

PRESERVATION DE LA QUALITE SANITAIRE DES CEREALES

La protection antiparasitaire intégrée : nouveau concept d'une stratégie préventive d'assurance qualité des stocks

Francis FLEURAT-LESSARD¹

Le stockage de longue durée des grains est primordial pour assurer l'approvisionnement régulier des industries des céréales en matières premières tout au long de l'année. Toute altération de la qualité d'origine étant irréversible, la qualité intrinsèque des céréales à la récolte doit être impérativement préservée des altérations possibles pendant la conservation. Or, au cours du stockage, les interactions complexes entre variables abiotiques et bio-agresseurs de l'écosystème du grain stocké (micro-organismes, insectes, acariens, grain, ...) peuvent conduire à une détérioration de la qualité initiale. Les responsables d'organismes stockeurs (OS) disposent de moyens d'intervention qui permettent théoriquement de prévenir la biodétérioration pendant la conservation. Mais, leurs sources d'information et de conseil pour l'utilisation et la combinaison de ces moyens techniques au moment propice, ainsi que pour l'aide à la planification des interventions sur les stocks, sont souvent incomplètes ou inaccessibles sur les sites de stockage. Il s'ensuit des pertes économiques liées à un manque de maîtrise pour le stockage de longue durée. Ces difficultés sont associées à une absence de garantie d'approvisionnement des industries de transformation avec les qualités requises, au moins à certaines périodes de l'année. Afin de satisfaire aux exigences de qualité sanitaire des industries des céréales, il est indispensable pour les OS de réduire les quantités qui ne satisfont pas à leurs spécifications.

Comment procéder pour faire évoluer favorablement cette situation ? L'extension de l'application des démarches d'assurance qualité HACCP et des guides de bonnes pratiques hygiéniques (GBPH), déjà en vigueur dans les industries de transformation, au secteur du stockage et de la conservation est un premier pas vers la maîtrise de la qualité des stocks de céréales. Mais, allant bien au delà des bonnes pratiques de stockage, l'absence de contamination par des substances toxiques (résidus de pesticides et mycotoxines de stockage) est devenue une des exigences essentielles de la qualité pour les industries utilisatrices. Les études récentes sur les méthodes alternatives à la lutte contre les insectes, autrement que par l'utilisation de pesticides, ainsi que la prévention de la croissance des moisissures mycotoxinogènes, montrent que ces dangers peuvent être maîtrisés par de nouvelles approches raisonnées, comme la protection antiparasitaire intégrée (PAI). Celle-ci fait une place importante aux méthodes préventives (non chimiques) et au suivi des indices de présence de prédateurs (insectes) et de prolifération des moisissures "en temps réel". Ces outils de la PAI sont des retombées directes de recherches récemment arrivées à leur terme. Mais, le facteur

¹ * INRA, Unité de Biologie et Technologie Après Récolte (équipe Entomophysiologie), 71, avenue Edouard Bourleaux, BP 81, 33883 Villenave d'Ornon cedex.

certainement décisif de l'assurance de la qualité sanitaire et de la sécurité des stocks de grain, pour une meilleure adéquation entre les qualités disponibles à l'issue de la conservation et la demande des industries de transformation, est l'apparition du premier système expert de gestion de la qualité globale des grains stockés.

Les deux causes majeures de biodétérioration des céréales stockées (les « forces détérioratives »), sont les insectes ravageurs des grains et les moisissures des milieux peu hydratés (Tipples, 1995 ; Cahagnier et Fleurat-Lessard, 1996).

Les espèces d'insectes granivores sont plus ou moins spécialisées pour vivre et se reproduire dans les masses de grain (Fleurat-Lessard, 1982). Pour simplifier, les espèces les plus dangereuses sont celles qui se développent à l'intérieur même du grain et qui appartiennent au groupe des ravageurs primaires : espèces du genre *Sitophilus* (charançons des céréales), *Rhizopertha* (capucin des grains) et *Sitotroga* (alucite du maïs et du riz). Les espèces les plus fréquentes et les plus nombreuses dans les stocks de céréales sont des ravageurs qui attaquent les grains de l'extérieur et dont le cortège d'espèces succède théoriquement aux attaques des ravageurs primaires. Pour cette raison, ils sont qualifiés de ravageurs secondaires. Ils appartiennent aux genres *Oryzaephilus* ou *Cryptolestes* (silvains), *Tribolium*, *Ephestia* (mite de la farine) et *Plodia* (teigne des semences). Un troisième cortège d'espèces vient compléter la faune entomologique des grains stockés : les espèces opportunistes à régime autre que granivore (mycophage, nécrophage, détritiphage, saprophage, parasite, prédateur, etc.). En climat tempéré, ces ravageurs "de stockage" ne sont pas présents dans le champ au moment de la récolte des céréales, au moins pour les céréales à paille. Cependant, des colonies cachées se maintiennent d'une année à l'autre dans la majorité des installations de stockage. La plupart du temps, le passage des grains dans les circuits de chargement des cellules suffit à infester le grain des nouvelles récoltes. La densité de cette « contamination » initiale est très faible et peut rester longtemps à un niveau indétectable au contrôle normalisé sur échantillon (ISO, 1997 ; ISO/FDIS, 2002).

Cependant, la présence d'insectes vivants est un défaut de qualité sanitaire fréquent qui n'est pas toléré dans le commerce des grains (Tableau 1). La seule détection d'insectes dans les stocks de grain étant une cause de réfaction sur la valeur du lot, la lutte est permanente. Cette lutte est basée – en France tout au moins – sur l'application d'insecticides à résidus persistants, directement sur les grains. L'usage de gaz insecticides, qui ne laissent pas de résidus après la fumigation, reste marginal en France pour diverses raisons autres que techniques. Seule la désinsectisation rapide d'urgence, lorsque les infestations sont évidentes, fait largement appel à la fumigation qui permet l'éradication complète des ravageurs, indispensable avant une transaction commerciale ou pour l'export. La ventilation de refroidissement du grain en cellules, qui est préconisée à titre préventif pour limiter le taux d'accroissement des populations initiales, est également utilisée pour les conservations de longue durée (stock mis à l'intervention, par ex.).

La microflore des « moisissures de stockage » est principalement constituée par les espèces des genres *Penicillium* et *Aspergillus*, accompagnées par des espèces secondaires de Mucorales ou des genres *Byssochlamys*, *Scopulariopsis* ou *Wallemia*. Ces moisissures sont les seules à pouvoir se développer sur les grains à partir du seuil de 15 à 16 % de teneur en eau (elles sont qualifiées de « xérotolérantes »). En ce qui

concerne les microorganismes, il n'existe aucune obligation légale ou seuil de référence à respecter. Néanmoins, on considère qu'un grain a une qualité microbiologique convenable s'il héberge moins de 10^4 germes de la flore de stockage par gramme de grain (Cahagnier et Fleurat-Lessard, 1996). Toutefois, si les moisissures peuvent être une cause directe de l'altération des grains lorsque l'humidité n'est pas maintenue en dessous du seuil de développement, leur croissance doit être empêchée par tous les moyens car certaines espèces et souches de la flore de stockage peuvent synthétiser des mycotoxines, substances toxiques dangereuses pour la santé humaine ou animale (Tableau 2). La lutte préventive contre la prolifération des moisissures de stockage repose sur le contrôle strict des conditions de température et d'activité d'eau des grains stockés, en tous les endroits de la masse, pour maintenir le grain en dehors des conditions physico-chimiques permettant la germination et la croissance des moisissures xérotolérantes (Multon, 1982). Pour assurer le maintien, à titre préventif, du stock de grain en dehors des limites favorables au développement des moisissures, des équipements et matériels permettant d'agir sur l'état physico-chimique des grains stockés sont largement utilisés dans les pays grands producteurs de céréales : séchage, ventilation, refroidissement, nettoyage et séparation, atmosphères contrôlées, etc.

La question des résidus de pesticides est venue compliquer la gestion des attaques d'insectes. Ainsi, En sortie de stockage, les céréales doivent être conformes aux cahiers des charges des industries utilisatrices ou des organismes de contrôle à l'exportation. Les spécifications qualitatives des industries des céréales portent encore aujourd'hui en priorité sur des critères de composition biochimique et d'aptitudes technologiques (Fleurat-Lessard, 2002 et Figure 1). Mais, les crises récentes sur la sécurité des produits alimentaires ont abouti à l'émergence de contraintes majeures sur la qualité et la sécurité sanitaires de l'ensemble des produits alimentaires, y compris les produits d'origine végétale. Ainsi, pour certains segments du marché il est exigé des ingrédients et une matière première (la céréale en grain) exempte de traitement après récolte ou même de résidus de pesticides (céréales de filière « bio », céréales pour baby-food (farines lactées ou petits pots), céréales de petit déjeuner, muesli, etc.), tout en respectant la règle intangible de l'absence d'insecte vivant. L'usage traditionnel de pesticides de protection des stocks laissant des résidus sur le grain ne permet pas de satisfaire cette double exigence.

Assurance de qualité sanitaire et de sécurité des stocks

La définition de la qualité pour l'utilisateur et l'évolution des exigences

Le pilotage de la qualité est devenu davantage dépendant des exigences de l'utilisateur final en aval du stockage (transformateurs, distributeurs et consommateurs), celles-ci portant de plus en plus sur les aspects "sécurité et salubrité des aliments".

Jusqu'à présent, la protection des stocks contre les dommages causés par les bioagresseurs était basée sur un calendrier d'interventions pré-défini *a priori* ou, sur des interventions correctives appliquées à la suite de dommages constatés. L'évolution de cette situation vers la maîtrise totale de la qualité et de la sécurité sanitaires des stocks de grain exige un renversement de stratégie en donnant la préférence à la prévention des risques. Dans un premier temps, la mise en pratique dans le contexte des OS du système HACCP (hazard analysis critical control point), qui représente la réponse la mieux adaptée pour la maîtrise de la sécurité et de la salubrité d'un produit alimentaire, a été encouragée pour répondre à ces nouvelles exigences. La « méthode HACCP », que l'on

peut traduire par : *analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise*, a maintenant été introduite jusqu'au stade de la première transformation des céréales, par l'intermédiaire des guides de bonnes pratiques hygiéniques (GBPH), édités pour chaque filière (par ex., le GBPH de l'industrie de la semoulerie de blé dur) (Anonyme, 2000). Un projet de règlement issu de l'application de la Directive Communautaire 93/43 « Hygiène » va étendre le champ d'application de la méthode HACCP au stade du stockage et de la conservation des produits agricoles bruts, pour tous les états membres à l'horizon 2005. Les 60 millions de tonnes de céréales qui sont produites en France chaque année sont directement concernées, y compris le stockage sur les lieux de production, à la ferme. La généralisation du système HACCP de maîtrise des dangers pour la qualité et la sécurité des produits à base de céréales correspond à un besoin de traçabilité totale des aspects relatifs à la qualité sur l'ensemble de la filière, en application du principe de précaution.

Le principe de l'HACCP appliqué à la maîtrise de la qualité et la sécurité sanitaire

La méthode HACCP est l'outil de travail spécifique de l'assurance qualité des produits alimentaires. Elle s'applique aux trois catégories de dangers qui peuvent menacer la sécurité et la salubrité des aliments : les dangers biologiques, chimiques ou physiques. La mise en oeuvre pratique de l'HACCP est un processus qui se déroule en 7 étapes distinctes, quel que soit le domaine particulier d'application (*Codex alimentarius*, 1993). Cette méthode permet d'identifier et d'évaluer les dangers en matière d'hygiène à n'importe quel stade de la filière (depuis la conservation des produits agricoles bruts jusqu'à la distribution des aliments), ainsi que de définir les moyens nécessaires à leur maîtrise. Elle est essentiellement basée sur une approche préventive de maîtrise des dangers et des risques de dégradation de la qualité des produits. L'application aux aspects de l'hygiène sanitaire dans les industries des céréales et dans les OS fait appel à des connaissances spécifiques des experts du domaine, en particulier pour intégrer à la démarche HACCP les modèles prédictifs d'évolution spatio-temporelle des bioagresseurs (moisissures et insectes) ou d'évolution des contaminants (résidus et mycotoxines) en fonction des conditions de conservation ou au cours des processus de transformation (Fleurat-Lessard, 2001). Pour l'application en OS par exemple, l'analyse des étapes du travail des lots de grain au silo permet d'identifier points de dangers et points critiques pour les résidus de pesticides, ainsi que les points de danger de prolifération des agents biologiques de détérioration à chaque étape du « travail du grain » (Figure 2).

Du grain sans résidus, ni moisissures mycotoxinogènes

Après une première phase d'identification des points de danger pour la qualité, une analyse des causes permet de déterminer où se situent les véritables points critiques (CCP) pouvant mettre en danger la qualité et la sécurité du produit stocké en cas de défaut de maîtrise. Après cette analyse, un plan d'action associant la prévention, les mesures correctives et les moyens de surveillance de chaque CCP peut être construit. A partir de ce premier résultat, des itinéraires de stockage spécifiques, par exemple sans traitement après récolte (STAR), peuvent être définis dans les OS concernés par ce type de spécification (Figure 3).

L'objectif général à atteindre est le maintien des populations de bio-agresseurs en dessous du seuil de « perte économique ». Pour le cas des insectes, par exemple, ce seuil est défini par la limite de la densité d'insectes détectable par des méthodes normalisées. Pour la flore de stockage toxino-gène, la stratégie est basée sur des modèles de développement des moisissures en fonction des conditions physico-chimiques du mileu

(température et activité d'eau du grain). Les modèles récemment développés pour l'orge de brasserie permettent de prévoir les durées de conservation sans risque de détérioration de la qualité microbiologique (Jacobsen and Fleurat-Lessard, 2002). Ce principe de raisonnement par rapport à un seuil « de niveau d'infestation ou de contamination » à ne pas franchir est comparable à la démarche de détermination des seuils de dégâts économiques en protection intégrée des cultures. Dans cet esprit, la prévention raisonnée des risques pour la sécurité et la salubrité des stocks de grain a abouti au concept de la protection antiparasitaire intégrée ou PAI.

Concept de la protection antiparasitaire intégrée (PAI)

La définition et les principes de la protection antiparasitaire intégrée des stocks

La PAI est un système de gestion des populations de bio-agresseurs qui, dans des conditions de milieu données, utilise et combine toutes techniques et méthodes appropriées de manière coordonnée, afin de maintenir ces populations de bio-agresseurs en dessous du seuil de dommage économique. Cette approche systémique intègre les exigences de sécurité et de salubrité requises pour le produit final.

Pour les insectes, le seuil à ne pas dépasser correspond à la plus faible densité détectable par une méthode normalisée (AFNOR, 2000). Ce seuil, avec la pratique actuelle des trois prélèvements par livraison de 20 tonnes (anonyme, 2001), est évalué statistiquement à 1 insecte par kg de grain (Fleurat-Lessard, 1988 et Figure 4). Pour les moisissures susceptibles de produire des mycotoxines en cas d'humidité élevée dans une partie du stock, la prévention consiste à maintenir des conditions défavorables d'humidité et de température pendant toute la période de conservation en faisant référence aux modèles de prévision des périodes de stockage sans risque évoqués plus haut (Jacobsen and Fleurat-Lessard, 2002).

La stratégie de la Protection Antiparasitaire Intégrée (PAI) des stocks de céréales repose sur trois principes de base :

1. *L'intégration de différentes méthodes de lutte dont les effets sont compatibles avec les exigences de l'utilisateur final (pilotage par les contraintes de l'aval).*

Il s'agit principalement de mesures ayant pour effet de limiter la dynamique des populations de bio-agresseurs et le recours aux pesticides rémanents en favorisant l'utilisation des méthodes préventives de lutte physique (Fields *et al.*, 2000 ; Fleurat-Lessard et le Torc'h, 2000 ; Panneton *et al.*, 2000 ; Navarro and Noyes, 2001), ou de la fumigation en tant que mesure corrective.

2. *La gestion des populations de bio-agresseurs par des méthodes respectueuses de la santé du consommateur en privilégiant la prévention et la surveillance (« monitoring ») pour pouvoir évaluer en temps réel le niveau des populations et le comparer au seuil de perte économique.*

Concrètement, le suivi des populations de bio-agresseurs ou des indices précurseurs de détérioration de la qualité, nécessite la mise en œuvre de systèmes de détection précoce à une densité la plus faible possible (1 insecte pour 10 kg de grain, par ex.). Des progrès considérables ont été réalisés au cours des dernières années avec les systèmes de détection acoustique (Figure 5). La technologie actuelle permet de classer les signatures acoustiques des insectes, de reconnaître automatiquement les différents stades actifs (larve ou adulte) et les différents groupes d'insectes à niveau de nuisibilité différent (ravageurs primaires, secondaires ou opportunistes des grains). Dans le cas des insectes volant dans les entrepôts, les pièges à phéromone, par exemple, se sont révélés particulièrement utiles pour la détection des espèces peu ou pas attirées par les pièges à lumière UV (Fleurat-Lessard, 1986).

3. *Le principe d'une assistance par une aide personnalisée à la décision permettant à l'utilisateur d'évaluer les risques encourus et d'optimiser ses itinéraires techniques de stockage en fonction de la qualité finale prévue.*

La gestion des classes de qualité des céréales nécessite une connaissance approfondie des interactions entre les facteurs physiques du milieu (l'écosystème du stock de grain) et les agents de biodétérioration, ainsi que sur l'aptitude au stockage de longue durée des différentes qualités (Panneton *et al.*, 2000). La planification d'itinéraire techniques de conservation pour préserver de façon optimale la qualité des céréales stockés peut maintenant être assistée par des outils d'intelligence artificielle avec l'aide des ordinateurs personnels ou professionnels (Ndiaye *et al.*, 1998).

Intégration des connaissances dans un système informatisé

Une aide informatisée pour la maîtrise opérationnelle de la qualité sanitaire

Les céréales à la récolte ont une qualité intrinsèque d'origine qui ne peut pas être améliorée, mais seulement conservée pendant la période de stockage. Dans le but d'une maîtrise parfaite de la préservation de la qualité des céréales stockées, un système expert à base de connaissance a été élaboré à l'INRA de Bordeaux (Ndiaye, 2001), en grande partie grâce au projet européen « QualiGrain », réalisé entre 1998 et 2001. Celui-ci avait pour objectif majeur la construction d'un système informatisé d'aide à la décision, permettant de transmettre la connaissance des experts au niveau de l'utilisateur (le responsable qualité en OS) (Ndiaye *et al.*, 1997 et 1998 ; Fleurat-Lessard, 2002). La base de données scientifiques et techniques du système, qui a été construite pour la préservation de la qualité totale de l'orge de brasserie, intègre la connaissance des différents experts du domaine, ainsi que des règles de raisonnement logique, des arbres de décision, des modèles de prévision, des données empiriques, etc. La partie "intelligente" du système, le moteur d'inférence, a été conçu pour effectuer un raisonnement logique sur l'évolution de la qualité globale, celle-ci étant construite à partir de l'ensemble des paramètres de la qualité initiale de la céréale.

Vers une modélisation de l'évolution de la qualité dans l'écosystème du grain stocké

L'approche adoptée est celle du raisonnement qualitatif appliqué aux systèmes complexes et évolutifs (Guerrin, 1991 ; Ndiaye *et al.*, 2000). Le système construit (Ndiaye, 2001) est capable de raisonner par inférences logiques sur des règles d'interactions entre les variables en y associant les faits observés par l'utilisateur (recueil des données sur l'état du stock à un moment précis). Le résultat obtenu permet d'aboutir à plusieurs types de sorties par l'intermédiaire d'une interface graphique utilisateur :

- L'identification précise de l'état de qualité du grain à la livraison au silo et son aptitude au stockage de longue durée : détermination de la période de stockage sans risque de détérioration de critères majeurs de qualité ;
- La proposition d'itinéraires techniques de conservation permettant d'allonger la période de stockage sans risque de détérioration : planification des interventions avec échelonnement dans le temps et principaux moyens à attribuer à chaque scénario de conservation optimisé ;
- L'association des faits « de conservation » enregistrés en temps réel et reliés à des indices de biodétérioration : surveillance d'une éventuelle dérive par rapport à l'itinéraire technique choisi ;
- La mise à disposition de l'utilisateur d'une interface pour communiquer avec le système et d'une encyclopédie sur les bonnes pratiques de la conservation (référentiel de qualité correspondant aux attentes de l'utilisateur final).

Un premier système d'aide à la décision (SAD) a été construit pour la maîtrise intégrale de la qualité de l'orge de brasserie (Ndiaye *et al.*, 2000 ; 2002). Toutefois, la conception modulaire originale de chaque partie du SAD permet de modifier assez facilement le contenu des bases de connaissances et de reprogrammer l'interface utilisateur avec de nouveaux critères de qualité (pour le blé panifiable, par exemple). Ce type de conception permet d'envisager d'étendre les possibilités de tels systèmes à la gestion prévisionnelle de l'évolution qualitative de l'écosystème du stock de grain (Ndiaye *et al.*, 2000 et Figure 6).

Résultats des progrès récents

Les systèmes informatisés d'aide à la décision des responsables d'OS sont conçus pour apporter l'expertise jusqu'aux sites de stockage par les moyens modernes de communication (CD-Rom, Internet, entre autres). Les responsables qualité dans les OS devraient y trouver une meilleure garantie de résultat pour la préservation des qualités désirées par les utilisateurs. Les accords contractuels entre les OS et leurs clients pourraient également être facilités par l'utilisation du même référentiel de qualité pour l'ensemble des organismes stockeurs.

Les avantages économiques pour l'utilisateur de disposer de tels systèmes pour le management des lots de grain selon leur qualité et leur aptitude au stockage (à l'abri de tout risque majeur de biodétérioration), sont déjà pleinement exploités en Australie, aux Etats-Unis et au Canada. Il semble que ces mêmes avantages soient encore mal perçus en France et en Europe, alors que leurs performances dans le transfert de savoir-faire aux responsables d'OS sont déjà reconnues par certaines industries de première transformation (malterie et semoulerie industrielle). Par ailleurs, leur utilisation ne pose pas de difficulté technique particulière comme le démontre l'exemple de la Chine qui, sous l'impulsion des services de valorisation de la recherche australiens, a commencé à investir dans ces outils d'intelligence artificielle appliqués au domaine de la préservation des grains stockés sur le long terme (Sun Ling and Zhu Zesheng, 2000).

SUMMARY

Today, the cereal processing industries required a high level of quality for stored grain, especially in sanitary and safety criteria. The demand for identity preserved grain lots by the 1st processing industries is increasing and needs a good traceability of grain batches from the farm to the food product. Additionally, new specifications such as treatment-free grain after harvest are difficult to satisfy with current practices of stored grain management. Consequently, an attempt to bring the quality assurance system "HACCP" up to the grain store level is under study in France.

Within the domain of sanitary and safety issues, the prevention and control of hazards and critical points in stored-grain silos is related to two major principles: i/ The accurate assessment of the risks of insects and moulds development; ii/ The optimal combination of control measures against "deteriorative forces", mainly used in a preventive approach. The implementation of HACCP system at the silo level will be supported by the edition of guides for good hygienic practices (GBPH) in stored grain management.

The integrated pest and mould issues management (PAI) is a major component of a new approach in sanitary and safety insurance of stored grain. Parallel studies performed by the INRA research team at the Stored Product Protection Laboratory have led to the building of a decision support system based on Expert's knowledge. This computerized system is a new tool which should facilitate the transfer of technical and scientific knowledge about grain storage management to the storekeepers. It is

expected higher standards in sanitary and safety quality of cereal delivered to the different cereal processing industries or to export channels.

RESUME

Les industries des céréales sont devenues beaucoup plus exigeantes sur les critères de qualité et sécurité sanitaires, ainsi que sur la déclaration des traitements de préservation des grains stockés. L'usage d'insecticides est devenu impossible pour certaines filières. Ces nouvelles exigences imposent l'application d'une stratégie préventive d'assurance qualité de type HACCP au niveau des organismes stockeurs (OS), assortie d'une traçabilité des lots de grain de la ferme à la première transformation. Pour la qualité hygiénique et sanitaire, cette stratégie de maîtrise des points de danger et des points critiques fait appel à deux principes essentiels : i/ - l'évaluation objective des risques de développement des agents de biodétérioration des stocks et ii/ - la combinaison optimale des moyens d'intervention, de préférence préventifs, pour obtenir le niveau de qualité sanitaire requis par l'utilisateur. Des guides des bonnes pratiques hygiéniques (GBPH) sont en cours de validation pour aider les OS à l'application du système « HACCP ». La protection antiparasitaire intégrée (PAI) est un élément essentiel des stratégies d'assurance de qualité sanitaire du grain stocké. Les recherches menées en parallèle par l'INRA sur un système expert à base de connaissance devraient faciliter cette évolution inéluctable vers la maîtrise de la qualité et de la sécurité sanitaires des céréales pendant toute la période de conservation.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR, 2000 - Norme NF ISO 6322 : Stockage des céréales et des légumineuses – Parties 1 à 3 : Considérations générales ; principales conditions requises ; contrôle de l'attaque par les déprédateurs.*
- ANONYME, 2001 - Contrôle de la qualité des céréales et protéagineux – Guide pratique. Publication ITCF, Paris, 268 pp.*
- ANONYME, 2000 - Guide des bonnes pratiques hygiéniques – Industrie de la semoulerie de blé dur. Les éditions des Journaux officiels, Paris, 166 p.*
- CAHAGNIER B., FLEURAT-LESSARD F., 1996 - Bonnes conditions du grain à l'entreposage et moyens de maîtrise des altérations en cours de stockage. In: Guide des bonnes pratiques du GLCG : stockage à plat des céréales pour une durée indéterminée, GLCG (Ed.), La Rochelle (France), pp. 7-14.*
- CODEX ALIMENTARIUS, 1993 – BID n° 93-394, juin 1993, 56-62.*
- FIELDS P.G., 2000 - Contrôle des insectes en post-récolte : basses températures. In: Vincent, C., Panneton, B., Fleurat-Lessard, F. (Ed.) La lutte physique en Phytoprotection, INRA Editions, Paris, pp. 95-110.*
- FIELDS P.G., KORUNIC Z., FLEURAT-LESSARD F., 2000 - Contrôle des insectes en post-récolte : poudres desséchantes et chocs mécaniques. In: Vincent, C., Panneton, B., Fleurat-*

- Lessard, F. (Ed.) *La lutte physique en Phytoprotection*, INRA Editions, Paris, pp. 265-276.
- FLEURAT-LESSARD F., 1982 - *Les insectes et les acariens*. In: Multon J.L. (Ed.) *Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés*. Lavoisier Tec & Doc, Paris, vol. 1, pp. 394-436.
- FLEURAT-LESSARD F., 1986 - *Utilisation d'un attractif de synthèse pour la surveillance et le piégeage des pyrales Phycitinae dans les locaux de stockage et de conditionnement de denrées alimentaires végétales*. *Agronomie*, 6, 567-573.
- FLEURAT-LESSARD F., 1988 - *La détection des insectes et des acariens dans les grains, les dérivés et les usines ou entrepôts*. *Ind. Céréales*, 54, 22-28.
- FLEURAT-LESSARD F., 2001 - *Devenir des résidus d'insecticide au cours du stockage et à la transformation : des risques à gérer avec précision*. *Ind. Céréales*, 121, 5-17.
- FLEURAT-LESSARD F., 2002 - *Qualitative reasoning and integrated management of the quality of stored grain: a promising new approach*. *J. Stored Prod. Res.*, 38:191-218.
- FLEURAT-LESSARD F., LE TORC'H J.M., 2000 - *Contrôle des insectes en post-récolte : hautes températures et atmosphères inertes*. In: Vincent, C., Panneton, B., Fleurat-Lessard, F. (Ed.) *La lutte physique en Phytoprotection*, INRA Editions, Paris, pp. 71-94.
- GUERRIN F., 1991 - *Qualitative reasoning about an ecological process: interpretation in hydroecology*. *Ecological Modelling*, 59, 165-201.
- ISO, 1997 - *Norme 13690, Céréales, légumineuses et produits de mouture - Echantillonnage des lots statiques*.
- ISO/DIS, 1997 - *Projet de Norme internationale 16002 : Stored cereal grains – A guide to the detection of live invertebrate infestation by trapping, Version 3 - 1997-02-07*.
- ISO/FDIS, 2002 - *Norme expérimentale 6644. Céréales et produits de mouture des céréales en mouvement – Echantillonnage automatique par des moyens mécaniques, Projet de norme internationale, 13 p.*
- JACOBSEN E.E., FLEURAT-LESSARD F., 2002 - *Estimation of safe storage periods for malting barley using a model of heat production based on respiration experiments*. In: Highley E. et al. (Ed.) *Proceedings 8th International Working Conference on Stored Product Protection, York (UK), 22-26 July, 2002 (sous presse)*.
- MULTON J.L., 1982 - *Stockage et conservation des grains et graines et produits dérivés*. Lavoisier Tec & Doc, Paris, 2 vol., 1158 p.
- NAVARRO S., NOYES R. 2001 - *The mechanics and physics of modern grain aeration management*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 647 p.
- NDIAYE A., 2001 - *QualiS: An expert system shell for maintenance of stored grain initial quality*. Copyright 001.290023.00. France, Agence pour la protection des programmes.
- NDIAYE A., NDIAYE S.M., FLEURAT-LESSARD F., 2002 - *QualiGrain expert system for stored grain quality maintenance: planning optimal storage technical routes*. In: Highley E. et al. (Ed.) *Proceedings International Working Conference on Stored Product Protection, York (UK), 22-26 July, 2002 (sous presse)*.
- NDIAYE A., PERON L., FLEURAT-LESSARD F., 1997 - *Diagnosis and grading of grain initial quality*. In: Munack, A. Tantau, H.J. (Ed.), *Proceedings IFAC Conference on Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture, Hannover (Germany)*, pp. 219-224.
- NDIAYE A., PERON L., FLEURAT-LESSARD F., 1998 - *Qualis: preservation of stored grain quality; diagnosis and grading of wheat grain initial quality*. In: *Proceedings Bio-Decision 98: International Conference on engineering of decision support systems in bio-industries, Cemagref-Ensam/INRA, Montpellier, 12 p., CD-Rom*.
- NDIAYE S.M., NDIAYE A., FLEURAT-LESSARD F., 2000 - *Planning and monitoring of stored malting barley quality maintenance*. In: *Proceedings Agricontrol 2000; International Conference on Modelling and control in agriculture, horticulture and post-harvest processing. IFAC, Wageningen University and Research Centre, The Netherlands, July 10-12, 2000, pp. 260-265*.

- PANNETON B., VINCENT C., FLEURAT-LESSARD F., 2000 - *Place de la lutte physique en phytoprotection*. In: Vincent, C., Panneton, B., Fleurat-Lessard, F. (Ed.) *La lutte physique en Phytoprotection*, INRA Editions, Paris, pp. 1-25.
- PELHATE J., 1982 - *Ecologie de la microflore des grains et graines*. In: Multon, J.L. (Ed.) *Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés*. Lavoisier Tec & Doc, Paris, vol. 1, pp. 273-290.
- SUN L., ZHU Z., 2000 - *A graphic-oriented management system for stored grain protection*. In: Jin Zuxun, Liang Quan, Liang Yongsheng, Tan Xianchang, Guan Lianghua (Ed.) *Proceedings 7th International Working Conference on Stored Product Protection, Beijing, October 1998, Sichuan Publ. House Sci. & Technol., Chengdu, P.R. China, Vol. 2, pp. 1884-1893*.
- TIPPLES K.H., 1995 - *Quality and nutritional changes in stored grain*. In: Jayas, D.S., White, N.D.G., Muir, W.E. (Ed.), *Stored grain ecosystems*. M. Dekker Inc. , New York, pp. 325-351.

LEGENDE DES TABLEAUX ET FIGURES

- Tableau 1. Principaux défauts de qualité sanitaire faisant l'objet de pénalités dans les échanges commerciaux des lots de céréales en grain (tiré du manuel de "contrôle de la qualité des céréales et protéagineux – guide pratique", version 2001, ITCF, Paris, 253 p.
- Tableau 2. Principales mycotoxines produites par les moisissures de la flore des grains (flore du champ et flore xérotolérante des stocks) : espèces productrices et limites d'activité d'eau du grain autorisant la croissance des espèces mycotoxinogènes.
- Figure 1. Différentes composantes et critères servant à définir objectivement la qualité d'un lot de blé.
- Figure 2. Points de danger pour les insectes et les résidus de pesticides dans les différentes parties d'un silo de céréales.
- Figure 3. Exemple de logigramme de décision issu de l'approche PAI (voir texte) permettant de choisir une stratégie de stockage sans traitement après récolte (STAR).
- Figure 4. Probabilité statistique de détection de différentes densités d'infestation par les insectes d'un lot de grain en fonction du nombre de prélèvements unitaires réalisés (seuil de confiance : 95 %)
- Figure 5. Sonde acoustique de détection de la présence d'insectes dans une masse de grain stocké et d'identification automatique de l'espèce détectée (document Systelia technologies, Carqueiranne, France).
- Figure 6. Représentation schématique des évolutions qualitatives dans l'écosystème de l'orge de brasserie stockée et des points de contrôle par les moyens préventifs et correctifs permettant d'agir sur la dynamique de l'évolution au cours de la conservation (Ndiaye *et al.*, 2000).

Tableau 1. Principaux défauts de qualité sanitaire faisant l'objet de pénalités dans les échanges commerciaux des lots de céréales en grain (tiré du manuel de "contrôle de la qualité des céréales et protéagineux – guide pratique", version 2001, ITCF, Paris, 253 p.

I. - GRAINS BRISES

Grains inférieurs aux trois quarts du grain sain

II. – IMPURETES CONSTITUEES PAR DES GRAINS

Extraction au tamis de 1.70 mm (sauf pour l'avoine)

Grains d'autres céréales et de plantes cultivées

Grains endommagés par les déprédateurs (rongés, charançonnés, punaisés, dégermés)

Grains de coloration anormale

III. – GRAINS GERMES

IV. – IMPURETES DIVERSES

Graines étrangères et ergot

Grains sans valeur, « avariés », moisiss, fusariés, chauffés, cariés)

Impuretés proprement dites

Balles

Ergot

Grains cariés

Insectes morts et fragments d'insectes

V. – INSECTES ET ACARIENS VIVANTS (déprédateurs vivants)

VI. – RESIDUS DE PESTICIDES

Tableau 2. Principales mycotoxines produites par les moisissures de la flore des grains (flore du champ et flore xérotolérante des stocks) : espèces productrices et limites d'activité d'eau du grain autorisant la croissance des espèces mycotoxinogènes.

Espèces Moisissures	Toxines pouvant être produites	Seuil limite A _w inférieur	Teneur en eau d'équilibre (% s.h.) pour l'orge à la température de :		
			15°C	20°C	25°C
Moisissures du champ					
<i>Alternaria</i> spp.	Acide ténuazonique Alternariol Altertoxines	0.85	19.8	19.6	19.2
<i>Fusarium</i> spp.	Trichothécènes Fumonisines Zéaralénone	0.86	20.1	19.8	19.4
Moisissures du stockage					
<i>Aspergillus flavus</i>	Aflatoxine B1	0.80	18.3	17.8	17.6
<i>A. parasiticus</i>	<i>idem</i>	0.87	20.5	20.2	19.8
<i>A. ochraceus</i>	Ochratoxine A	0.83	19	18.8	18.7
<i>Penicillium viridicatum</i>	<i>idem</i>	0.83	19	18.8	18.7
<i>P. cyclopium</i>	<i>idem</i>	0.87	20.5	20.2	19.8
<i>Aspergillus versicolor</i>	Stérigmatocystine	0.76	17	16.5	16.3
<i>Wallemia sebi</i>	Pas de toxine connue	0.75	16.75	16.45	16.2

Données compilées de plusieurs auteurs, citées par Cahagnier (*documents non publiés*)

Figure 1. Différentes composantes et critères servant à définir objectivement la qualité d'un lot de blé.

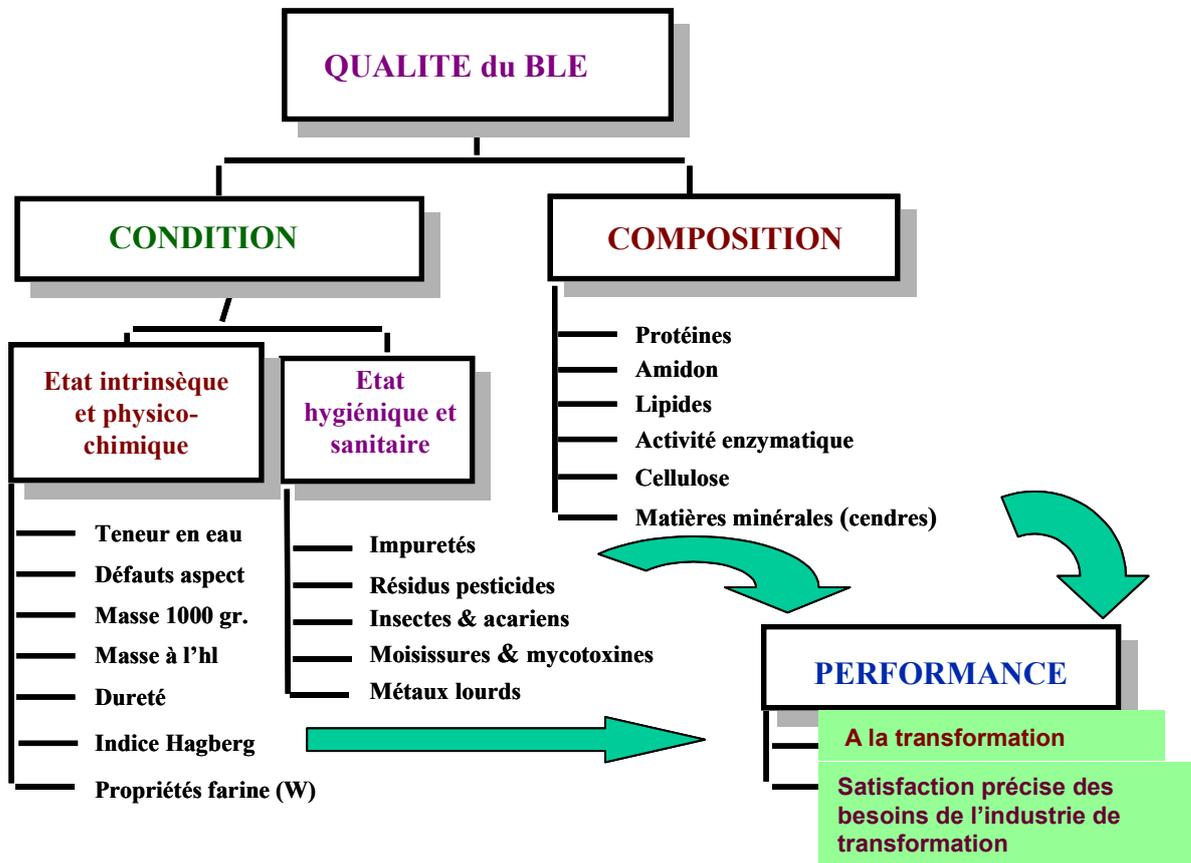
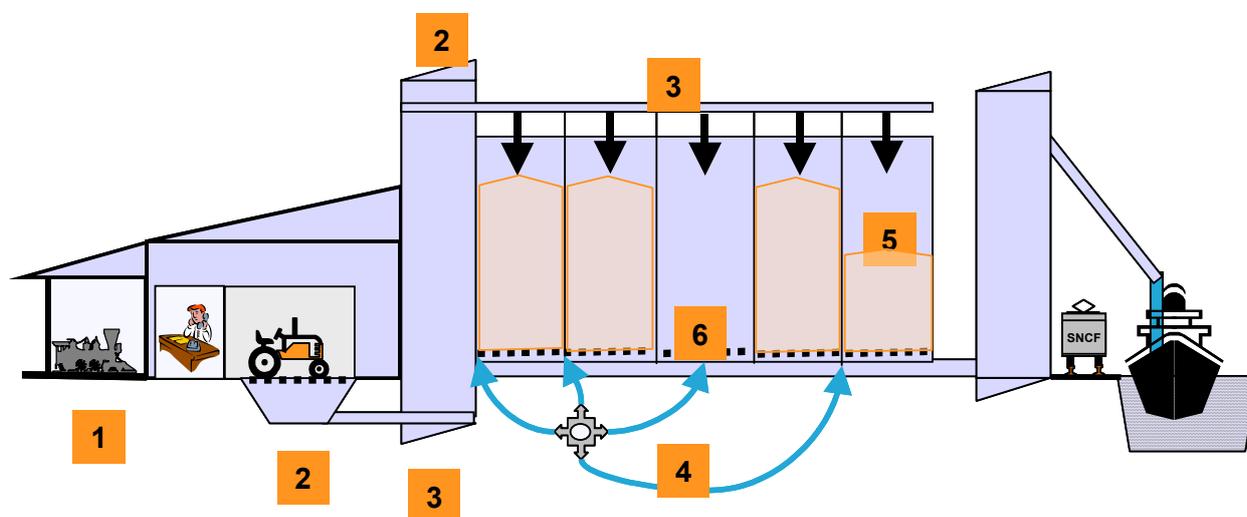


Figure 2. Points de danger pour les insectes et les résidus de pesticides dans les différentes parties d'un silo de céréales.



- 1 - Réception / Agréage
- 2 - Manutention chargement cellules
- 3 - Traitements sur circuit

- 4 - Conservation contrôlée
- 5 - Contrôles avant expédition
- 6 - Maintenance / Sanitation

Figure 3. Exemple de logigramme de décision issu de l'approche PAI (voir texte) permettant de choisir une stratégie de stockage sans traitement après récolte (STAR).

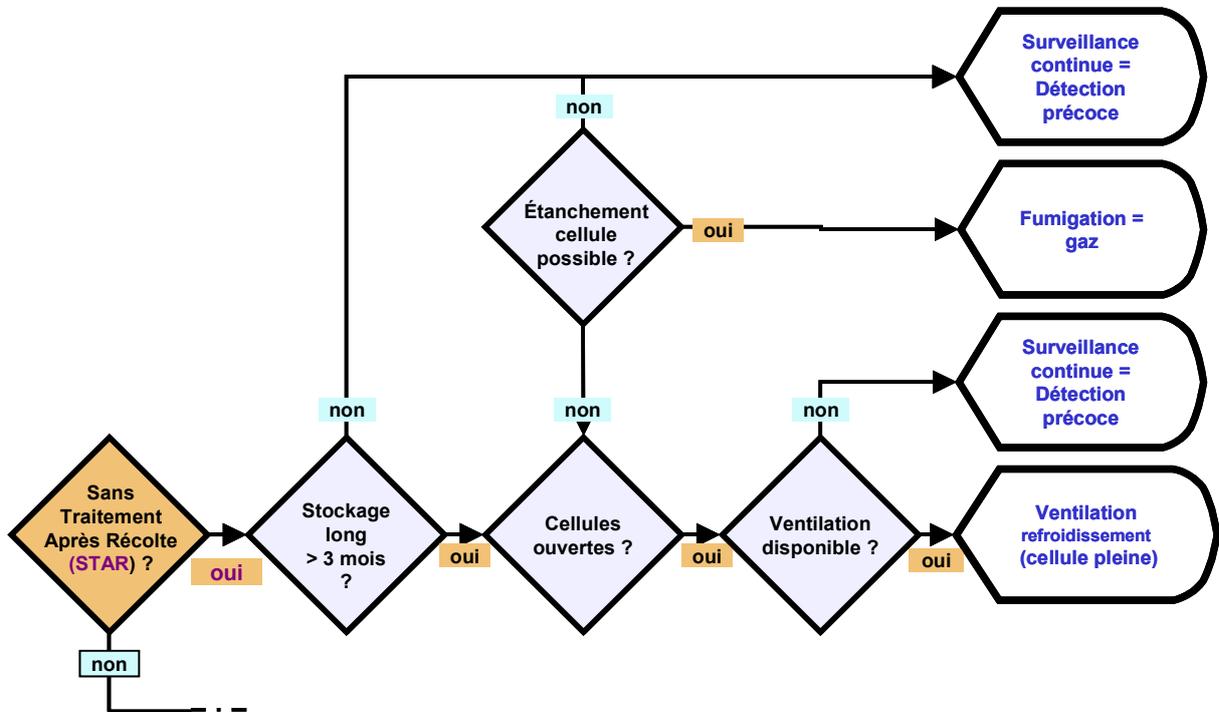


Figure 4. Probabilité statistique de détection de différentes densités d'infestation par les insectes d'un lot de grain en fonction du nombre de prélèvements unitaires réalisés (seuil de confiance : 95 %).

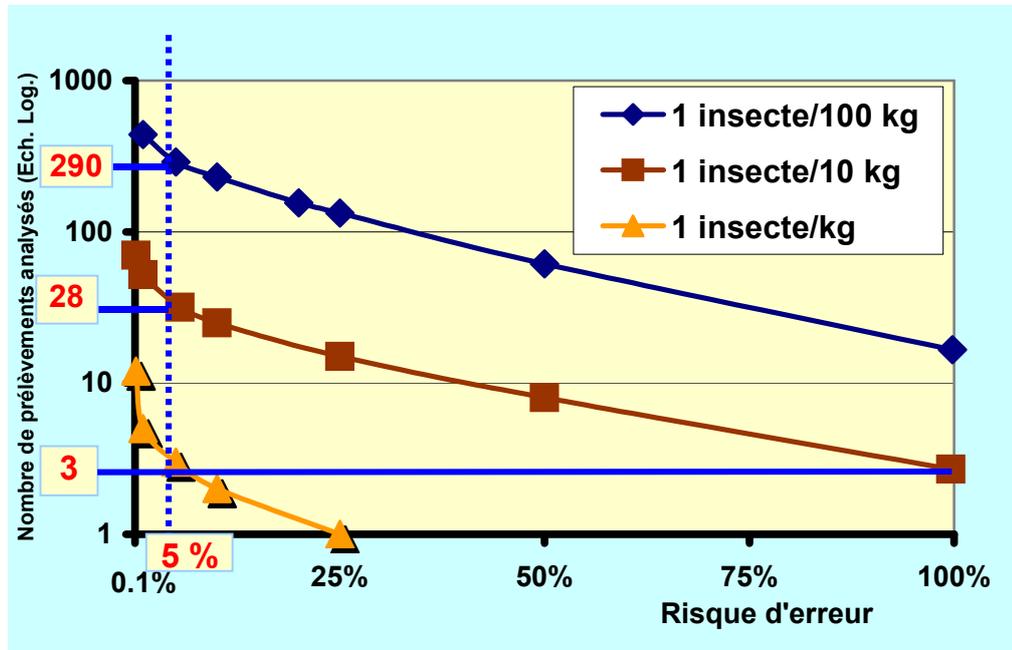
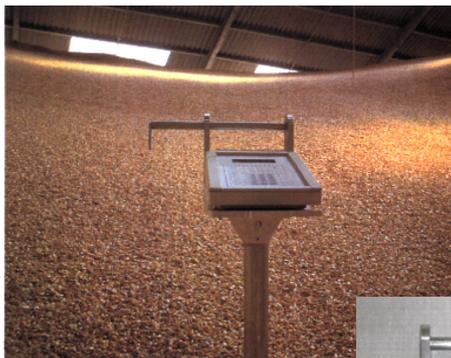


Figure 5. Sonde acoustique de détection de la présence d'insectes dans une masse de grain stocké et d'identification automatique de l'espèce détectée (document Systelia technologies, Carqueiranne, France).

**Modèle semi fixe de surface
(Systelia Technologies)**



**Document Systelia
Technologies
(France)**

**Modèle pour contrôle à réception
à l'organisme stockeur**

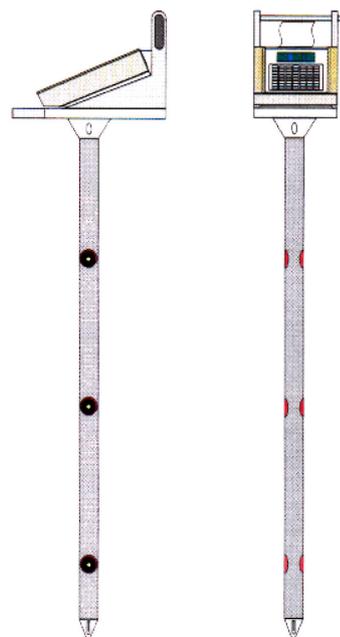


Figure 6. Représentation schématique du management par un système à base de connaissance des évolutions qualitatives dans l'écosystème de l'orge de brasserie stockée et des interventions préventives ou correctives permettant d'agir sur la dynamique de l'évolution de la qualité au cours de la conservation (modifié de Ndiaye *et al.*, 2000).

