urbains

ou au niveau des ports de commerce. Elles seules disposent des qualifications, des compétences, du matériel et des moyens logistiques indispensables à l'organisation des chantiers de fumigation en conditions de sécurité et d'efficacité garanties. Le plus souvent, ces opérations sont associées à l'élimination des ravageurs indésirables dans les denrées destinées à l'export ou aux traitements d'éradication d'organismes de quarantaine (mouche des fruits ou cochenilles, par exemple). La réalisation pratique d'une fumigation à grande échelle est soumise à des règlements drastiques de sécurité d'emploi appliquées dans tous les pays, quel que soit leur niveau de développement technologique. Elle n'est donc pas disponible au niveau du producteur local (sauf exception comme en Australie, par exemple). Selon la règle du commerce international, un lot de grains n'est « sain, loyal et marchand » que s'il est indemne d'infestation par des insectes vivants (Anonyme, 1995). Après l'interdiction du bromure de méthyle (gaz aux multiples utilisations en désinfection et désinsectisation des denrées ou des usines et locaux de fabrication ou d'entreposage de denrées alimentaires) au plan mondial dans tous les pays développés en 2005, la phosphine (PH_3) est devenue le fumigant universel de la désinsectisation des lots de grains et graines infestés de façon évidente et donc impropres à la commercialisation en l'état.

Domaine d'utilisation de la fumigation et perspectives

La phosphine, ou hydrogène phosphoré (PH_3) est venue remplacer le bromure de méthyle (CH_3Br) qui était utilisé en chambre de fumigation ou sous bache en plastique pour de multiples usages en désinsectisation (éradication des insectes de quarantaine, désinsectisation des cales de bateau avant le chargement, désinsectisation des cargaisons de grains, graines, fruits secs... en transit pendant le transport maritime des marchandises, désinsectisation complète des usines de transformation de denrées alimentaires...), jusqu'à son interdiction totale dans les pays développés depuis l'année 2005. Le mode d'emploi de la phosphine (qui est en grande partie à l'origine de son succès mondial) est simple et sûr pour l'opérateur : le gaz se dégage progressivement d'un générateur solide (pilule, comprimé ou sachet) à base de phosphure d'aluminium ou de magnésium quand celui-ci est mis au contact de l'humidité de l'air. Le générateur se délite en quelques heures en laissant après diffusion un résidu inerte de sels d'aluminium ou de magnésium. Dans ces cellules de stockage de plusieurs mètres de hauteur, la répartition du gaz sur la totalité de la hauteur du grain peut être accélérée à l'aide d'un système de recirculation forcée extérieur (figure 7.23).

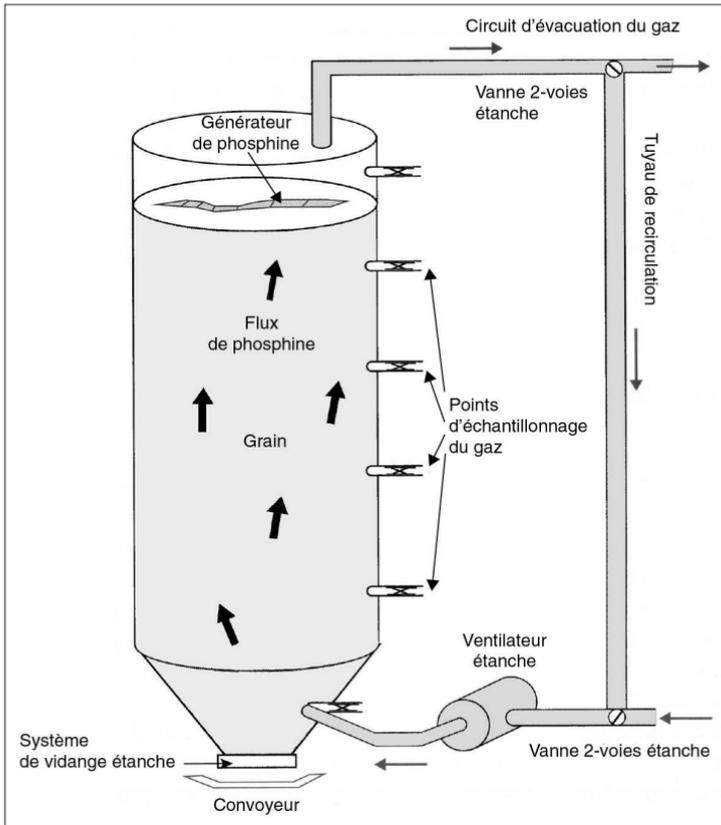


Figure 7.23.

Schéma d'une opération de gazage en cellule-hôpital étanche utilisant le système d'homogénéisation par recirculation externe de la phosphine relarguée par le générateur.

Ce type de formulation en générateur solide facilite le dosage de la quantité de gaz à mettre en œuvre (par simple comptage des pilules ou des comprimés), mais rend très progressive l'augmentation de la concentration (plusieurs heures à un jour selon les conditions de température et d'hygrométrie de l'air dans l'enceinte de gazage). La fumigation à la phosphine (à la pression atmosphérique) demande davantage de temps que le gazage au bromure de méthyle (de 72 h à une semaine en climat chaud contre 24 h, respectivement). C'est un gaz corrosif pour les métaux ce qui le rend inutilisable dans un environnement avec des installations électriques ou des appareils électroniques (comme dans les usines des industries des céréales).

De plus, le bromure de méthyle était utilisable en chambre à gaz sous vide pour accélérer la mortalité des insectes, ce qui n'est pas le cas de la phosphine. Cependant, des dérogations ont été accordées pour les pays du Sud pour continuer à utiliser le bromure de méthyle dans des installations dédiées (chambres à fumigation) pour des utilisations en désinsectisation pour lesquelles il n'existe pas de procédé de substitution économiquement acceptable (destruction d'organismes de quarantaine, désinsectisation de denrées destinées à l'exportation ...). Mais les dérogations octroyées conjointement par l'OMS, la FAO et l'UNEP peuvent être progressivement abrogées dans le cadre des politiques de défense de l'environnement global.

Inconvénients des pesticides et risques pour l'utilisateur

Le principal inconvénient de l'usage régulier de pesticides pour la lutte contre les ravageurs des cultures est l'apparition et la multiplication de races d'insectes résistantes aux substances actives le plus régulièrement utilisées (Champ et Dyte, 1976). Ces populations résistantes peuvent devenir invasives en quelques années. Les cas de résistance les plus inquiétants sont ceux qui se généralisent en quelques années au monde entier, comme *Tribolium castaneum* qui a acquis une résistance généralisée au lindane et au malathion, deux insecticides très utilisés antérieurement pour la protection des stocks de grains et des graines. Un autre exemple est celui du capucin des grains, *Rhizopertha dominica*, qui a également développé une résistance généralisée aux insecticides organophosphorés et à la phosphine. L'usage régulier de fumigations à la phosphine des grains entreposés pour l'éradication des ravageurs primaires (bruchidés des légumineuses, par exemple) en vue de la commercialisation sur les marchés nationaux ou d'exportation, a également provoqué l'apparition de populations d'insectes résistants, en particulier avec la bruche du niébé et du pois chiche, *C. maculatus*.

Protection raisonnée et durable contre les insectes en post-récolte

Des moyens physiques peuvent être associés à l'usage raisonné des pesticides en tant que mesures préventives complémentaires, en particulier la pratique de la désinfestation thermique à la récolte (en saison sèche). Le séchage par solarisation qui assure également la désinsectisation est de mieux en mieux maîtrisé au plan technique



sans moyens spécifiques autres que ceux disponibles au niveau des exploitations agricoles. Le stockage dans des silos ou des récipients partiellement ou totalement enterrés fait partie des méthodes traditionnelles dans de nombreuses régions du monde (voir chapitre 4). La température des grains et des graines entreposés s'y maintient à des niveaux plus bas que dans les greniers aériens ce qui limite le taux de multiplication des insectes. Certains greniers aériens construits avec des parois en briques d'argile ou de terre de forte épaisseur et bien isolés thermiquement au niveau du toit sont plus favorables à la bonne conservation des grains pour la même raison. Les petits producteurs qui conservent une partie de leur récolte de céréales ou de légumes secs pour servir de semences préfèrent souvent utiliser les méthodes de prévention non chimiques plutôt que les pesticides pour préserver la capacité germinative des semences : cendres, argile finement broyée, feuilles de *neem* (*Azadirachta indica*), poudre fine de feuilles de tabac ou d'eucalyptus, écorces d'agrumes et même parfois du sable ou de la latérite peuvent être mélangés en forte proportion aux réserves pour la semence. Les spécialités de terre de diatomées (par exemple : kieselguhr, Protect-it, Dryacide®) sont utilisables en application de couverture des tas de grains et graines (*top dressing*) pour éviter toute ré-infestation venue de l'extérieur.

Dans l'esprit des conférences internationales des Nations Unies sur l'alimentation et l'agriculture recommandant des pratiques agro-nomiques durables et un nouveau modèle de protection des cultures fondés sur les progrès des connaissances en écologie, les principes d'intervention phytosanitaire ont été radicalement transformés au cours de la fin du siècle dernier, notamment sous l'impulsion de l'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO), du Conseil national de la Recherche des États-Unis (USNRC) et de l'Organisation internationale de Lutte biologique (OILB).

Dans le domaine de la protection intégrée des grains stockés contre les insectes, les méthodes physiques qui peuvent y entrer sont nombreuses :

- l'incorporation de poudres minérales (cendres de bois, terre de diatomées, argile en poudre fine, balle de riz moulue, sable, etc.) pour prévenir la multiplication rapide des insectes de stockage ;
- la solarisation des graines à la récolte pour assurer la désinsectisation thermique ;
- la conservation en récipients étanches et dans un endroit frais (greniers en terre, bidons métalliques ou en plastique à fermeture étanche, greniers enterrés) pour limiter la vitesse de reproduction.



L'utilisation des ressources végétales locales peut constituer une solution alternative aux pesticides de protection des graines en post-récolte comme certains produits végétaux ou les « insecticides botaniques » (neem, extraits de piment, de cumin ou de basilic, ou écorces et extraits d'écorce d'agrumes, ail, clou de girofle, feuilles de tabac réduites en poudre). L'association raisonnée de ces différentes méthodes constitue le socle de la protection intégrée dans les nouveaux itinéraires techniques de l'agriculture durable à promouvoir sur le terrain.

8. La lutte contre les rongeurs

Les rongeurs sont des ravageurs importants des cultures et des stocks. Quelles que soient la température et l'humidité des grains, ils peuvent provoquer des pertes considérables au cours du stockage, non seulement en consommant les produits, mais aussi en les souillant de leurs déjections et en endommageant les structures de stockage et les emballages (sacs...). Sur un plan sanitaire il est également important de les combattre car ils sont souvent vecteurs de maladies. Pour lutter contre les rongeurs, il est important de bien connaître leur biologie car il est plus efficace et moins onéreux de prévenir les dégradations que de les combattre.

Principaux rongeurs déprédateurs des stocks

Il existe de très nombreuses espèces de rongeurs dont certaines dites commensales ou synanthropes vivent aux dépens des hommes. C'est le cas notamment des souris et des rats de la famille des Muridés et dont les espèces les plus invasives et les plus courantes sont la souris *Mus musculus*, le rat noir *Rattus rattus* et le rat d'égout *Rattus norvegicus* (figure 8.1).

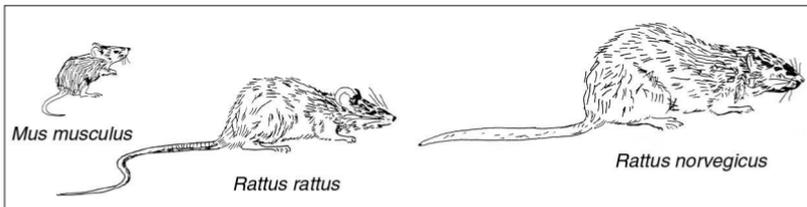


Figure 8.1.

Souris, rat noir et rat d'égout (d'après Cruz *et al.*, 1989).

Il existe également des espèces ayant une grande importance régionale. Les rats à mamelles multiples (*Mastomys*) sont des petits rongeurs brun fauve présents depuis l'Afrique du Sud jusqu'en Afrique subsaharienne qui peuvent occasionner des dégâts importants lorsque se produisent des pullulations en raison de la fécondité élevée de ces rongeurs. Le rat roussard, *Arvicanthis niloticus*, est un rat de taille moyenne de couleur fauve gris surtout présent dans les zones humides et les villages de la

vallée du Nil et au Sahel. En Amérique du Sud, on rencontre *Calomys laucha* et *Akodon azarae* qui sont surtout des souris champêtres. En Asie, le rat bandicot *Bandicota bengalensis* est un gros rat nocturne au pelage sombre qui sévit du Pakistan à l'Indonésie. Ce rat occasionne des dégâts en consommant les denrées entreposées mais également, par son caractère fouisseur, en dégradant les structures de stockage. En Asie du Sud-Est, et dans les îles du Pacifique, le rat polynésien, *Rattus exulans*, est un petit rat long et fin au pelage gris-brun qui est considéré comme un important nuisible.

La principale caractéristique de tous les rongeurs est d'avoir des incisives tranchantes à la croissance continue qu'ils doivent user constamment en rongant toutes sortes de matériaux.

La souris

La souris grise domestique, *Mus musculus*, est un animal de petite taille (de 7 à 10 cm et de 15 à 30 g) très connue des hommes car elle vit surtout dans les zones habitées. Considérée comme le mammifère le plus répandu dans le monde, elle est le commensal le plus fidèle de l'homme. Elle est omnivore et se nourrit des aliments de l'homme, dont les grains, mais elle peut aussi attaquer divers produits comme le papier, le tissu, le plâtre, le savon... Elle vit en groupe mais ses mœurs très vagabondes, la rendent difficile à combattre.

Le rat noir

Le rat noir, *Rattus rattus*, est également appelé rat des bateaux ou rat des toits. C'est un animal originaire du sud-est de l'Inde, cosmopolite comme la souris, qui a progressivement envahi tout le globe grâce, en partie, aux trafics commerciaux. Il était courant de considérer que toute denrée débarquée dans un port apportait avec elle sa cargaison de rats.

Le rat noir mesure de 15 à 20 cm et pèse environ 90 à 150 g. Le corps est fin, le museau pointu, les oreilles grandes et minces, la queue plus longue que le corps et la tête. Le rat noir est un rat « acrobate » qui niche dans les parties élevées des habitations, des greniers ou des magasins.

Le rat noir est très présent dans les régions chaudes et notamment en Afrique et moins fréquent dans les régions froides ou tempérées d'Europe où il a été supplanté par le rat d'égout dès la fin du Moyen Âge.

Le rat d'égout

Également appelé surmulot, ce gros rat, *Rattus norvegicus*, originaire d'Asie, est présent aujourd'hui sous toutes les latitudes grâce à sa grande



faculté d'adaptation. Le rat d'égout, plus gros que le rat noir, mesure de 20 à 25 cm et pèse en moyenne 350 g. Le corps est trapu, le museau court, les oreilles petites, la queue est plus courte que la tête et le corps.

Ce «rat des villes» vit en colonies dans des endroits qu'il préfère humides comme les bords des rivières ou des ruisseaux, les caves ou les égouts. Plutôt craintif et casanier, il se déplace en suivant toujours les mêmes pistes qui peuvent être reconnues aux dépôts graisseux qu'il laisse par frottement sur les herbes, le sol, les murs, etc.

Quelques caractéristiques des principaux rongeurs des stocks sont rappelées dans le tableau 8.1.

Tableau 8.1. Caractéristiques des principaux rongeurs des stocks.

Caractéristique	Souris <i>Mus musculus</i>	Rat noir <i>Rattus rattus</i>	Rat d'égout ou surmulot <i>Rattus norvegicus</i>
Poids (g)	15 à 30	90 à 150	300 à 400
Longueur (cm) (sans la queue)	7 à 11	15 à 20	20 à 25
Queue	Égale la tête et le corps	Plus longue que la tête et le corps	Plus courte que la tête et le corps
Oreilles	Grandes avec quelques poils	Minces, grandes, translucides, sans poils	Épaisses, courtes, opaques, à poils fins
Museau	Pointu	Pointu	Court
Couleur	Variable, gris brunâtre	Noir, gris, brun ou roux, parfois avec ventre blanc	Gris, brun, parfois noir avec ventre gris
Mœurs	Fait parfois des terriers, bonne grimpeuse, ne réagit pas beaucoup devant les objets nouveaux. Habitudes assez vagabondes.	Fait des terriers, grimpeur agile, réagit à des objets nouveaux, apprécie les endroits secs. Habitudes assez vagabondes.	Fait des terriers, bon nageur, manifeste une réaction devant les objets nouveaux, vit beaucoup dans les égouts. Habitudes peu vagabondes.
Localisation	Dans les villes et les campagnes	Partout dans le monde, sauf dans les villes et zones les plus froides	Surtout dans les ports, les gros bourgs et les villes

Dégâts causés par les rongeurs

Les rongeurs occasionnent des dégâts sur les récoltes sur pied et dans les stocks de grains. Les céréales stockées en épis en sacs ou en vrac constituent des réserves importantes de nourriture sur un espace réduit et représentent un milieu favorable à leur développement. La présence d'une nourriture abondante et facile d'accès reste un des premiers facteurs qui conditionnent l'installation d'une colonie de rongeurs.

Une estimation des quantités de nourriture consommées quotidiennement et annuellement par différents types de rongeurs est donnée dans le tableau 8.2. (Brooks et Fiedler, 1999).

Tableau 8.2. Quantité d'aliments consommés quotidiennement et annuellement par quelques rongeurs.

Rongeur	Consommation journalière (g)	Consommation annuelle (kg)
<i>Rattus norvegicus</i>	15 - 25	6 - 9
<i>Bandicota bengalensis</i>	15 - 25	6 - 9
<i>Rattus rattus</i>	8 - 12	3 - 4
<i>Rattus exulans</i>	5 - 8	2 - 3
<i>Arvicanthis niloticus</i>	5 - 8	2 - 3
<i>Mastomys natalensis</i>	5 - 8	2 - 3
<i>Calomys laucha</i>	3 - 5	1 - 2
<i>Akodon azarae</i>	3 - 5	1 - 2
<i>Mus musculus</i>	2 - 3	0,7 - 1

Même si l'on considère que les pertes dues aux rongeurs sont conséquentes, l'estimation des dégâts est toujours très difficile. C'est surtout au niveau des stocks villageois que les pertes seraient sensibles et visibles. Il est souvent admis qu'un rongeur consomme jusqu'à 10 % de son poids par jour. Si l'on considère par exemple qu'un grenier paysan de 1 tonne de grains est l'objet d'attaques d'une vingtaine de rats aux mamelles multiples (*Mastomys*), la part annuellement consommée par les rongeurs peut être estimée à 60 kg soit une perte de 6 %. Mais les pertes occasionnées peuvent être cinq fois supérieures aux stricts besoins alimentaires des rongeurs (Poché *et al.*, 1981). En effet, ils déprécient fortement les denrées par les souillures qu'ils y déposent (urines, fèces, dépôts gras...). Des premières estimations de pertes dues aux rongeurs dans les stocks familiaux ou villageois ont été publiées en 1976 (Hopf *et al.*, 1976). Elles sont répertoriées dans le tableau 8.3.



Tableau 8.3. Pertes dues aux rongeurs dans les stocks familiaux ou villageois (Hopf *et al.*, 1976).

Continent	Pays	Type de stockage	Produits	Dommmages (%)
Asie	Bangladesh	Greniers en bambou	Riz, blé	5
	Inde	Stockage villageois	Riz, blé	1,7
		Village, sacs	Riz, blé, mil, sorgho	3,5 - 5
		Greniers en terre ou en bambou	Riz, blé, légumineuses, sorgho	1,7
	Corée	Sacs	Riz, orge	20
	Laos	Cribs, greniers en terre ou en bambou	Riz	3
	Malaisie	Greniers en plafond	Riz,	2 - 5
	Népal	Sacs	Maïs	3 - 5
	Philippines	Cribs, sacs	Riz, maïs	2 - 3
	Thaïlande	Sacs en plafond, maïs en cribs	Maïs, riz	5
	Turquie	Fosses à grains	Blé, riz, maïs	5
Afrique	Égypte	Maisons et magasins	Maïs, blé, riz, graines de coton	50
	Éthiopie	Greniers surélevés, fosses, sacs	Grains	5 - 15
	Ghana		Grains, maïs, riz	2 - 3
	Malawi	Cellules en fibres tissées, paniers	Maïs, arachide, sorgho, mil	0,5 - 1,5
		Cribs	Maïs en épis	15
	Sierra Leone	Paniers tressés	Riz	1 - 10
		Sacs	Riz	10 - 100
		Greniers et cribs	Riz, maïs	2 - 3
	RDC (ex Zaïre)	Sacs en plafond	Riz, maïs	3
	Zambie	Cribs	Maïs en épis, sorgho, mil	10
Amérique	Mexique	Cribs, sacs en plafond	Riz, maïs	5 - 10
	Brésil	Sacs, cribs	Riz, maïs, haricots	4 - 8

Dans la plupart des cas, les pertes dues aux rongeurs semblent varier de 0,5 à 10 % avec des valeurs fréquentes de 3 à 5 %. Des études réalisées en Inde en 1976 ont montré qu'après six mois de stockage les pertes en poids de paddy stocké dans des greniers villageois en pailles tressées étaient de 6,2 %, dont une part de 3,1 % due aux rongeurs et 2,3 % aux insectes avec cette même proportion pour du paddy stocké en sacs.

Dans les grands centres de stockage, les pertes sont souvent moins importantes mais les magasins de stockage en sacs restent beaucoup plus vulnérables à l'attaque des rongeurs que les silos de stockage en vrac. Si l'on considère par exemple qu'un magasin de 1000 tonnes de grains est l'objet d'attaques d'une colonie de surmulots d'une centaine d'individus, la part annuellement consommée par les rongeurs peut être estimée à 1 tonne de grains (10 kg par individu au maximum) soit une perte de 0,1 %. Cette perte pondérale peut paraître faible mais les dégâts engendrés sont souvent plus importants. Des sacs rongés peuvent faciliter l'écoulement des grains et entraîner l'écroulement des piles de sacs dans le magasin et d'éventuelles destructions de la structure (murs éventrés...). Dans les centres de stockage en vrac, les rongeurs peuvent occasionner des dégâts matériels importants en s'attaquant aux circuits d'eau et surtout aux circuits électriques des installations. Certains considèrent que 25 % des incendies d'origine inconnue sont dus à des courts-circuits provoqués par les rongeurs (Grolleau et Gramet, 1982).

Enfin, il est connu que les rongeurs sont vecteurs ou réservoirs, par leurs parasites (puces, vers...), de maladies dangereuses pour l'homme et les animaux domestiques comme la peste, les fièvres hémorragiques (Lassa...), la leptospirose, les leishmanioses... La présence de rongeurs dans les habitations et les structures de stockage est donc à prendre très au sérieux en raison des dangers potentiels qu'ils génèrent pour la santé humaine et celle des animaux domestiques (Grolleau et Gautun, 1990).

Lutte contre les rongeurs

▮ La lutte préventive

La lutte contre les rongeurs doit d'abord être préventive avant d'être active et curative. Elle consiste essentiellement à créer un milieu défavorable à l'installation ou à l'attaque des rongeurs en prenant en compte certaines caractéristiques de leur biologie et de leur comportement.



Rappel de quelques aptitudes physiques des rongeurs

Certains rongeurs comme le rat noir, le rat polynésien et la souris sont d'excellents grimpeurs. Ils escaladent avec facilité les surfaces relativement rugueuses mais ont du mal à progresser verticalement sur les surfaces lisses. Ils ne peuvent pas franchir une plaque métallique lisse de 30 cm de longueur d'où l'intérêt des cônes ou des bandes métalliques de protection. Les rongeurs sont également de bons sauteurs mais pas à plus de 75 cm en hauteur et 1,5 m en longueur. Les rongeurs creusent des galeries dans le sol mais généralement à une profondeur qui ne dépasse pas 40 cm même si certains comme le rat bandicot peuvent creuser leur terrier jusqu'à 1 m. Les rongeurs sont capables d'atteindre les stocks en passant par de très petites ouvertures mais la plupart ne peut pas traverser un maillage métallique de 1 cm. Avec leur besoin incessant de ronger, ils peuvent s'attaquer aux canalisations en plomb, en étain ou en plastique et même ronger le béton.

Mesures de protection au niveau des structures de stockage

Les structures de stockage doivent être conçues et construites avec des protections infranchissables par les rongeurs. Les greniers villageois construits sur pilotis ou les cribs peuvent être efficacement protégés de l'attaque des rongeurs par des cônes métalliques ou des cylindres de tôle de 40 cm de longueur (figure 3.7). Il reste néanmoins indispensable que la base du grenier ou du crib soit située à plus de 75 cm du sol pour éviter que les rongeurs n'y accèdent en sautant. Il est également nécessaire que l'espace autour des greniers soit totalement dégagé en coupant les branches qui les touchent ou les surplombent.

Au niveau des centres de stockage, les principaux points d'entrée des rongeurs dans les magasins sont les portes, les ouvertures d'aération ou tout orifice de ventilation, la toiture, les espaces entre les murs et le toit... Ils peuvent aussi accéder aux bâtiments en empruntant les canalisations d'évacuation des eaux de pluie ou les câbles d'alimentation électrique. Tous ces points d'entrée potentielle doivent être correctement protégés.

Les portes à battants assurent une bonne fermeture et offrent en général une très bonne protection contre les rongeurs lorsqu'elles sont bien ajustées. Si elles sont construites en bois, elles doivent alors être recouvertes en partie inférieure d'un feuillard métallique pour éviter qu'elles ne soient rongées (figure 8.2).

Les portes coulissantes sont plus facilement franchissables par les rongeurs. Une protection simple consiste alors à placer des petites

plaques métalliques de 1 m de hauteur sur les montants de la porte et sur la porte elle-même de manière à ce qu'ils viennent en contact lors de la fermeture (figures 8.3 et 8.4) (Cruz *et al.*, 1989).

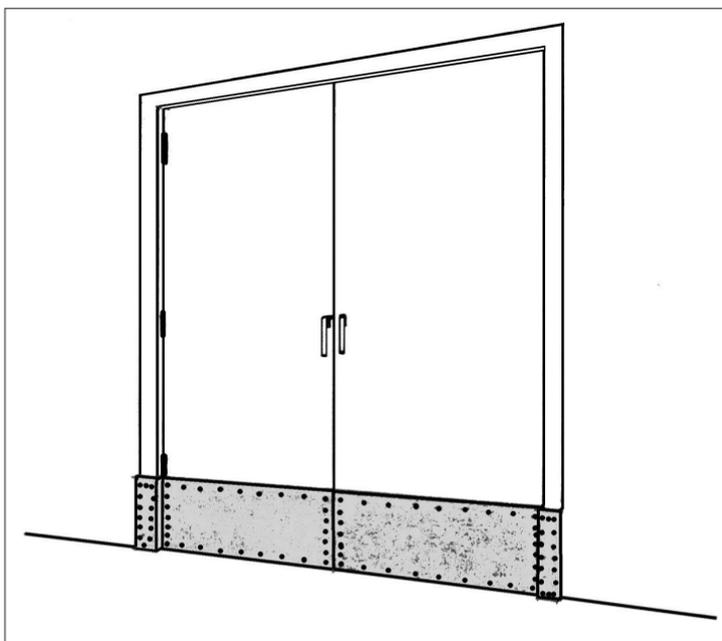


Figure 8.2.
Porte protégée des rongeurs par un feuillard métallique.

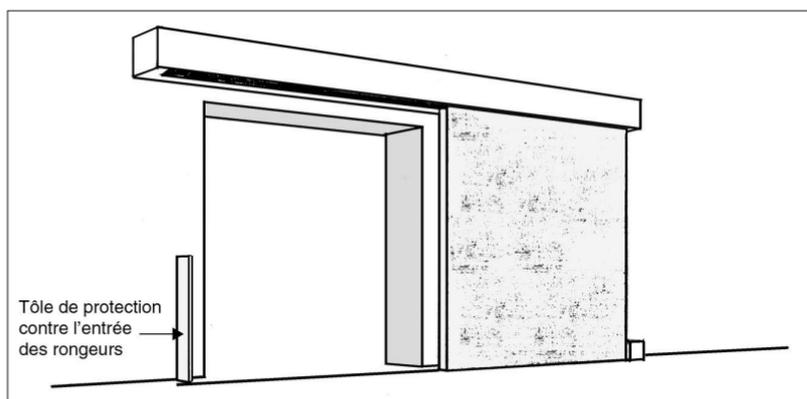


Figure 8.3.
Porte coulissante équipée d'une protection anti-rongeurs.

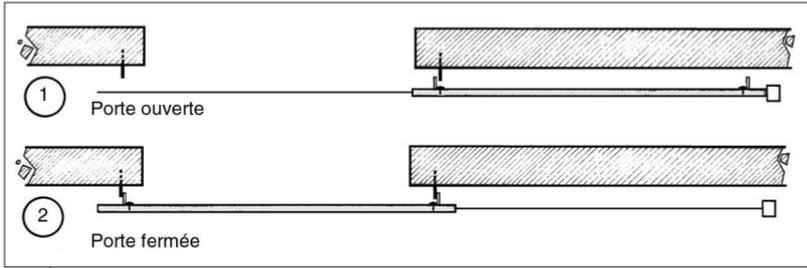


Figure 8.4.
Schéma illustrant la fermeture de la porte coulissante
avec barrière anti-rongeurs.

Les fenêtres ou ouvertures d'aération des magasins de stockage doivent être protégées par des grilles ou des grillages dont la maille est inférieure à 10 mm (figure 5.4).

Les câbles électriques doivent être protégés par des manchons ou des disques métalliques et les descentes d'eau de pluie doivent être équipées d'un panier métallique ou d'une collerette qui empêche la progression des rongeurs (figure 8.5).

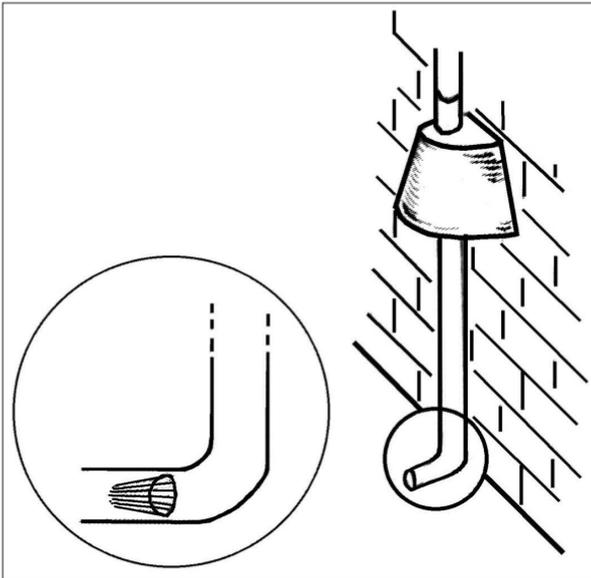


Figure 8.5.
Protection des descentes d'eau de pluie
(d'après Cruz *et al.*, 1988).

La toiture doit être régulièrement inspectée et les espaces entre le haut des murs et la toiture doivent toujours être parfaitement obturés avec du béton comme cela est illustré en figure 8.6.

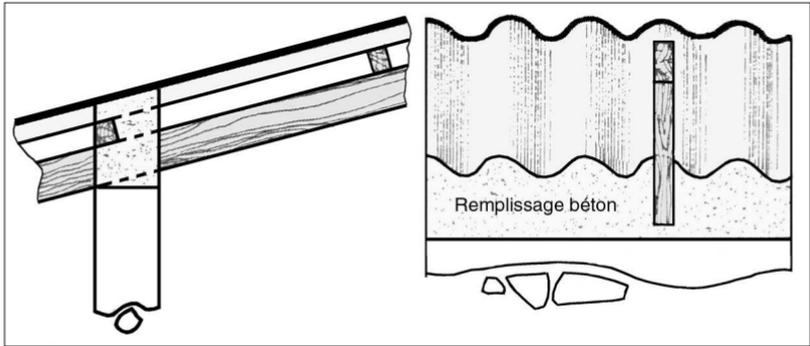


Figure 8.6.

Jointoiement en béton entre le haut des murs et la toiture
(d'après Cruz *et al.*, 1989).

Mesures de protection par l'hygiène des locaux de stockage et des abords

On constate fréquemment que les rats affectionnent les tas de détritux ou d'ordures où ils trouvent à la fois le gîte et le couvert. D'un naturel craintif et détestant les espaces vides, les rats cherchent à se cacher des prédateurs potentiels en se réfugiant derrière tous les types d'amoncellement qui peuvent avoir été négligemment constitués à proximité des locaux de stockage. Les tas de ferraille ou de bidons, les tas de bois, les vieux pneus, les broussailles sont autant de caches au travers desquelles les rats créent des pistes pour s'approcher au plus près des stocks.

Dans la lutte préventive contre les rongeurs, il est donc primordial d'évacuer tous les objets qui pourraient avoir été déposés ou abandonnés à l'intérieur même des magasins et de supprimer tous les dépotoirs qui pourraient exister à proximité des greniers ou des centres de stockage. Les abords des installations doivent être parfaitement dégagés et régulièrement entretenus en coupant les herbes et les broussailles et en évacuant tous les dépôts de manière à obtenir une large bande de terrain parfaitement nette et propre tout autour des bâtiments ou des greniers. Les arbres à proximité des greniers doivent être abattus ou équipés d'un manchon métallique sur le tronc. De façon générale on doit supprimer ou contrôler tous les « ponts » qui peuvent permettre aux rongeurs d'atteindre les denrées stockées.



Ces différentes mesures de protection, souvent peu onéreuses et d'une mise en œuvre aisée, doivent être strictement observées dans la lutte contre les rongeurs.

▮ La lutte active et curative

En complément à la lutte préventive, il peut être nécessaire de procéder à une lutte active et curative pour éviter toute prolifération de rongeurs dans les stocks de grains. La lutte active comprend la lutte biologique, la lutte physique et la lutte chimique, qui sont parfois utilisées simultanément.

La lutte biologique

La lutte biologique consiste principalement à protéger certaines espèces prédatrices et les ennemis naturels des rongeurs comme les rapaces nocturnes, certains reptiles, et les petits mammifères carnassiers sauvages (renards, chacals) ou domestiques comme le chat. La protection des populations naturelles de prédateurs ou l'usage de moyens destinés à en développer les effectifs dans le milieu naturel, sont des mesures à encourager car elles sont susceptibles d'accroître le temps séparant deux explosions démographiques consécutives de rongeurs. Ces mesures devraient être particulièrement bénéfiques dans des régions où les prédateurs naturels se sont raréfiés sous la pression de diverses activités humaines (Pascal, 1993). La lutte biologique ne peut que maintenir les populations de rongeurs à un niveau bas avec des taux de dégâts économiquement acceptables, mais elle ne peut en aucun cas enrayer une pullulation.

La lutte microbiologique qui consistait à transmettre aux rongeurs des maladies mortelles avec des souches pathogènes s'est avérée techniquement difficile à mettre en œuvre. Déontologiquement impraticable en raison des risques qu'elle faisait courir aux autres familles de mammifères et donc aux expérimentateurs, elle a rapidement été abandonnée.

La lutte physique

La lutte physique comprend principalement le piégeage et l'utilisation d'ultrasons. Le piégeage est une technique très ancienne qui n'est plus guère utilisée car ses effets sont limités à la capture de quelques individus seulement. Les pièges utilisés sont des tapettes, des pièges électriques ou électroniques, des pièges à glu, des nasses, des trappes à guillotine... Le piégeage présente l'intérêt de pouvoir identifier correctement l'espèce de rongeurs qui s'attaque aux stocks.

Les rats comme beaucoup de petits animaux ont une faible acuité auditive de localisation des sources de sons mais peuvent entendre les ultrasons. Les rats sont eux-mêmes capables de produire des sons à haute fréquence de 20 à 50 kHz. Certains ont donc pensé que l'émission d'ultrasons pourrait avoir une action répulsive sur les rongeurs et être un moyen efficace pour éloigner les rats. Les résultats de certaines études semblent montrer l'inefficacité de cette technique. Les ultrasons sont de courte portée et sont atténués par les objets, les piles de sacs, les parois... Les rongeurs peuvent être éloignés quelques temps mais ils s'habituent aux ultrasons émis et reviennent rapidement prendre possession des lieux (Timm, 1994).

La lutte chimique

Pour une lutte curative, c'est la lutte chimique qui est actuellement considérée par beaucoup comme la plus efficace. Les produits chimiques utilisés sont qualifiés de raticides ou rodenticides. Ces produits ont longtemps été classés en deux groupes distincts : les poisons violents et les anticoagulants.

La liste des poisons était assez variée et comprenait l'anhydride arsénieux (mort aux rats), le phosphure de zinc, les sels de thallium, la strychnine, l'Antu (1-naphtalényl-thiourée), la scille rouge (glycoside extrait de la plante *Urginea maritima*, à effet émétique)... Ces poisons aigus avaient pour principal défaut de provoquer la mort violente et immédiate de quelques individus, suscitant alors la méfiance de toute la colonie de rongeurs à l'égard des appâts. La dangerosité de tels poisons envers les êtres humains et les animaux domestiques a conduit à leur interdiction dans de nombreux pays. Le phosphure de zinc est un poison cellulaire encore utilisé dans certains pays de même que la scille rouge qui est un cardiotoxique qui agit avec un certain retard. Enfin l'alphachloralose est un neurotoxique parfois encore utilisé comme raticide.

Aujourd'hui les principaux rodenticides utilisés sont les anticoagulants ou antivitaminés K qui agissent sur le système sanguin en empêchant le sang de coaguler lors de saignements. L'absorption d'anticoagulants provoque la mort lente des rongeurs par des hémorragies internes spontanées. Comme l'intoxication est mortelle plusieurs jours après l'ingestion des toxiques, elle n'éveille pas la méfiance des autres congénères (Buckle et Smith, 1994).

Les premiers anticoagulants utilisés à partir de la moitié du xx^e siècle ont été le coumafène, le coumatétralyl et la chlorophacinone. Des phénomènes de résistance à ces anticoagulants de première génération



ont conduit à l'utilisation de nouveaux produits comme la bromadiolone ou le difénacoum mais de nouveaux phénomènes de résistance seraient également apparus avec ces produits (Quéré et Le Louarn, 2011). De nos jours on conseille souvent l'utilisation d'anticoagulants de dernière génération comme le brodifacoum, la diféthialone ou le flocoumafène qui sont toxiques en peu d'ingestions. Mais leur usage est parfois restreint à l'intérieur des bâtiments pour éviter le transfert vers la faune non cible (Jacquot, 2013).

Dans de nombreux pays, l'emploi des anticoagulants est de plus en plus critiqué et limité en raison des risques qu'ils font courir aux animaux domestiques (chats, chiens..) ou sauvages comme les renards, les sangliers et les rapaces nécrophages (vautours, milans...).

L'appâtage

Les rodenticides sont proposés à la consommation des rongeurs sous la forme d'appâts qui doivent être attractifs pour les rongeurs. Ils sont souvent mélangés à des grains auxquels on peut ajouter différentes substances comme du sel, du sucre ou de l'huile pour en améliorer l'appétence. Les opérateurs peuvent aussi utiliser des appâts prêts à l'emploi sous la forme de plaquettes hydrofuges notamment pour lutter contre le surmulot qui affectionne les endroits humides.

Les appâts empoisonnés doivent être placés dans des postes d'appâtage placés sur le parcours des rongeurs entre leur gîte et les denrées entreposées. Ces postes qui ne doivent pas être accessibles aux animaux domestiques sont souvent constitués d'abris simples comme illustrés en figure 8.7.

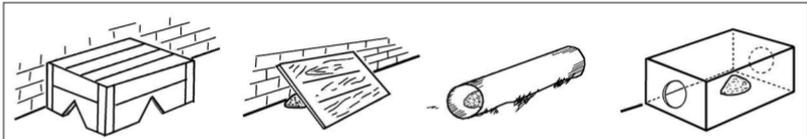


Figure 8.7.
Exemples de postes d'appâtage.

Le traitement consiste à placer 100 g d'appâts en permanence dans des postes d'appâtage dont le nombre et la disposition dépendent du type de structure de stockage des grains et de l'importance de l'infestation supposée. Puis tous les postes doivent être contrôlés tous les jours et réapprovisionnés au besoin. Si l'appât a été consommé en partie, il est nécessaire de remplacer la partie consommée. Si l'appât a été



totallement consommé, il est alors conseillé de doubler son volume. Ce contrôle a lieu pendant une dizaine de jours et peut être stoppé dès que les appâts ne sont plus consommés pour reprendre aux premiers signes de présence de rongeurs.

Une autre technique dite d'appâtage cyclique est parfois préconisée pour permettre de réaliser des économies d'appâts. Elle consiste à réaliser un premier appâtage de un à trois jours, selon la toxicité du rodenticide utilisé, pour éliminer les individus dominants qui se nourrissent en premier. Puis on interrompt pendant une semaine avant d'initier un deuxième cycle pour détruire une nouvelle série d'individus et ainsi de suite jusqu'à l'extinction de la colonie de rongeurs (Posamentier, 1994).

Les rodenticides restent des produits dangereux qu'il faut manipuler avec précaution en utilisant des gants et des récipients spécifiques portant la mention « Danger : poison ». Les emballages doivent être détruits après utilisation. En agriculture biologique, l'utilisation de produits rodenticides chimiques est tolérée uniquement dans les locaux avec obligation d'utiliser des boîtiers évitant toute dispersion accidentelle (Arvalis, 2003).



Conclusion

Dans cet ouvrage nous avons voulu rappeler les importantes altérations que peuvent subir les grains après la récolte et dresser un panorama des principales techniques ou des principaux procédés qui peuvent être mis en œuvre pour améliorer leur conservation et réduire les pertes. En conclusion et en hommage à François Sigaut, agronome, ethnologue et technologue disparu en 2012, nous présentons un de ses textes intitulé «écologie et technologie», qui concluait un aide-mémoire sur les techniques de conservation à long terme des grains. Ce texte publié à la Maison des Sciences de l'Homme en 1977 reste d'actualité.

«Un contraste saute aux yeux : celui qui oppose l'extrême complexité des phénomènes naturels, et la relative pauvreté des moyens d'intervention pour les contrôler. Même en enrichissant les techniques «modernes» de tout l'arsenal des techniques «traditionnelles», leur nombre total n'est pas très grand. Il suit que les choix techniques reposent sur des bases beaucoup plus simples que les connaissances, scientifiques ou non, que l'on peut posséder sur l'écologie des grains stockés. Historiquement d'ailleurs, la technique a précédé la science dans tous les domaines jusqu'à l'électricité. Le problème est de dégager ces bases, c'est-à-dire les termes réels des alternatives qui se sont posées et se posent dans les diverses sociétés. Les faits écologiques, ou plutôt la perception que les intéressés en ont, ont sans doute pesé assez peu jusqu'ici dans ces alternatives. La connaissance des procédés techniques eux-mêmes est probablement un facteur plus déterminant : en l'absence de critères scientifiques très tranchés, on préférera toujours un procédé bien connu, même médiocre, à un procédé virtuellement excellent, mais mal connu. La diffusion des innovations techniques s'est toujours heurtée à cette attitude, au demeurant tout-à-fait rationnelle.

«Le développement d'une technologie "fondamentale" est probablement le seul moyen de parvenir un jour à lever cet obstacle. Par technologie "fondamentale", il faut entendre une discipline qui se donnerait pour tâche d'inventorier les faits techniques, de retrouver les conditions de leur genèse et de leur diffusion (ou de leur non-diffusion), de mettre en évidence leurs liens avec l'environnement écologique, économique et culturel. Une technologie fondamentale ne peut pas se permettre des jugements de valeur tels que ceux par lesquels on qualifie couramment certaines techniques de «périmées», d'«archaïques», de «routinières», etc. En restreignant nos connaissances, de tels jugements

restreignent aussi nos choix, et c'est pourquoi ils sont, non seulement antiscientifiques, mais dangereux pour l'avenir.

«Il y a des domaines, et celui de la conservation des grains en est un, où tous les procédés possibles et imaginables peuvent être la source d'idées utiles, tant les conditions d'application sont variées dans le monde. Le fait que ces idées ne sont pas, et pour la plupart ne peuvent pas, être déduites directement de la recherche scientifique, rend d'autant plus nécessaire de n'en pas laisser perdre.

«On sait l'importance primordiale qu'a eu le stockage à long terme des grains dans de nombreuses sociétés. Depuis les années 1870, l'abondance des blés américains et autres a pratiquement occulté ce problème. Peut-être assistons-nous actuellement au début de son retour au premier plan. Son importance n'est pas seulement économique, car les choix faits en matière de stockage peuvent mettre en cause toute la politique de la production dans certains pays. « Reste à savoir si la culture idéale est celle qui tire plein avantage des meilleures saisons avec stockage des excédents pour compenser les mauvaises, ou si le producteur doit viser à la stabilité des rendements. La réponse à cette question peut varier de pays à pays, en fonction des facilités de stockage des excédents. » (Harper, 1976). Depuis plus de deux siècles, l'Europe occidentale a choisi la seconde politique. Elle lui a prodigieusement réussi. Ce n'est pas une raison pour que tous les pays adoptent la même, et notamment les pays méditerranéens, où la politique traditionnelle était celle de Joseph¹, la première. La sécurité du stockage à long terme est un élément décisif de ce choix, dont dépend peut-être toute l'orientation de la production dans ces pays (variétés, techniques culturales, etc.). »

1. Joseph, fils de Jacob, suggéra au roi d'Égypte la mise en réserve du cinquième des récoltes de blé pendant sept années prospères, afin que la famine ne décime pas le pays pendant les sept années de disette qui devaient suivre.



Sigles et acronymes

Arvalis - Institut du végétal : Organisme de recherche appliquée agricole créé en 2002 par la fusion de l'Institut technique des Céréales et Fourrages (ITCF) et de l'Association générale des producteurs de maïs (AGPM).

BCMEA : Bureau de coordination du Machinisme et de l'Équipement agricole.

Ceemat : Centre d'études et d'expérimentation du machinisme agricole tropical, Montpellier, France (ancien département du Cirad spécialisé en mécanisation des cultures tropicales).

Cirad : Centre international de coopération agronomique pour le développement, France.

CRDI : Centre de Recherches pour le Développement international, Canada.

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italie.

FDA : Food and Drug Administration. Agence américaine des produits alimentaires et des médicaments.

Gasga : Group for Assistance on Systems relating to Grain After-harvest. Groupe d'assistance aux systèmes concernant les grains après récolte.

Irat : Institut de recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (ancien département du Cirad spécialisé en agronomie tropicale), France.

IRD : Institut de recherche pour le développement (ex-Orstom), France.

JFSC : Japanese Food Safety Commission. Agence japonaise de sécurité des aliments, Japon.

OILB : Organisation internationale de Lutte biologique (<http://www.iobc-global.org/index.html>)

OMS : Organisation mondiale de la Santé, Suisse.

PFL : *Prevention of Food Losses* (en français PPA : Prévention de Pertes alimentaires), programme d'action de la FAO de 1977 à 1996.

UNEP : United Nations Environment Programme. Programme des Nations Unies pour l'Environnement, Kenya.



USAID : United States Agency for International Development, Washington D.C, États-Unis.

USNRC : United States National Research Council, Conseil national de la recherche des États-Unis.



Bibliographie consultée

- Adams J.M., Schulten G.G.M., 1978. Losses caused by insects, mites and microorganisms. In Harris K.L. et Lindblad C.J. (éds), *Post-harvest Grain Loss Assessment Methods*, American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, États-Unis, p. 83-85.
- Afomasse D., 1994. Amélioration du stockage du maïs dans la zone à forte hygrométrie du Sud-Bénin. Journées techniques de la FAO sur l'expérience africaine en amélioration des techniques après récolte, 4-8 juillet 1994, Accra, Ghana.
- Anonyme, 1995. *Contrôle de la qualité des céréales et protéagineux*. Guide pratique. Publication ITCF/ONIC, Paris, France, 254 p.
- Appert J., 1985. *Le stockage des produits vivriers et semenciers*. Le technicien d'agriculture tropicale. 2 volumes. ACCT, CTA, Ed. Maisonneuve et Larose, Paris. 225 p.
- Arvalis, 2003. *Séchage des grains en organisme stockeur*. Arvalis-Institut du Végétal, Paris, France. 133 p.
- Ashburner J.E., 1998. *Synthesis of experience gained in prevention of food losses : twenty years of experience of FAO's special action programme for the prevention of food losses*. FAO, Rome, Italie, 68 p.
- Bartali E.H., 1987. Underground Storage Pits in Morocco. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2: 381-383.
- Berhaut P., Le Bras A., Niquet G., Criaud J.P., 2003. *Stockage et conservation des grains à la ferme*. Arvalis-Institut du Végétal. Paris, France, 108 p.
- Bodholt O., Diop A., 1987. Construction and operation of small solid-wall bins. *FAO Agricultural Services Bulletin*, n° 69, 68 p.
- Brooks J.E., Fiedler L.A. 1999. Vertebrate pests. *Postharvest Operations. within Information Network on Post-harvest Operations*. Mejia D. (éd), FAO Rome, Italie. 26 p.
- Buckle A.P, Smith R., 1994. Rodent control methods: chemical. In Buckle A.P. et Smith R.H. (eds), *Rodent pests and their control*. CAB International, Bristol, Royaume-Uni, p. 127-160.
- Cangardel H., 1978. Facteurs favorables au développement des insectes et des acariens. In Scotti G., *Les insectes et les acariens des céréales stockées*. Afnor/ITCF, Paris, France, p. 83-97.
- Ceemat, 1974. *Manuel de conservation des produits agricoles tropicaux*. Secrétariat d'État aux Affaires étrangères, France, Collection Techniques rurales en Afrique, 355 p.
- Champ B.R., Dyte C.E., 1976. Rapport de l'enquête mondiale de la FAO sur les insectes des céréales entreposées et leur sensibilité aux insecticides. FAO, Rome, 374 p.
- Chantereau J., Cruz J.-F., Ratnadass A., Trouche G., Flidél G., 2013. *Le sorgho*. Collection Agricultures tropicales en poche, Éditions Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux, 245 p.
- Cruz J.-F., Allal M., 1986. Le stockage du grain. Série Technologie, Dossier Technique n° 11, *BIT*, 121 p.

- Cruz J.-F., Troude F., Griffon D., Hebert J.-P., 1988. *Conservation des grains en régions chaudes*. 2^e édition, Ministère de la Coopération et du Développement, Paris, France, 545 p.
- Cruz J.-F., Diop A., Corbett G.G., 1989. Agricultural Engineering in Development: Warehouse Technique. *FAO Agricultural Services Bulletin* n° 74, Rome, Italie, 115 p.
- Cruz J.-F., Havard M., 1994. Grain Harvesting, threshing and cleaning. In Proctor D.L. (ed) *Grain storage techniques. Evolution and trends in developing countries*. Group for assistance on systems relating to grain after harvest. *FAO Agricultural Services Bulletin* n° 109 : 67-88.
- Cruz J.-F., Béavogui F., Dramé D., 2011. *Le fonio, une céréale africaine*. Collection Agricultures tropicales en poche, Éditions Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux, 175 p.
- Debouis K., Desnos G., Lavoue J., Le Bras A., Niquet G., 2008. *Ventilation des grains*. Guide pratique. Arvalis-Institut du végétal. Paris, France, 108 p.
- Delobel A., Tran M., 1993. Les coléoptères des denrées alimentaires entreposées dans les régions chaudes. Orstom, CTA publi., *Faune tropicale*, XXXII, Orstom éditions, Paris, 428 p.
- De Luca Y., 1979. Ingrédients naturels de préservation des grains stockés dans les pays en voie de développement. *Journal d'agriculture traditionnelle et de botanique appliquée*, 26^e année, bulletin n°1 : 29-52.
- De Padua D.B., 1979. A critical review of the losses in the rice post-production system in some Southeast Asian countries. In *Interfaces between agriculture, nutrition and food science*. IRRI, Los Banos, Laguna, Philippines, p. 89-104.
- Diop A., Hounhouigan D.J., Kossou K.D., 1997. Conservation et transformation des grains. In *Manuel de référence pour techniciens spécialisés*. Technologie post-récolte et commercialisation des produits vivriers. PADSA, Danida, Ministère du développement rural, Bénin, 110 p.
- FAO, 1994. *Synthèse de l'expérience africaine en amélioration des techniques après-récolte*. Journées Techniques Accra, Ghana, Service du Génie rural AGSE. FAO, Rome, Italie, 148 p.
- FAO, 2005. *Technical Manual for the Construction of Small Metal Silos*. FAO AGST, Rome, Italie, 65 p.
- FAO, 2012. *Pertes et gaspillages alimentaires dans le monde. Ampleur, causes et prévention*. FAO, Rome, Italie, 33 p.
- Fiagan Y.S., 1994. Le système de stockage du maïs en milieu paysan béninois : bilan et perspectives. In *Maïs prospère : production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest*, Séminaire régional. Collection Colloques, Cirad, Montpellier. p. 201-211.
- Fleurat-Lessard F., Leblanc M.-P., 2013. *Quels insectes dans les stocks de blé en France? Quels impacts des pratiques de stockage?* Colloque Raisonner la lutte contre les insectes au stockage, Paris, 17 sept. 2013, p. 15-27.
- Fleurat-Lessard F., 2011. Les stratégies de lutte chimique en pré- et post-récolte en Afrique. In Huignard J., Glitho I.A., Monge J.P. et Regnault-Roger C., *Insectes ravageurs des graines de légumineuses. Biologie des Bruchinae et lutte raisonnée en Afrique*. Éditions Quæ, Versailles, p. 75-90.



- Fleurat-Lessard F., 1996. Écophysiologie des arthropodes nuisibles aux stocks de céréales en Afrique tropicale. In Verstraeten C. (coord.), *Post-récolte, Principes et applications en zone tropicale*. Éditions Estem, Paris, France, p. 1-62.
- Fleurat-Lessard F., 1991. Entomologie des céréales et des dérivés et autre contamination d'origine animale. In Godon B. et Willm C. (coord.) *Les industries de première transformation des céréales*, Lavoisier Tec & Doc, Paris, France, p. 192-220.
- Fleurat-Lessard F., 1982. Les insectes et les acariens. In Multon J.L. (coord.), *Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés*. Lavoisier Tec & Doc, Paris, France, p. 394-436.
- Fliedel G., Ouattara M., Grabulos J., Drame D., Cruz J.-F., 2004. Effet du blanchiment mécanique sur la qualité technologique, culinaire et nutritionnelle du fonio, céréale d'Afrique de l'Ouest. In *Voies alimentaires d'amélioration des situations nutritionnelles en Afrique de l'Ouest : le rôle des technologues alimentaires et des nutritionnistes*, actes du 2^e atelier international, I. D. Brouwer, A. S. Traoré, S. Trèche (éds), 23-28 novembre 2003, Ouagadougou. Presses universitaires de Ouagadougou, Burkina Faso, p. 599-614.
- Griffon M., 2006. *Nourrir la planète. Pour une révolution doublement verte*. Odile Jacob, Paris, France, 456 p.
- Grolleaud M., 2001. *Pertes après récolte. Un concept mal défini ou mal utilisé*. Étude synthétique et didactique sur le phénomène des pertes se produisant tout au long du système après récolte. FAO, Rome, Italie.
- Grolleau G., Gautun J.-C., 1991. Protection des denrées stockées contre les dégâts de vertébrés ravageurs. In Fleurat-Lessard F. et Ducom P. (eds) *The proceedings of the fifth international working conference on stored-product protection*. Vol III. Imprimerie du Médoc, Bordeaux, France, p. 1469-1478.
- Grolleau G., Gramet P., 1982. Les vertébrés déprédateurs des grains et semences stockés. In Multon J.L. (éd.). *Conservation et stockage des grains et graines et dérivés : céréales, oléagineux, protéagineux et aliments pour animaux*. Collection Sciences et Techniques AgroAlimentaires, Tech & Doc Lavoisier, Paris, France. Vol. 1 : 437-455.
- Guilbot A., Lindenberg A.B., 1960. Eau non solvante et eau de sorption de la cellule de levure. *Biochimica et Biophysica Acta*, 39 : 389-397.
- Guillou M., Matheron G., 2011. *9 milliards d'hommes à nourrir. Un défi pour demain*. François Bourin Éditeur. Paris, France, 421 p.
- Hall D.W., 1971. *Handling and storage of foodgrains in tropical and sub-tropical areas*. FAO. Roma, Italie, 369 p.
- Harper J.L., 1976. Exposé de M. le Professeur J.L. Harper. *Cahiers des ingénieurs agronomes*, 310 : 13-14.
- Harris K.L., Lindblad C.J., 1978. *Post-harvest Grain Loss Assessment Methods*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, États-Unis, 193 p.
- Hodges R.J., Buzby J.C., Bennett B., 2011. Postharvest losses and waste in developed and less developed countries : opportunities to improve resource use. *Journal of Agricultural Science*, 149 : 37-45.

- Hodges R.J., Bernard M., Rembold F., 2014. *Postharvest cereal losses in Sub-Saharan Africa, their estimation, assessment and reduction*. African Post-Harvest Losses Information System (APHLIS). Technical report by the Joint Research Centre of the European Commission, Luxembourg, 160 p.
- Hopf H.S., Morley, G.E.J., Humphries J.R.O., 1976. *Rodent damage to growing crops and to farm and village storage in tropical and subtropical regions*. Centre for Overseas Pest Research. Tropical Products Institute, London, Royaume-Uni, 115 p.
- Hubert P., 1970. *Recueil de fiches techniques d'agriculture spéciale*. Tome 1. BDP. Agence de Madagascar. 379 p.
- Huignard J., Glitho I.A., Monge J.P., Regnault-Roger C., 2011. *Insectes ravageurs des graines de légumineuse. Biologie des Bruchinae et lutte raisonnée en Afrique*. Éditions Quæ, Versailles, France, 146 p.
- ITCF, 1986. *Le séchage des grains*. Institut technique des céréales et fourrages. Agence Française pour la maîtrise de l'énergie, Service agriculture, Paris, France, 81 p.
- Jacquot M., 2013. Usage des rodenticides anticoagulants et conséquences en termes d'exposition et d'impact pour les populations de renard roux. Biodiversity and Ecology. Thèse de doctorat Sciences de la Vie et de l'Environnement. Université de Franche-Comté, France, 187 p.
- Kitch L.W., Ntoukam G., 1991. Airtight Storage of cowpea in triple plastic bags. CRSP. *Technical Bulletin* 3. Maroua Research Center. Agronomic Research Institute of Cameroon, 11 p.
- Lasseran J.C., 1982. La ventilation des grains et les équipements par silothermométrie. In Multon J.L. (éd.). *Conservation et stockage des grains et graines et dérivés : céréales, oléagineux, protéagineux et aliments pour animaux*. Collection Sciences et Techniques AgroAlimentaires, Tec & Doc Lavoisier, Paris, France. Volume 2 : 687- 771
- Lepesme P., 1944. *Les coléoptères des denrées alimentaires et des produits industriels entreposés*. Paul Lechevalier édit., Paris, France, 336 p.
- Lepigre A.L., 1951. *Insectes du logis et du magasin*. Insectarium Publication. Jardin d'essai, Alger, Algérie, 341 p.
- Lindblad C., Newman M., Vinita R., 1974. *Manuel de construction pour les silos douves en ciment*. In Séminaire Ouest-africain sur le rôle des volontaires dans le stockage des grains au niveau de la ferme et du village. GTZ, Eschborn, Allemagne, p. 91-135.
- Miche J.C., 1980. Utilisation potentielle du sorgho dans un système industriel intégré de mouture et de pastification. In *Amélioration des systèmes post-récolte en Afrique de l'Ouest*, Agence de Coopération culturelle et technique. Paris, France, p. 171-192.
- Mourier H., d'Aguilar J., 1994. *250 animaux et insectes hôtes cachés de nos maisons*. Delachaux et Niestlé, Lausanne, Suisse, 222 p.
- Multon J.L., 1982. *Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés, volume 1 et 2*, Collection Sciences et Techniques AgroAlimentaires, Tec & Doc Lavoisier, Paris, France. 1155 p.
- Nisard M. 1864. Les agronomes latins, Palladius. De l'agriculture, Livre 1,



- chapitre XXXVI, Didot libraires Institut de France, Paris, p. 523-645.
- Pantenius C.U., 1988. Storage losses in traditional maize granaries in Togo. *Insect Science and its Application* 9: 725-735.
- Parfitt, J., Barthel, M., Macnaughton S., 2010. Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 365: 3065-3081.
- Pascal M., 1993. Perspectives de lutte biologique contre les ravageurs champêtres. *Courrier de l'environnement de l'Inra*, 19 : 45-52.
- Poché R.M., Haque M.E., Mian M. Y., Sultana P., Karim M.A., 1981. Rice Yield Reduction by Simulated Rat Damage in Bangladesh. *Tropical Pest Management*, 27 : 242-246.
- Pointel J.-G., Coquard J., 1980. Le pourcentage de perte en poids et la perte spécifique, critères d'évaluation des dégâts causés par les insectes dans les céréales et les légumineuses stockées, *L'Agronomie Tropicale*, 34 : 377-381.
- Posamentier H., 1994. Rodent control *In* Proctor, D.L. (Ed). Grain storage techniques: evolution and trends in developing countries. FAO *Agricultural Services Bulletin*, n° 109 : 235-262.
- Proctor D.L., 1994. Grain storage techniques. Evolution and trends in developing countries. Group for assistance on systems relating to grain after harvest. FAO, *Agricultural Services Bulletin*, n° 109, 265 p.
- Proctor D.L., Rowley J.Q., 1983. The thousand grain mass (TGM): a basis for better assessment of weight losses in stored grain. *Tropical Stored Products Information*, 45 : 19-23.
- Quéré J.-P., Le Louarn H., 2011. *Les rongeurs de France*. Faunistique et biologie. Editions Quæ, Versailles, France, 311 p.
- Ratnadass A., Fleurat-Lessard F., 1991. Improvement in the practical methods of assessment of losses caused by insects in grain stored at the village level in tropical Africa. *In* Fleurat Lessard F. et Ducom P. (éds), *Proceedings of the 5th International Working Conference on Stored Product Protection*. Imprimerie du Médoc, Bordeaux, France, Vol III, p. 1681-1692.
- Redlingshöfer B., Soyeux A., 2011. Pertes et gaspillages : les connaître et les reconnaître pour les réduire et les valoriser. *In duALIne : durabilité de l'alimentation face à de nouveaux enjeux, questions à la recherche*. Éditions Quæ Versailles, France, p. 143-163.
- Reichmuth C., Schöller M., Ulrichs C., 2007. *Stored product pests in grain. Morphology, biology, damage, control*. AgroConcept Verlagsgesellschaft, Bonn, Allemagne, 170 p.
- Richard Molard D., 1982. Caractères généraux de la microflore des grains et graines et principales altérations qui en résultent. *In* Multon J.L. (éd.), *Conservation et stockage des grains et graines et dérivés : céréales, oléagineux, protéagineux et aliments pour animaux*. Collection Sciences et Techniques AgroAlimentaires, Tec & Doc Lavoisier, Paris, France, 2 : 254-272.
- Sauer D.B., 1992. *Storage of cereal grains and their products*. American Association of Cereal Chemists, 4th Edition. St Paul, États-Unis, 615 p.
- Schulten G.G.M., 1988. FAO's Experiences with Crop loss-assessment. *Insect Science and its Application*, 9 : 763-767.

- Schulten G.G.M., 1982. Post-harvest losses in tropical Africa and their prevention. The United Nations University Press. Tokyo, Japan. *Food and Nutrition Bulletin*, 4(2): 2-9.
- Scotti G., 1978. *Les insectes et les acariens des céréales stockées*. Afnor/ITCF, Paris, 238 p.
- Sigaut F., 1977. Les techniques de conservation à long terme des grains. Leur rôle dans la dynamique des systèmes de culture et des sociétés. Note dactylographiée. Maison des Sciences de l'Homme. Groupe Écologie et sciences humaines. 22 p. + annexes.
- Sinha R.N., Watters F.L., 1985. *Insectes nuisibles des minoteries, des silos-élévateurs, des usines à provendes et méthodes de désinfestation*. Direction générale Recherche et Agriculture, Ottawa, Canada, publi. 1776, 312 p.
- Spurgeon D., 1976. *The Hidden Harvest. A systems approach to post-harvest technology*. IDRC, Ottawa, Canada, 36 p.
- Steele J.L., Saul R.A., Hukill W.V., 1969. *Deterioration of shelled corn measured by carbon dioxide production*. Transactions of the ASABE 12 : 685-689.
- Steffan J.R., 1978. Description et biologie des insectes. Chapitre 1. In Scotti G. (coord.), *Les insectes et les acariens des céréales stockées*. ITCF/Afnor, collection normes et techniques, p. 1-65.
- Timm R., 1994. Norway rats. In S. Hygnstrom, R. Timm, and G. Larson (eds.), *Prevention and Control of Wildlife Damage*. University of Nebraska - Lincoln, États-Unis, p. B105-B120.
- Trim D.S., Robinson A.P., 1995. Drying methods in Grain storage techniques. Evolution and trends in developing countries. Group for assistance on systems relating to grain after harvest. Rome, Italie, FAO *Agricultural Services Bulletin*, n° 109 : 89-134.
- Troude F., Cruz J.-F., 1987. Conservation des céréales stockées en cellules métalliques sous climat tropical. Ceemat-Cirad, Anthony, France. *Machinisme Agricole Tropical*, 97 : 89-97.
- Turner M., 2013. *Les Semences*. Coll. Agricultures tropicales en Poche, Éditions Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux, 224 p.
- Tyler P.S., Gilman G.A., 1980. L'évaluation des pertes post-récolte. In Beaulieu Gingras S., Dan Dicko D. (ed.), *L'amélioration des systèmes post-récolte en Afrique de l'Ouest*. Agence de Coopération culturelle et technique ACCT, Paris, France, p. 137-151.
- Weidner H., Rack G., 1984. *Tables de détermination des principaux ravageurs des denrées entreposées dans les pays chauds*. GTZ, Eschborn, Allemagne, 148 p.
- Williams D.B., Gracey A.D., 1994. Maintenance and operation of bulk grain stores. FAO *Agricultural Services Bulletin*, n° 113, 154 p.



Sites Internet

AfricaRice (La science rizicole au service de l'Afrique) :
<http://www.africarice.org/>

Aphlis : African postharvest losses information system. Source d'information sur les pertes post-récolte (<http://www.aphlis.net/>)

Arvalis-Institut du végétal :
<http://www.arvalisinstitutduvegetal.fr/index.html>

CBGP (Centre de Biologie pour la Gestion des Populations) :
<http://www6.montpellier.inra.fr/cbpg>

CGIAR (Partenariat mondial de recherche agricole) :
<http://www.cgiar.org/>

Cirad : La recherche agronomique pour le développement
(<http://www.cirad.fr>)

- unité mixte de recherche QualiSud (<http://umr-qualisud.cirad.fr/>)
- site thématique sur le fonio (<http://fonio.cirad.fr/>)
- unité mixte de recherche Innovation (<http://umr-innovation.cirad.fr/>)

EFSA : European Food Safety Authority, Autorité européenne de sécurité des aliments. (<http://www.efsa.europa.eu/fr>)

FAO - Réseau d'information sur les opérations après récolte :
<http://www.fao.org/in-action/inpho/home/fr/>

FAO - Base de données statistiques : <http://faostat.fao.org>

FAO - Pertes et gaspillages alimentaires : <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/fr>

FSA (Faculté des Sciences agronomiques, Bénin) : <http://fsa-uac.org/>

GRET (Développement solidaire) : <http://www.gret.org/>

Inra - laboratoire de mycologie et de sécurité des aliments :
<http://www6.bordeaux-aquitaine.inra.fr/mycsa>

Insah (Institut du Sahel) : <http://www.insah.org/>

Inter-Réseaux, développement rural : <http://www.inter-reseaux.org/>

IRRI - Résultats sur les recherches « après récolte du riz » : <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest>

NRI - Postharvest loss reduction centre : <http://postharvest.nri.org/>



Glossaire

Activité en eau (*Activity of water*) : symbolisée par le terme a_w , elle représente la disponibilité de l'eau dans les produits. Elle est égale au rapport entre la pression de vapeur d'eau à la surface d'un produit et la pression de vapeur saturante à la même température. L'eau pure a une a_w égale à 1.

Aérobiose (*Aerobiosis*) : ambiance d'un milieu riche en oxygène (ou en air) qui favorise la dégradation de la matière organique. Par opposition l'anaérobiose est un milieu sans oxygène.

Aflatoxine (*Aflatoxin*) : mycotoxine produite par des moisissures (*Aspergillus* spp.) particulièrement fréquentes sur les grains dans les régions chaudes et humides.

Agriculture familiale (*Family agriculture, family farming*) : agriculture reposant sur une main-d'œuvre familiale et souvent synonyme d'agriculture paysanne notamment dans les pays en développement.

Amidon (*Starch*) : glucide complexe formé de molécules de glucose. L'amidon constitue la réserve énergétique des grains de céréales.

Amylopectine (*Amylopectin*) : principal constituant de l'amidon formé de chaînes ramifiées de glucose.

Amylose (*Amylose*) : constituant de l'amidon formé par des chaînes non ramifiées de molécules de glucose. Selon les céréales, l'amylose est plus ou moins présent.

Atomiseur (*Thermal fog generator*) : matériel de pulvérisation permettant de générer de très fines gouttelettes.

Autoconsommation (*Selfconsumption*) : fait, pour les agriculteurs, de consommer les produits de leur propre

production comme c'est souvent le cas dans les pays en développement.

Balle (*Hull*) : enveloppes externes (glumes et glumelles) des grains de céréales vêtues (riz, fonio, orge, avoine, épeautre). Les balles représentent 20 % à 25 % du poids brut.

Banco (*Banco*) : terre crue argileuse, enrichie de pailles de céréales, utilisée comme matériau de construction pour la réalisation de différentes structures (habitations, greniers...).

Battage (*Threshing*) : en agriculture, le battage est une opération post-récolte qui consiste à séparer les grains de l'épi ou de la tige.

Bouillie (*Mixture*) : mélange, généralement dans l'eau, d'un produit phytopharmaceutique (insecticide) destiné à être appliqué par pulvérisation, arrosage ou trempage.

Brassicole (*Malting*) : propre à la bière et à sa fabrication. Une céréale brassicole est une céréale destinée à la fabrication de la bière comme l'orge de brasserie.

Caryopse (*Caryopsis*) : fruit sec simple de graminées obtenu après fécondation de la fleur. Le caryopse est plus souvent appelé grain.

Cellule de stockage (*Bin*) : élément individualisé d'un stockage de capacité variable dans lequel les grains sont stockés en vrac.

Colombin (*Clay-coil*) : petit boudin de terre cylindrique long.

Concentration (*Concentration*) : quantité (en grammes) de matière active contenue dans l'unité de volume ou de masse d'un produit commercial.

Nota : La concentration d'emploi est la

masse de matière active contenue dans l'unité de volume de bouillie à épandre (ne pas confondre avec la dose).

Conductibilité thermique (*Thermal conductivity*) : propriété qu'ont les matériaux de transmettre plus ou moins facilement la chaleur d'un point à un autre de leur masse.

Cossette (*Chip*) : morceau de racine (manioc, betterave...) découpé avant d'être transformé.

Cotylédon (*Cotyledon*) : feuille primordiale contenue dans la graine. Les céréales sont monocotylédones (le cotylédon est appelé scutellum) alors que les légumineuses sont dicotylédones.

Décorticage (*Hulling*) : opération post-récolte qui consiste à débarrasser les grains de leurs enveloppes ou de leur coque externes.

Déprédateur (*Pest*) : on qualifie le plus souvent de déprédateurs ou de ravageurs, les insectes et les rongeurs qui s'attaquent aux réserves de grains et qui sont à l'origine de pertes importantes (ne pas confondre avec prédateurs).

Dogon (*Dogon people*) : peuple traditionnel du Mali vivant dans la région de Mopti et plus précisément de part et d'autre de la falaise de Bandiagara (plateau de Bandiagara et plaine du Seno).

Dose (*Dosage rate*) : quantité (en grammes) de matière active à appliquer par unité de matériel traité (longueur, surface, volume, masse). Pour le traitement des grains, on exprime parfois la dose en « ppm » ou partie par million (par exemple 1 ppm = 1 gramme par tonne).

Éleusine (*Eleusine*) : petite céréale (*Eleusine coracana*) d'Afrique centrale et orientale.

Étuvage (*Parboiling*) : procédé très ancien, généralement appliqué au riz, qui consiste en un traitement hydrothermique des grains de riz paddy suivi d'un séchage.

Fonio (*Fonio*) : céréale ancestrale (*Digitaria exilis*) d'Afrique de l'Ouest aux grains minuscules.

Funicule (*Funicle*) : en botanique, il s'agit d'un cordon vasculaire qui relie la graine à la plante.

Glumes (*Glumes*) : bractées qui entourent la base des épillets chez les graminées.

Glumelles (*Lemma and palea*) : bractées qui forment l'enveloppe extérieure de chaque fleur, chez les graminées.

Grain vitreux (*Vitreous kernel*) : grain dont l'albumen est naturellement dur et translucide avec une structure compacte par opposition aux grains farineux à structure friable et donnant une farine blanche.

Hile (*Hilum*) : point d'attache du grain avec la plante mère dont il est issu. Le hile des céréales apparaît sous la forme d'une cicatrice à une extrémité des grains.

Hivernage (*Rainy season*) : période qui correspond à la saison des pluies dans les pays tropicaux; soit de juin à octobre en Afrique de l'Ouest.

Humidité (*Moisture content*) : l'humidité ou la teneur en eau des grains est le rapport, exprimé en pourcentage, entre la masse d'eau contenue dans un échantillon de grains et la masse totale de l'échantillon. « En base humide » exprime bien que la mesure est effectuée par rapport à la matière humide (masse totale) plutôt que par rapport à la matière sèche.

Humidité de sauvegarde (*Safe moisture content*) : humidité du produit



au-dessous de laquelle les microorganismes, et notamment les moisissures, ne peuvent pas se développer lors du stockage.

Hybride (*Hybrid*) : variété résultant du croisement contrôlé de deux lignées parentales.

Hydrolyse (*Hydrolysis*) : décomposition chimique d'une substance par l'action de l'eau.

Isotherme de sorption (*Sorption isotherm*) : courbe représentant, à une température donnée, l'humidité du produit en fonction de la valeur de l'activité en eau (ou de l'humidité relative de l'air en équilibre).

Jute (*Jute*) : fibre naturelle extraite d'un arbuste tropical et principalement destinée à la fabrication de sacs.

Légumineuse (*Legume*) : plante dont le fruit est une gousse (haricot, pois, fève, niébé, soja...) et qui sont plus riches en protéines que les céréales. Les légumineuses sont capables de fixer l'azote atmosphérique en association symbiotique avec des bactéries (voir nodosité).

Matière active (*Active ingredient*) : constituant (molécule) d'une préparation pesticide auquel est attribuée son efficacité.

Matière sèche (*Dry matter*) : produit obtenu après élimination totale de l'eau contenue dans le produit.

Mécanisation (*Mechanization*) : développement ou utilisation de machines au niveau des exploitations agricoles ou des unités de transformation des produits agricoles.

Meule (*Stack*) : tas de gerbes de céréales érigé dans les champs et auquel on donne une forme conique pour évacuer l'eau de pluie.

Microorganismes (*Micro-organisms*) : organismes microscopiques (champignons, levures, bactéries) présents à la surface des grains.

Natte (*Mat*) : sorte de tapis en paille tressée souvent utilisée pour le séchage naturel des produits agricoles et alimentaires à même le sol.

Nébulisation (*Fogging or Misting*) : procédé consistant à enrober les grains en mouvement d'un brouillard de très fines gouttelettes pour assurer un traitement insecticide plus homogène que celui obtenu en pulvérisation.

Nettoyage (*Cleaning*) : opération qui a pour objet d'éliminer les impuretés diverses, végétales, minérales ou animales (paille, balles, terre cailloux, insectes...) qui nuisent à la bonne conservation des grains.

Niébé (*Cowpea*) : petit haricot ou dolique à œil noir (*Vigna unguiculata*), couramment cultivé en Afrique de l'Ouest.

Nymphe (*Pupa or Nymph*) : stade du développement intermédiaire entre la larve et l'adulte (imago) correspondant à l'étape de la métamorphose des insectes.

Oléagineux (**oléagineuse**) (*Oilseed*) : plant dont la graine (arachide, sésame, colza, tournesol...) est riche en huile.

Panicule (*Panicle*) : une panicule est une inflorescence composée, formée par une grappe d'épis comme pour le riz ou le sorgho.

Péricarpe (*Pericarp*) : paroi du fruit ou, pour les céréales, « peau » du grain ou caryopse.

Pesticide (*Pesticide*) : produit chimique destiné à éliminer les organismes nuisibles mais qui représente un très grave facteur de pollution à cause de la persistance des résidus.

Post-récolte (*Post-harvest*) : concerne les opérations réalisées après la récolte et qui pour les céréales comprennent notamment les principales activités techniques que sont le battage, le nettoyage, le séchage, le stockage, la transformation, etc.

Pouvoir germinatif (*Germination capacity*) : capacité d'une graine à germer lorsqu'elle est placée dans des conditions favorables.

Protéagineux (protéagineuse) (*Protein crop*) : plant dont la graine légumineuse (pois, fève, soja...) est riche en protéines.

Rafle (*Corn cob*) : axe de l'épi de maïs. Les rafles de maïs peuvent être utilisées comme combustible (biomasse) ou comme litière après broyage.

Ration alimentaire (*Daily food ration*) : désigne la quantité minimale et la nature d'aliments qu'un individu doit consommer chaque jour pour subvenir aux besoins de son organisme.

Rendement (*Yield*) : en agriculture, le rendement (ou rendement agricole) est la quantité de produit récolté sur une surface cultivée donnée. Il est exprimé en kilogrammes (kg) ou en tonnes (1t = 1000kg) ou en quintaux (1 q = 100kg) par hectare.

Riz cargo (*Brown rice*) : riz brun ou riz complet obtenu par décorticage du riz paddy (élimination des enveloppes extérieures ou « balles »). Dans le commerce du riz, c'est souvent sous cette forme qu'il est transporté dans les navires d'où son nom.

Riz paddy (*Paddy rice*) : riz à l'état brut, non décortiqué, obtenu après battage. Il n'est pas comestible en l'état car il conserve ses enveloppes extérieures (« balles ») riches en silice.

Rodenticide (*Rodenticide*) : substance utilisée pour tuer les rongeurs et notamment les rats (raticide).

Sanitation (*Sanitation*) : ensemble des mesures qui visent à maîtriser ou à éliminer les nuisibles et à assainir les locaux.

Silothermométrie (*Silothermometry*) : système permettant de mesurer la température des grains dans une cellule de stockage au moyen de capteurs ou sondes thermométriques.

Soie (*hair*) : sorte de poil de certaines larves d'insectes (par exemple, dermeste).

Son (*Bran*) : sous-produit ou coproduit de la transformation obtenu après blanchiment des grains. Les sons, constitués de fragments de péricarpe et de germe, sont riches en fibres, en matières grasses et en vitamines et sont souvent valorisés en alimentation animale.

Soudano-sahélien (*Soudano-sahelian*) : zone climatique au sud du Sahel caractérisée par une longue saison sèche et une seule saison des pluies, très courte avec des précipitations annuelles se situant entre 500 et 900 mm.

Spathe (*Husk leaf*) : sorte de feuille qui entoure et protège l'épi de maïs.

Teff (*Tef*) : céréale ancestrale (*Eragrostis tef*) d'Afrique de l'Est et notamment d'Éthiopie aux grains minuscules.

Transformation des grains (*Grain processing*) : terme général utilisé pour parler de l'ensemble des opérations technologiques réalisées sur les grains comme le décorticage, le blanchiment, la mouture.

Vannage (*Winnowing*) : nettoyage des grains battus pour les séparer de leurs impuretés (balles, portions de tiges, poussières...) au moyen d'un van et/ou en utilisant l'effet d'un courant d'air.

Vrac (*Bulk*) : désigne les produits qui ne sont pas conditionnés ou emballés.

Xérotolérant (*Xerotolerant*) : capable de s'adapter à des milieux secs.



Index

- acarien 181, 217
acide aminé 16
activité de l'eau 24, 25, 45
aération 31, 57, 81, 91, 106, 111-114, 205, 207
aérobie 28, 30
aflatoxine 46, 60
Afrique 5, 31, 34, 36, 39, 43, 52, 97, 168, 171, 199, 200, 203
aire 45, 51-53, 91, 108, 114
albumen 12-14, 16, 170
alimentation 5, 9, 16, 33, 35, 43, 192, 197
altération 11, 21, 23, 25, 26, 29, 31, 44, 45, 158, 183
alucite 30, 41, 160, 177
Amérique 16, 57, 66, 69, 97, 101, 169, 200, 203
amidon 13, 16, 21
amylose 16
anaérobie 28
anticoagulant 210, 211
appât, appâtage 210-212
Aspergillus 29, 46, 60
atmosphère 27, 97, 99, 153
bâche 52, 92, 101, 108, 122, 126, 139, 193, 194
bactérie 22, 29, 46, 227
balle 12, 89, 147, 185, 197
banco 78, 84, 86, 87, 92
battage 9, 13, 37, 51, 80, 82, 89
bidons 99, 101, 197, 208
brisure 68, 74, 147-149
bruche 99, 158, 159, 169, 170, 196
cadelle 158, 159, 161, 173, 174
capucin (voir aussi « grand capucin ») 159, 163, 168-170, 181, 188, 196
caryopse 11
cellule métallique 20, 97, 133, 136
charançon 30, 41, 156, 158, 165, 166, 168, 169, 173, 185
chenille 30, 173, 175, 177-179, 182
claire 51, 52, 54, 91
Coléoptère 30, 155, 156, 159-163, 165, 166, 169, 171, 173, 175, 176, 181, 184, 185
cotylédon 14
courbe d'équilibre 25, 27, 50
crib 57-61, 80, 91, 203, 205
cycle de développement 161, 165, 170, 174
dégât 30, 33, 40, 51, 60, 161, 168-171, 175, 176, 199, 202, 204, 209
déprédateur 9, 14, 28, 30, 31, 36, 51, 77, 88, 90, 101, 102, 105, 114, 125, 162, 182, 199
dermeste 158, 159, 165, 174
désinsectisation 132, 136, 156, 184, 186, 187, 193, 194, 196, 197
diagramme de Mollier 47-49
dose 16, 150, 190
dryération 73
ebliva 80, 82, 83, 91, 92
échantillon 22, 23, 121, 127
échauffement 19, 21, 22, 30, 112, 150, 152, 154, 180
élevage 35, 77, 130, 159
élévateur 119, 124, 133, 138, 141
emballage 43, 99, 116, 123, 192, 199, 212
ensachage 99

- entrepôt 31, 42, 101, 105, 111, 120, 128, 171, 175, 179, 183
- environnement 42, 184, 185, 186, 195, 213, 215, 221
- enzyme 16, 25
- Europe 43, 89, 200
- explosion 153, 154, 209
- exportation 129, 180, 186, 193, 196
- fermentation 21, 153
- flore 29, 46
- fosse 28, 78, 88-90, 92, 118, 130, 141, 203
- fumigant 194
- fût 91, 97, 99, 193
- gaspillage 9, 33, 34, 42, 43
- gazage 183, 185, 193, 195
- gaz carbonique 21, 28, 136
- germe 12, 14, 16, 17, 180
- germination 14, 21-23
- glucide 16, 21
- glumelle 12
- glume 12
- grand capucin 159, 161, 164, 168, 181
- haricot 11, 12, 14, 16, 56, 87, 97, 159, 163, 169, 170
- humidimètre 121
- hydrolyse 16
- hygiène 125, 127, 154, 183, 186, 192, 208
- hygroscopique 20, 24, 25
- Hyménoptère 160, 161, 182
- impureté 30, 123, 147-149, 172, 173, 175
- incendie 153
- infestation 86, 126, 156, 162, 179, 182, 184-186, 193, 197, 211
- insectifuge 102, 183
- isotherme 25, 47, 48
- jute 88, 101, 107, 110, 116, 126, 158, 175
- légumineuse 9, 11, 12, 14-16, 36, 38, 87, 88, 97, 103, 126, 142, 169, 170, 192, 203
- Lépidoptère 30, 155, 160, 164, 175, 176, 182, 184
- levure 29, 46
- lipide 13-16, 25
- lutte biologique 159, 181, 209
- lutte chimique 42, 103, 159, 184, 185-187, 209, 210
- lutte physique 44, 99, 185, 186, 209
- lutte préventive 184, 204, 208, 209
- Maillard (réaction de) 20
- manutention 9, 13, 18, 105, 107-109, 112, 118, 120, 124, 129, 132, 133, 141, 142, 145, 146, 153, 154, 158, 178, 180
- matière active 189, 192
- matière sèche 16, 21-23
- maturité 51, 77, 91, 165, 168, 177
- métabolisme 17, 20, 27, 150
- meule 37, 51, 80, 81
- mite 160, 175-177, 179
- moisissure 9, 12, 14, 17, 20-23, 25, 28-30, 36, 45, 46, 60, 84, 86, 88, 90, 101, 126, 139, 175, 181
- moissonneuse 43
- mycotoxine 36, 46, 60
- nébulisation 190
- nettoyeur 124, 147-150, 161
- niébé 11, 12, 38, 97, 99, 126, 159, 163, 169-171, 192, 196
- oiseau 16, 22, 31, 43, 51, 60, 77, 81, 105, 113, 114, 153, 173, 174
- palette 63, 116, 117, 125, 126
- papillon 30, 175-177, 179
- Penicillium 29, 46



- péricarpe 12, 17
- pertes (de produit, post-récolte, après récolte, etc.) 5, 6, 9, 10, 19, 21, 33-44, 60, 77, 96, 98, 139, 170, 199, 202-204, 213
- pesticide 42, 186-188, 190, 192, 196, 198
- phosphure 194, 210
- pile de sacs 106-109, 111, 114, 116, 117, 119, 120, 125-127, 204, 210
- poids spécifique 18
- point chaud 150, 152
- polyéthylène 92, 99, 114, 144
- polypropylène 88, 99, 101, 107, 116, 127
- poudrage 190
- pouvoir germinatif 20, 22
- pression partielle 23, 24
- protéagineux 68, 182
- protéine 12-14, 16
- protide 16
- pulvérisateur 122, 190
- pyrale 177, 179, 180, 184
- rafle 60
- raticide 210
- refroidissement 66, 71, 73, 150
- résidu 17, 42, 184, 185, 188, 189, 193, 194
- respiration 21-23, 28, 30, 97, 99
- rodenticide 210-212, 220
- sanitation 184, 186
- scutellum 14
- séchage naturel 50-52, 61, 81, 101
- sécurité 2, 5, 9, 154, 185, 193
- semence 11, 14, 20, 22, 44, 68, 77, 87, 88, 102, 103, 141, 142, 144, 150, 160, 164, 170, 183, 197
- silothermométrie 152
- silvain 160, 163, 165, 166, 172, 173, 181, 185
- solaire 52, 55, 106, 110, 114
- sonde 121, 127, 152
- sorption 25-28, 45
- souris 31, 128, 199, 200, 205
- spathe 41, 54, 57, 82, 169
- spore 20, 23
- sucré 16, 116, 140, 211
- système post-récolte 9, 35, 36, 42, 129
- tégument 12, 170, 173, 175, 180
- teigne 160, 164, 176, 178, 179
- teneur en eau 22, 45, 47-49
- toxicité 212
- transporteur 57, 70, 71, 133, 138, 141, 142, 144, 145
- tribolium 160, 171, 172, 175, 181, 185
- vannage 39
- variété 9, 35, 38, 193
- ventilateur 47, 61, 64, 66, 145, 150, 151
- vitamine 12, 14, 16

Édition : Claire Parmentier (PAG), Claire Jourdan-Ruf (Éditions Quæ)

Les figures et dessins sont de J.F. Cruz sauf mention particulière

Infographie : Éditions Quæ

Mise en pages : Hélène Bonnet

Photo de couverture : Groupe de greniers en paille au Burkina Faso
(© Thierry Ferré, Cirad).

Impression : La Source d'Or

Dépôt légal : juin 2016



La totalité de la production agricole destinée à l'alimentation humaine ne parvient pas à ses destinataires en raison de pertes au cours de la phase dite de « post-récolte » qui comporte les étapes entre la récolte et la transformation des produits pour l'alimentation. Dans le contexte d'augmentation de la demande alimentaire de ce début de ^{xxi}^e siècle, notamment en Afrique, il est donc essentiel, non seulement d'améliorer la production agricole vivrière mais aussi de lutter contre ces pertes. Il s'agit là d'un enjeu majeur de la lutte contre la faim. Cet ouvrage y contribue en effectuant une synthèse opérationnelle des connaissances anciennes et récentes dans ce domaine. C'est un complément utile du livre sur les semences paru dans la même collection.

Cet ouvrage constitue une référence pratique pour tous ceux qui œuvrent sur le terrain pour améliorer la conservation des grains en zone tropicale et ainsi réduire les pertes post-récolte.

Jean- François Cruz, chercheur au Cirad, est spécialiste des technologies post-récolte des céréales.

Djidjoho Joseph Hounhouigan est professeur titulaire en sciences et technologie alimentaires et doyen de la Faculté des Sciences agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin.

Francis Fleurat-Lessard, chargé de recherche à l'Inra Bordeaux-Aquitaine, est spécialiste de la sécurité sanitaire des céréales après-récolte.

Francis Troude, aujourd'hui en retraite, a fait l'essentiel de sa carrière au Cirad comme spécialiste des technologies post-récolte des produits agricoles.



les
presses
agronomiques
de Gembloux

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, Inra, Irstea
www.quae.com

25 €

ISBN : 978-2-7592-2436-4



9 782759 224364

Réf. : 02516
ISSN : 1778-6568