

Méthodes de lutte physique dans un itinéraire de stockage sans insecticide : intérêts et limites

K. CRÉPON (1), M. CABACOS (1)

(1) ARVALIS - Institut du végétal, Station expérimentale, 91720 BOIGNEVILLE

k.crepon@arvalis.fr, m.cabacos@arvalis.fr

Méthodes de lutte physique dans un itinéraire de stockage sans insecticide : intérêts et limites

La filière céréalière française s'est donnée pour objectif de réduire significativement l'utilisation d'insecticides en cours de stockage, en accord avec les objectifs des plans Ecophyto et avec les principes de la directive européenne sur l'utilisation durable des pesticides. L'abandon des insecticides de stockage renforce l'intérêt des techniques de lutte physique contre les insectes des grains, dont certaines sont connues depuis très longtemps. On distingue parmi les méthodes de lutte physique celles qui sont avant tout prophylactiques (en créant un environnement défavorable à l'installation et/ou au développement des populations d'insectes), de celles qui sont des méthodes de lutte curative que l'on mettra en œuvre lorsque l'infestation est avérée. Parmi les méthodes prophylactiques, la régulation de la température par la ventilation (par air ambiant ou air réfrigéré) doit être particulièrement bien maîtrisée par les opérateurs car elle constitue le socle d'un itinéraire de stockage. En effet, la température est le principal facteur influençant le taux d'accroissement des populations d'insectes ravageurs des grains. Les méthodes curatives disponibles sont nombreuses : chauffage des grains, dessiccation à l'aide d'une poudre inerte, nettoyage des grains, atmosphères contrôlées, rayonnements ionisants. Leur efficacité est décrite dans le présent article. Si l'utilisation du froid est aujourd'hui largement répandue en France, peu de méthodes de lutte physique curatives sont à ce jour utilisées par les opérateurs. Le principal frein à leur utilisation est leur coût élevé de mise en œuvre, soit en raison de frais d'investissement considérables, soit en raison de frais de fonctionnement élevés. D'autres freins à leur utilisation sont également relevés : difficulté de mise en œuvre, impact sur la qualité des céréales, contraintes réglementaires, acceptabilité sociale.

Physical control methods against stored product pests: benefits and limitations

The French cereal sector has set itself the objective of significantly reducing the use of insecticides during storage, in accordance with the objectives of the Ecophyto plans and the principles of the European directive on the sustainable use of pesticides. The elimination of the use of storage insecticides reinforces the value of physical control techniques against grain insects, some of which have been known for a very long time. Physical control methods can be divided into those that are primarily prophylactic (by creating an unfavourable environment to the establishment and/or the development of insect populations) and those that are curative control methods that will be implemented once the infestation is proven. Among the prophylactic methods, temperature regulation by ventilation (by ambient or refrigerated air) must be particularly well controlled by operators because it forms the basis of a storage route. Indeed, temperature is the main factor influencing the rate of increase in grain insect pest populations. There are many curative methods available: grain heating, desiccation with inert dust, grain cleaning, controlled atmospheres, ionizing radiation. Their effectiveness is described in this article. Although the use of cold is now widespread in France, few curative physical control methods are currently used by operators. The main obstacle to their use is their high implementation cost, either due to high investment costs or high operating costs. Other obstacles to their use are also noted: difficulty of implementation, impact on cereal quality, regulatory constraints, social acceptability.

INTRODUCTION

En France, 1,7 millions de doses unitaires (NODU) sont utilisées chaque année pour lutter contre les insectes au stockage (Dutarte et al., 2014). Ceci résulte d'une stratégie de lutte basée essentiellement sur l'utilisation d'insecticides de contact, y compris à titre préventif (traitement à réception, avant stockage). Les travaux réalisés par FranceAgriMer montrent ainsi que plus de 60% des blés et 30% des maïs sont traités, en ferme ou en organisme-stockeur (OS). La filière céréalière française a cependant affirmé sa volonté de réduire drastiquement l'usage de ces insecticides, s'engageant à réduire d'ici 2022 de moitié la proportion de céréales présentant un résidu d'insecticide (Adda et al., 2017), suivant en cela les principes de la directive 2009/128/CE pour une utilisation durable des pesticides.

Dans ce contexte, les méthodes de lutte physique visant à lutter directement contre les insectes, ou à prévenir les infestations, sont amenées à jouer un rôle déterminant dans les stratégies de lutte contre les insectes durant le stockage des grains. Ces méthodes reposent sur la manipulation de l'environnement physique des insectes, de sorte que la population soit éliminée ou ramenée sous un seuil de nuisibilité économique (Fields, 2006). Bien qu'encore peu pratiquée, la lutte physique est particulièrement adaptée au stockage des grains, l'environnement y étant artificiel et donc partiellement contrôlable. De manière générale, l'efficacité des méthodes physiques repose sur une combinaison de mode d'actions, physiologiques ou comportementales, alors que les modes d'action des méthodes chimiques sont bien ciblés et parfaitement définis (Vincent et al., 2002).

Cette revue se propose de présenter les principales méthodes de lutte physique qui ont été étudiées, en laboratoire ou en conditions réelles, sur les ravageurs des grains stockés. Nous nous attacherons à en détailler l'efficacité sur les populations d'insectes et à comprendre les limites actuelles à leur utilisation.

1. RENDRE L'ENVIRONNEMENT INHOSPITALIER AUX INSECTES

1.1. Les températures basses

L'abaissement de la température par la ventilation des grains est une méthode de prévention largement répandue dans toutes les zones disposant d'un climat tempéré, et connue de longue date (Duhamel du Monceau, 1752). Les insectes sont poikilothermes, aussi la manipulation de la température de leur environnement a une incidence directe sur leur métabolisme et sur le taux d'accroissement des populations (tableau 1). En-deçà de 12°C, les insectes des grains ne se multiplient plus (Fields, 1992). Aussi pour un stockage de longue durée, il conviendra d'atteindre le plus rapidement possible cette température. Sous nos latitudes, une ventilation des grains à l'air ambiant, en profitant des températures nocturnes, permet d'atteindre en moyenne cette température au 15 octobre (26/10 en tenant compte de l'écart-type) pour des débits spécifiques supérieurs à 12m³/h/m³ (Tanguy A., non publié). Si l'on considère une contamination initiale d'1 insecte/tonne, correspondant à la survivance de colonies dans les silos d'une campagne à l'autre (Fleurat-Lessard, 2015), on atteindrait alors à cette date une densité inférieure à 10 insectes par tonne de grain en appliquant le modèle proposé par Driscoll et al. (2000) (fig. 1).

Tableau 1 : Effet de la température sur les insectes (Fields, 2006)

| | T° (°C) | Effets |
|-------------|-----------|--|
| Létale | >62 | Mort en moins d'1 min |
| | 50 à 62 | Mort en moins d'1 h |
| | 45 à 50 | Mort en moins d'1 jour |
| | 35 à 45 | Les populations s'éteignent |
| Suboptimale | 32 à 35 | Ralentissement du développement des populations |
| Optimale | 25 à 32 | Vitesse de développement maximale |
| Suboptimale | 13 à 25 | Ralentissement du développement des populations |
| Létale | 5 à 13 | Mort lente |
| | 1 à 5 | Les mouvements cessent |
| | -10 à -5 | Mort en quelques semaines ou quelques mois (insectes acclimatés) |
| | -25 à -10 | Mort en moins d'1 h |

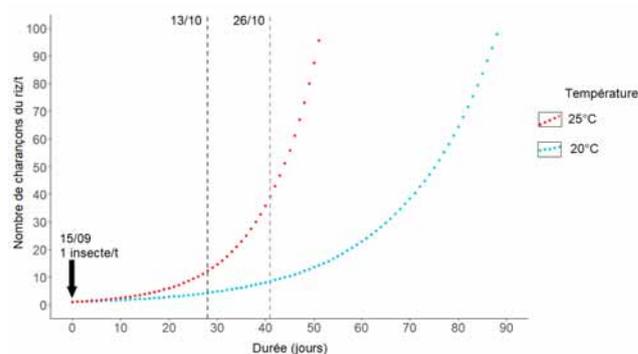


Figure 1 : Evolution de la densité de *S. oryzae* dans un silo selon la température du grain (selon modèle de Driscoll, 2000)

Lorsque les possibilités de refroidissement par l'air ambiant sont insuffisantes, soit parce que le climat n'offre pas suffisamment de froid (cas des régions méditerranéennes ou tropicales), soit parce que les débits spécifiques de ventilation (débits de ventilation rapportés au volume à ventiler) sont tels que la durée de refroidissement nécessaire est considérable (cas de certains silos de très grande hauteur), le recours à une ventilation réfrigérée peut alors s'envisager. Ceci permet de s'affranchir du climat et d'assurer le refroidissement des grains. Il existe peu d'études sur l'opportunité économique d'une ventilation réfrigérée par rapport à une ventilation à l'air ambiant. Rulon et al. (1999) calculent que le coût total net d'une ventilation réfrigérée est de 12,78 US\$/tonne alors que celui d'une conduite classique, basée sur la ventilation et la fumigation est de 6,48 US\$/tonne, le surcoût s'expliquant par le niveau d'investissement élevé nécessaire dans le cas de la ventilation réfrigérée alors que le coût de fonctionnement de la ventilation réfrigérée serait de 12,8% moins élevée que la conduite classique « ventilation + fumigation » en raison des coûts de fonctionnement élevés de la fumigation. Mason et al.

(1997) estiment eux des coûts de fonctionnement de 0,23 US\$/tonne pour une ventilation à air ambiant et 1,1 US\$/tonne pour la ventilation à air réfrigéré. Cependant, si une fumigation s'avère nécessaire sur le lot refroidi par ventilation classique les coûts de fonctionnement deviennent comparables, le coût « ventilation + fumigation » s'élevant alors entre 0,96 US\$/tonne et 1,7 US\$/tonne. Il n'existe pas de données publiées comparant des conduites de ventilation à l'air ambiant ou à l'air réfrigéré conformes aux bonnes pratiques préconisées en France, ce qui ne permet pas d'identifier précisément les situations pour lesquels le choix d'une ventilation réfrigérée s'avère économiquement judicieux, d'autant qu'il faudrait tenir compte de la valorisation des grains espérée et des éventuelles

contraintes du marché visé (réglementaires ou contractuelles).

Le refroidissement des grains par ventilation ne peut être considéré comme un moyen de lutte curative, bien que la mortalité des insectes augmente lorsqu'ils sont exposés pendant une durée suffisamment longue à une température inférieure à 10°C. Bareil et al. (2018) ont montré que la désinsectisation d'un silo (c. à d. la mortalité de plus de 95% des individus présents) ne pouvait être envisagée que pour des durées d'exposition au froid supérieures à trois mois, sauf à descendre le grain à 0°C (tableau 2).

Tableau 2 : durée (en jours) nécessaire pour désinsectiser un silo avec un risque d'erreur (faux positif) <5% (Bareil et al. 2018)

| Espèce | 0° | | 5°C | | 10°C | |
|--|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
| | Adulte | Immature | Adulte | Immature | Adulte | Immature |
| Charançon du grain (<i>S. granarius</i>) | 91 | 59 | 294 | 166 | 383 | 360 |
| Charançon du riz (<i>S. oryzae</i>) | 15 | 27 | 59 | 80 | 272 | 315 |
| Capucin des grains (<i>R. dominica</i>) | 71 | 42 | 101 | 83 | 271 | 146 |
| Silvain dentelé (<i>O. surinamensis</i>) | 91 | 28 | 205 | 42 | 342 | 91 |
| Petit silvain plat (<i>C. ferrugineus</i>) | 163 | 91 | 276 | 167 | 355 | 281 |
| Tribolium roux (<i>T. castaneum</i>) | 22 | 23 | 42 | 42 | 101 | 101 |
| Tribolium sombre (<i>T. confusum</i>) | 28 | 28 | 41 | 41 | 61 | 60 |

1.2. La teneur en eau des grains et l'humidité relative

L'environnement des grains stockés est peu susceptible d'évoluer rapidement, sauf sous l'action d'une décision humaine (ventilation par exemple). En dehors de ces périodes de ventilation - et donc d'échange de chaleur - les grains vont échanger lentement de l'eau avec l'air interstitiel jusqu'à parvenir à une humidité relative d'équilibre qui dépend de la température, de la teneur en eau du gain, de l'espèce voire de la variété stockée (Sun and Woods, 1994). Ainsi, pour un grain à 14% de teneur en eau (TE), l'humidité relative à l'équilibre peut théoriquement évoluer de 60% lors du 1er palier (20°C), à 51% au troisième palier (5°C) (d'après l'équation de Chung-Pfost modifiée). Pour un grain plus sec (12% de TE), l'humidité relative en cours de stockage évoluera entre 46 et 39%.

La sensibilité des insectes à l'humidité relative dépend de chaque espèce. Khan (1983) a étudié la résistance à la dessiccation de plusieurs espèces d'insectes des grains stockés exposés à 25°C à une humidité relative variant de 0 à 100%. Il a ainsi établi que la plage d'humidité relative permettant la survie la plus longue à 25°C allait de 0 à 97% pour le capucin (*R. dominica*), 50 à 97% pour le tribolium brun (*T. confusum*), 50 à 95% pour le silvain (*O. surinamensis*), 60 à 98% pour le tribolium roux (*T. castaneum*), 95 à 100% pour le charançon du grain (*S. granarius*) et le charançon du maïs (*S. zeamais*) qui sont les espèces les plus hygrophiles. Ainsi, en-deçà de 50% d'hygrométrie, à 25°C, la durée de survie de la plupart des insectes des grains diminue significativement sans toutefois devenir impossible. Cette humidité relative correspond théoriquement à une teneur en eau d'environ 12,5% si l'on considère l'équation de Chung-Pfost modifiée. Autrement dit, dans les conditions habituelles de récolte française, mobiliser ce levier de lutte préventive nécessiterait un séchage préalable des grains, ce qui aurait une incidence économique forte car, au-

delà du coût énergétique du séchage, cela représenterait une perte en masse de plus de 2%. Cependant, il faut aussi noter que l'humidité relative a une incidence sur le taux d'accroissement des populations d'insectes présents dans ce grain : pour une même température, le taux d'accroissement de la population est d'autant plus élevé que l'hygrométrie est élevée, dans une plage de 20 à 73% (Driscoll, 2000). En plus d'avoir une efficacité (partielle) sur la mortalité des individus, une faible hygrométrie permet de maîtriser le développement de la population d'insectes en réduisant son taux d'accroissement. Par ailleurs, nous verrons par la suite que différentes méthodes de lutte physique, mettant en jeu la capacité des insectes à réguler leur teneur en eau, seront d'autant plus efficaces que l'humidité relative de l'environnement est faible.

2. LUTTE DIRECTE CONTRE LES INSECTES

2.1. Le chauffage des grains

2.1.1. Effet de la chaleur sur la mortalité des insectes

La sensibilité des insectes des grains à la chaleur est bien documentée (Fields, 1992). A partir de 35°C, les populations décroissent rapidement, faute d'un taux de reproduction suffisant. Les températures sont létales dès 45°C, d'autant plus rapidement que la température est élevée (tableau 1). Au-delà de son intensité, plusieurs facteurs vont influencer l'efficacité du traitement par la chaleur, en particulier l'espèce et le stade de développement de l'insecte. Ainsi, parmi les espèces les plus fréquemment rencontrées dans les grains stockés en France, *Rhyzopertha dominica* et *Cryptolestes ferrugineus* sont considérées comme les plus tolérantes à la chaleur (Dermott et Evans, 1978). Les espèces les moins résistantes sont *Oryzaephilus surinamensis* et *Tribolium confusum*. *Sitophilus oryzae* présente une résistance à la chaleur intermédiaire. Entre les espèces les plus sensibles et les plus résistantes, il existe un

différentiel de température à appliquer de 10°C. Par ailleurs, les formes cachées du *S.oryzae* et de *R.dominica* sont plus résistantes que les adultes. A titre d'exemple, à 14% de teneur en eau, la durée pour tuer 99,9% des jeunes larves de *R. dominica* est 1,5 fois plus élevée à 45°C et 2,5 fois plus élevée à 53°C que pour les autres stades (Beckett et al., 1998).

2.1.2. Le chauffage conventionnel

Le chauffage par convection est utilisé pour lutter contre les insectes des grains, soit en traitement des locaux vides (Tilley et al., 2007), soit en traitement des grains (Beckett et al., 2007). La température à atteindre est de 50°C dans les deux cas. En traitement des locaux, une mortalité totale des populations peut être atteinte dès 2h de traitement avec un chauffage au propane sur des cellules de taille « fermière » (Tilley et al., 2007). En traitement des grains, les travaux ont peu porté sur l'utilisation de séchoirs à colonne, pourtant largement répandus chez les organismes stockeurs français. Bareil et Crépon (2018) ont déterminé l'impact sur la mortalité de trois espèces d'insectes (*Sitophilus Zeamaïs*, *Rhyzopertha dominica*, *Tribolium confusum*) et sur la qualité des grains traités de trois facteurs liés à l'utilisation de séchoirs à colonne : la température d'air usé, le débit spécifique et la durée de traitement. En combinant ces deux derniers facteurs en quantité d'air insufflée (débit spécifique*durée de traitement), ils déterminent des couples permettant de minimiser la perte de teneur en eau tout en assurant une mortalité des insectes supérieure à 99%. (Tableau 3).

Tableau 3 : Quantités d'air minimales à insuffler pour tuer au moins 99% des formes juvéniles des insectes (Q99) et pertes en eau engendrées

| Température (°C) | Q99 (m ³ d'air /m ³ grain) | Perte en eau (%) |
|------------------|--|------------------|
| 50 | 3791 | 3.79 |
| 55 | 960 | 2.10 |
| 60 | 244 | 1.63 |

Si l'efficacité des traitements thermiques et leur faisabilité à l'aide de séchoirs conventionnels sont démontrés, la pratique reste peu répandue chez les opérateurs, principalement en raison du coût énergétique du traitement qui, sans compter la perte de masse liée à la baisse de la teneur en eau, est environ 10 fois plus élevé que la désinsectisation à l'aide d'insecticides de contact (ARVALIS, données non publiées).

2.1.3. Le chauffage par ondes électromagnétiques

Le principe du chauffage par ondes électromagnétiques repose sur le transfert de l'énergie contenue dans une onde en chaleur dans un matériau diélectrique, grâce à la rotation de molécules polaires ou d'ions. Chaque matériau peut ainsi être caractérisé par sa permittivité qui dépend de la polarisabilité des molécules qui le constituent. Selon leur longueur d'onde, les ondes utilisées pour le chauffage sont regroupées sous le terme de « radiofréquences » ou de « micro-ondes » (Tang and Wang, 2007).

Le chauffage diélectrique par radiofréquences (RF) ou microondes (MW) est une solution qui a été explorée d'un point de vue expérimental par de nombreux auteurs (Nelson et al., 1998, Yadav et al., 2014) qui ont montré que ce type de chauffage pouvait être une solution de lutte alternative à la lutte chimique et présentait un avantage théorique par rapport au chauffage conventionnel en exploitant la différence de permittivité entre les graines infestées et l'insecte. Autrement dit, l'insecte chauffe plus vite que la graine, ce qui permet

d'atteindre une température létale tout en préservant la qualité des graines (Fleurat-Lessard, 2001). Toutefois, l'impact sur la qualité des produits après traitement n'a été que peu documenté (Wang and Tang, 2001). De même, la sensibilité de l'insecte aux RF varie selon l'espèce et le stade de développement visés mais les différents auteurs ayant travaillé cette thématique n'ont pas encore trouvé de consensus. En effet, les études montrent le plus souvent que ce sont les stades adultes qui sont les plus sensibles aux RF. En particulier pour les insectes à formes cachées, le grain constitue une enveloppe protectrice atténuant l'intensité parvenant aux individus qui s'y logent (Nelson, 1996). Dans l'étude de Vadivambal et al. (2010), la sensibilité des larves et des adultes de *S. zeamaïs* et *P. interpunctella* étaient similaires alors que dans le cas de *T. castaneum*, la mortalité des larves était significativement plus élevée que celle des adultes pour une exposition équivalente aux MW. Arthur (2006) a émis l'hypothèse d'une sensibilité variable des stades de développement en fonction de la durée d'irradiation, qui pourrait expliquer les conclusions variables selon les études. De plus, la teneur en eau du grain a un effet sur sa permittivité donc il est logique de penser qu'une variation de la teneur en eau du grain impacte l'efficacité du traitement sur l'insecte (Nelson, 1996). Pourtant, les auteurs émettent des conclusions mitigées à ce sujet avec souvent des mortalités non significativement différentes entre les insectes sur des grains de teneurs en eau variables (Tateya et Takano, 1977 ; Vadivambal et al., 2010). A l'inverse, Shayesteh et Barthakur (1996) ont conclu que le taux de survie des insectes augmente lorsque la teneur en eau du grain augmente et par conséquent, que l'eau offrait une protection aux insectes en absorbant une partie des ondes électromagnétiques. Ces questions de recherche restent donc d'intérêt aujourd'hui.

2.2. La dessiccation à l'aide de poudres inertes

Les terres de diatomée agissent sur la régulation des échanges hydriques des insectes. L'abrasion et l'adsorption des corps gras de la cuticule (Korunić, 1998) occasionnées par le contact de l'insecte avec la terre de diatomée favorisent sa déshydratation. Les insectes meurent par dessiccation.

L'efficacité des terres de diatomées, de différentes origines, utilisées comme insecticides des grains stockés est bien documentée. Les mortalités observées diffèrent selon les espèces mais, à des températures comprises entre 22°C et 27°C, et pour des teneurs en eau du grain variant de 11 à 14%, on atteint 87 à 100% de mortalité après 14 jours d'exposition des insectes adultes aux grains traités (fig. 2) (Baldassari & Martini., 2014 ; Chanbang et al., 2007 ; Kavallieros et al., 2005 ; Korunić et al., 1997 ; Ciesla & Guéry, 2014 ; Athanassiou et al., 2005 ; Athanassiou et al., 2006 ; Vahais & Athanassiou, 2004 ; Shayesteh & Ziaee, 2007). Fields et Muir (1995) classent les espèces de la plus à la moins sensibles (lors de traitement sur la masse totale de grain) : *C. ferrugineus*, *O. surinamensis*, *Sitophilus spp.*, *R. dominica* et les Triboliums. Il est établi que le Tribolium brun (*Tribolium confusum*) est l'une des espèces les plus résistantes à la terre de diatomée (Vayas et Athanassiou, 2004). La sensibilité des espèces semble toutefois différer lorsque seule une couche superficielle du grain est traitée plutôt que toute la masse de grain. Les espèces les plus mobiles (*O.Surinamensis* et *C. ferrugineus*) deviennent alors plus résistantes, ce qui peut être contré en traitant une couche plus importante de grains (Allen, 2000). Le traitement d'une couche d'au moins 50 cm d'épaisseur semble nécessaire (Korunić et Macquay, 2000).

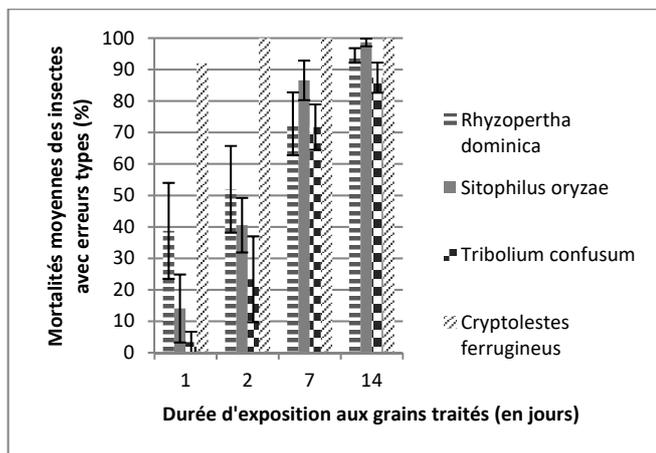


Figure 2 : Mortalités moyennes de 4 espèces de ravageurs des grains exposées à du grain traité à la terre de diatomée d'origine variée

Compte tenu du mode d'action des terres de diatomée, il n'est pas surprenant que pour obtenir la meilleure efficacité insecticide, les grains doivent être relativement secs, la capacité des insectes à contrebalancer leur perte en eau augmentant avec l'hygrométrie de l'environnement. Un seuil de teneur en eau maximal des grains stockés de 14% a été établi pour utiliser la terre de diatomée (Baldassari et Martini, 2014 ; Subramanyam et al., 2000). De même, l'efficacité est positivement corrélée à la température (Ciesla et Guéry, 2014), les températures plus élevées favorisant l'activité des insectes et donc augmentant le contact entre la terre de diatomée et l'insecte.

Appliquée en traitement préventif des grains, la terre de diatomée reste efficace (mortalité des adultes supérieure à 90%) jusqu'à 270 jours après traitement (Athanassiou et al., 2005). La réduction d'émergence constatée sur *R. dominica* est supérieure à 90% (Ferzli et Beris, 2005) voire totale (Kavallieratos et al., 2005) et de 97% sur *S. oryzae* (Athanassiou et al., 2008).

D'autres poudres inertes sont utilisées comme insecticides des grains stockés, bien qu'ayant fait l'objet de moins de travaux : les zéolithes. Ces poudres présentent des efficacités variables selon les origines et les espèces ciblées. Des mortalités quasi-totales (supérieure à 95%) voire totales ont pu être obtenues après 21 jours d'exposition des adultes pour *S. oryzae*, *R. dominica*, *T. castaneum* (Cabacos et al., 2019 ; Kljajić et al., 2010 ; Andrić et al. 2012). Pour certaines zéolithes cependant, l'efficacité s'avère insuffisante notamment sur *T. confusum* (Rumbos et al., 2016). Lorsque les zéolithes utilisées présentent des efficacités satisfaisantes sur adultes, elles réduisent aussi significativement les émergences, de 71 à 98,8% pour *T. castaneum*, 61 à 95,5% pour *S. oryzae* et 76,3 à 96,1% pour *R. dominica* (Cabacos et al., 2019 ; Kljajić et al., 2010 ; Andrić et al. 2012).

Les poudres inertes ont également montré leur intérêt en traitement des locaux vides. Après 14 jours de contact avec de la terre de diatomée, à 15,4°C et 73% d'hygrométrie, on atteint une mortalité de 65,4% de *C. ferrugineus*, 94,2% de *T. castaneum* (Schöller et Reichmuth, 2010). À 22°C et 66% d'hygrométrie, la mortalité de *R. dominica* et *T. castaneum* est totale au bout de 7 jours (Ziaee et al., 2007). A 16°C et 62% d'hygrométrie, nous avons observé une mortalité totale de *S. granarius* et *R. dominica* exposés pendant 14 jours à de la terre de diatomée (Siliosec®) ou du bicarbonate de sodium contenant

de la silice synthétique amorphe (PROCROP™ S). A 23°C et 57% d'hygrométrie, il ne nous a fallu que 7 jours pour atteindre 100% de mortalité de *S. oryzae* et *R. dominica* exposés à la terre de diatomée (Siliosec®) ou à de la chabazite (famille des zéolithes) (Forcegrain MN). On constate à nouveau que l'efficacité des poudres inertes est d'autant plus forte que la température est élevée et l'hygrométrie faible.

Les principales contraintes à l'utilisation de ces poudres inertes sont les modalités d'application, notamment en traitement des grains (dose à appliquer, méthode d'application, émission de poussière), et leur impact sur le poids spécifique des céréales traitées, celui-ci perdant 3 à 5% après traitement à la chabazite (Cabacos et al. 2019 ; Bodroža-Solarov et al., 2012) et jusqu'à 6kg/hl après traitement à la terre de diatomée (Fields, 1998) bien que cet impact soit variable en fonction de l'origine de la terre de diatomée. Cependant, les qualités technologiques du blé, de l'orge de brasserie ou du blé dur ne seraient pas impactées par le traitement de ces grains avec de la terre de diatomée (Korunić et al., 1996) ou de la zéolithe (Bodroža-Solarov et al., 2011).

2.3. Le nettoyage des grains

2.3.1. Elimination des insectes par nettoyage des grains

Près de 60% des organismes stockeurs français disposent d'un dispositif de nettoyage des grains (Mortas et al, 2008). Si le nettoyage est d'abord pratiqué pour des raisons commerciales (remises aux normes des lots), Armitage (1994) a montré que l'utilisation d'un nettoyeur de type cribleur permettait de supprimer d'un lot de blé infesté 98% des adultes de *O. surinamensis* et *C. ferrugineus* et 100% des formes larvaires de ces deux espèces, dont le cycle se déroule entièrement à l'extérieur du grain. L'utilisation d'un nettoyeur-séparateur, combinant un criblage et une aspiration, permet de retirer la totalité des adultes de *C. ferrugineus*, quelle que soit l'infestation de départ, et d'*O. surinamensis*, à l'exception des lots les plus contaminés (200 adultes/kg) pour lesquels seuls 7 lots sur 10 ont été totalement désinsectés. Pour l'essentiel, les insectes se trouvent dans la fraction aspirée, mais près de 10% sont retirés par le criblage et se trouvent ensuite dans la fraction des petits grains. Selon les grilles utilisées, la perte de matière engendrée par le nettoyage représente 2 à 6% de la masse de grain nettoyée (Armitage et al., 1996).

2.3.2. Perturbations mécaniques et mortalité des insectes

Des perturbations mécaniques modérées (chute de grain ou transilage), appliquées de manière régulière à des lots de grains, sont de nature à réduire significativement les émergences de *S. zeamais* ou *S. granarius* (Joffe et Clarke, 1963 ; Bayley, 1969 ; Bern et al., 2016), les stades les plus sensibles à ces stress mécaniques étant le 4^{ème} stade larvaire et le stade nymphal. Bailey (1969) obtient une réduction d'émergence de 73% de *S. granarius* à partir d'une chute de 1,73 m répétée deux fois par semaine pendant 8 semaines, et une réduction d'émergence de 23% pour une hauteur de chute de 22,9 cm, également répétée deux fois par semaine. Fréquence et hauteur de chute ont un effet additif : plus le choc est fréquent, moins il a besoin d'être important pour atteindre une efficacité totale sur la réduction d'émergence (Bailey, 1969). Ainsi une chute quotidienne de 3m durant 7 jours permet d'atteindre 100% de mortalité, au même titre que 8 chutes successives par jour de 86 cm durant la même période. Une mortalité des formes adultes de *Cryptolestes ferrugineus*, *S. oryzae* et *S. granarius* suite à des chutes de grains de 14 m, appliquées entre 1 à 7 fois consécutivement est

également démontrée par Loschiavo (1978), celle-ci pouvant atteindre 96% pour les charançons après 7 chutes consécutives. Des résultats concordants ont été obtenus sur *T. castaneum* et *R. dominica* (White et al., 1997 ; Beckett, 2010), avec des perturbations mécaniques d'autres natures, telles que manutention par vis ou transporteur pneumatique, confirmant l'intérêt des perturbations mécaniques modérées comme moyen de contrôle des populations d'insectes ravageurs des grains, en agissant sur la mortalité des adultes et la réduction d'émergence des formes larvaires (Suleiman, 2016 ; Bern et al., 2016). Les perturbations étudiées n'entraînent pas de baisse de la faculté germinative et provoquent une augmentation légère du taux de grains endommagés (damaged kernel) (0,4 à 1 point) (Loschiavo, 1978).

2.3.3. Intégration du nettoyage dans un itinéraire de lutte contre les insectes primaires

Lors d'un nettoyage de grains, une succession de chocs mécaniques modérés sont appliqués : chute de grains, manutention, vibration sur les grilles de criblage. Par ailleurs, le nettoyage permet l'élimination de toutes les formes adultes (Armitage et al., 1996). Bareil (2018) a mesuré l'intérêt d'un nettoyeur-séparateur comme outil de maîtrise des infestations de *S. oryzae* et *R. dominica* dans du blé tendre sur les formes adultes (suppression par criblage) et sur les formes cachées (réduction d'émergence). Une élimination complète des adultes a pu être obtenue après un seul nettoyage, moyennant une perte en issues de $1,9 \pm 0,64\%$. L'aspiration joue un rôle majeur dans l'efficacité du nettoyage. Une réduction d'émergence de $67 \pm 15\%$ a été observée pour *S. oryzae*. Concernant *R. dominica*, la réduction d'émergence varie de 2% à 90% en fonction de la densité d'infestation initiale : plus le blé est infesté, plus la réduction d'émergence est forte. Cabacos et al. (2019) ont testé l'intérêt d'effectuer des nettoyages à intervalle régulier (une fois toutes les deux semaines, une, deux ou trois fois par semaine) pendant 8 semaines sur un lot préalablement infesté de *S. oryzae*. Ils démontrent ainsi qu'un nettoyage réalisé deux à trois fois par semaine permet une réduction d'émergence de 96,8 à 99,8% (fig. 3).

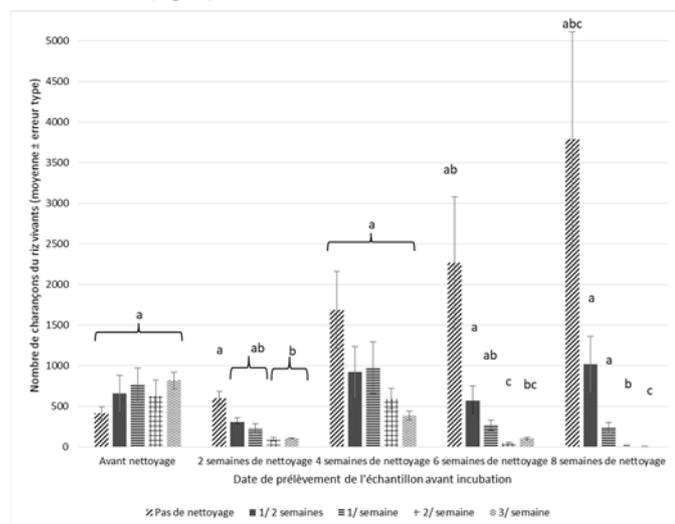


Figure 3 : Emergence moyenne de *S. oryzae* vivants selon la fréquence de nettoyage du blé appliquée (Cabacos et al. 2019)

Le nettoyage des grains peut donc être intégré à un itinéraire de lutte contre les insectes non seulement comme moyen de prévention des infestations (suppression des brisures, amélioration de la ventilation) mais aussi comme moyen de lutte curative, tant pour les espèces secondaires que pour les

ravageurs primaires. Le coût inhérent au nettoyage peut se révéler prohibitif car les issues, qui concentrent tous les adultes, perdent une grande part de leur valeur marchande. Par ailleurs, le nombre minimal de nettoyages nécessaires pour supprimer le risque d'infestation du lot par les ravageurs primaires doit être affiné, notamment lorsque le nettoyage est associé à un autre type de lutte, comme par exemple le froid.

2.4. Les atmosphères contrôlées

Les mécanismes métaboliques expliquant l'efficacité des traitements par atmosphères appauvries en O_2 ou enrichies en CO_2 sont encore mal connus et malgré le grand nombre de travaux publiés à ce sujet, il est encore difficile de déterminer l'atmosphère optimale pour maîtriser une population d'insectes dans des conditions techniquement et économiquement acceptable (Conyers et Bell, 2006). Deux mécanismes sont à l'œuvre pour expliquer la mortalité des insectes : l'anoxie (privation d' O_2) et l'hypercapnie (excès de CO_2). Il semble toutefois que dans les deux cas, la mortalité soit le fait d'une altération du métabolisme des insectes et d'une dessiccation, les spiracles des insectes restant ouverts et ne régulant plus les pertes en eau (Navarro, 1978 ; Jayas et Jeyamkondan, 2002, Fleurat-Lessard, 1990).

Une anoxie simple peut être obtenue en enrichissant l'atmosphère en N_2 . La concentration limite en O_2 à atteindre pour parvenir à une mortalité des insectes dépend de plusieurs facteurs biotiques (espèce, stade) ou abiotiques (température, humidité relative). De manière générale, la mortalité est d'autant plus rapide que la concentration en O_2 est faible, la température élevée et l'humidité relative basse (Jayas et Jeyamkondan, 2002 ; Navarro et Calderon, 1980). Beaucoup de travaux ont été réalisés sur des grains dont la teneur en eau ne dépassait pas 13%, mais, dans les conditions usuelles de stockage en France, c'est-à-dire à une humidité relative d'environ 70%, on atteint 95% de mortalité des formes adultes de *Tribolium castaneum* avec une concentration en $O_2 < 1\%$ (Navarro S, 1978). L'utilisation dans un silo hermétique d'une atmosphère contenant moins de 1% d' O_2 et plus de 99% d' N_2 a montré qu'il fallait près de 9 jours d'exposition à 22°C et à une humidité relative >70% pour atteindre 100% de mortalité de *Sitophilus granarius*, *Tribolium castaneum* et *Tribolium confusum* (Shejbal et al., 1973). Enfin, Navarro (1978) a montré que la sensibilité de *S. oryzae* à une faible concentration en O_2 était maximale pour une concentration de 1%.

Une mortalité supérieure à 95% peut être obtenue avec une atmosphère enrichie en CO_2 dès une concentration de 20%. A cette teneur, et pour une température comprise entre 20 et 29°C, il faut une durée d'exposition supérieure à 14 jours pour atteindre 95% de mortalité pour toutes les formes (à l'exception de *R. dominica* pour lequel 7 jours suffisent) (Banks et Annis, 1990). Il faut dépasser 60% de CO_2 dans l'atmosphère pour réduire significativement la durée d'exposition nécessaire pour atteindre 95% de mortalité (moins de 7 jours). Les formes larvaires sont en général plus résistantes aux atmosphères enrichies en CO_2 , mais il existe des variations entre espèces, notamment quant au stade le plus résistant : larve pour le *T. castaneum*, nymphe pour *S. oryzae*. Il a par ailleurs été démontré qu'un enrichissement modéré en CO_2 (5 à 30%) d'une atmosphère appauvrie en O_2 (2, 4, 6 ou 8%) présentait un effet synergique sur la mortalité des formes adultes de *R. dominica* et *T. castaneum* (Calderon et Navarro, 1980).

Une autre approche consiste à viser la réduction des émergences plutôt que la mort des insectes adultes. Pour des

concentrations en O₂ entre 3% et 4%, à des humidités relatives supérieures à 75%, les mortalités observées après 28 jours d'exposition sur *O. surinamensis*, *S. granarius*, *S. oryzae* et *T. castaneum* sont faibles à 20°C et variables selon l'espèce (0,3% pour *O. Surinamensis* à 4% d'O₂, 9,8% pour *S. oryzae* à 3% d'O₂) mais la réduction d'émergence dépasse 99%. A 25°C, la mortalité des adultes est améliorée (18,4% pour *O. surinamensis* à 4% d'O₂, 84,8% pour *S. oryzae* à 3% d'O₂) (Conyers et Bell, 2007). Conyers et al. (2007) montrent aussi qu'une atmosphère contenant 5% d'O₂ et 20% de CO₂ permet, après 28 jours d'exposition à 20°C et toujours à une humidité relative supérieure à 75%, de réduire de plus de 95% et 100% respectivement l'émergence de *C. ferrugineus* et *S. granarius*.

Autrement dit, pour des blés présentant des teneurs en eau entre 14% et 15%, une concentration en O₂ de 1% devra être atteinte si l'on vise la mortalité de toutes les formes d'insectes, mais une concentration supérieure, entre 3 ou 4% d'O₂, permettra de contrôler le développement de la population en limitant drastiquement les émergences. Lorsque la teneur en CO₂ est accrue à 20%, une teneur en O₂ de 5% peut suffire à empêcher les émergences. Cette stratégie de protection peut être appliquée lorsque la température du grain ne permet pas le contrôle des populations d'insectes. Elle pourrait donc venir en complément d'une lutte prophylactique par la ventilation à l'air ambiant.

L'utilisation d'atmosphère modifiée sur les sites de stockage n'est cependant pas chose aisée, notamment pour les stockages de grande taille. En effet, l'utilisation d'une atmosphère modifiée requiert des silos suffisamment étanches pour maintenir la pression recherchée en N₂ ou CO₂, tout en autorisant les échanges avec l'extérieur pour gérer une éventuelle surpression liée aux élévations de températures. Banks et Annis (1980) considèrent qu'une structure, entre 300 et 10 000 tonnes, est suffisamment étanche lorsqu'après injection d'un gaz en surpression, le délai pour passer d'une surpression de 2 500 à 1 500 Pa, de 1 500 à 750 Pa ou de 500 à 250 Pa, est d'au moins 5 minutes. En cas d'utilisation d'atmosphère enrichie en CO₂, et sous réserve que l'étanchéité soit suffisante, une seule injection est envisageable pour un traitement mais il faut cependant prévoir une recirculation du bas vers le haut afin de maintenir l'ensemble du volume à une concentration de CO₂ telle que l'efficacité sur les insectes puisse être garantie. En cas d'utilisation d'une atmosphère à teneur réduite en O₂ par purge de N₂, une injection régulière de N₂ doit être effectuée pour maintenir la teneur en O₂ en deçà de 1% (Banks et Annis, 1980). Les coûts d'étanchéification d'un stockage plat de plus de 15 000 tonnes ont été évalués en 1980 entre 2 et 5 A\$/tonne (soit 8 à 20 A\$/tonne en prix constant) et dépassent 10 A\$/tonne (soit 40 A\$/tonne en prix constant) pour une cellule béton de 2000 tonnes.

Le traitement de volume plus modeste, en big-bag ou container, est plus simple. L'efficacité de traitement en big-bag dans lequel a été injecté du CO₂ a été démontrée par Pons et al. (2010) : la teneur en CO₂ a décliné en 21 ou 48 jours de traitement de 100% à respectivement 59% et 45%. Aucune émergence de *S. oryzae* n'a été constatée. Des solutions de ce type sont proposées sur le marché français, le coût du traitement est évalué entre 20 et 25€/tonne, sous réserve de réutiliser les big-bags au maximum de leur possibilité.

2.5. Les rayonnements ionisants

L'étude du potentiel de décontamination (on entend par là désinfection ou désinsectisation) des rayonnements ionisants a

débuté aux USA dans les années 50. La première autorisation de traitement accordée par la Food and Drug Administration, en 1963, concernait le blé et la farine pour en éliminer les insectes (Lévy, 2010). Les rayonnements ionisants sont de trois natures : rayons gamma, rayons X ou faisceau d'électrons. Tous ont le même mode d'action sur les organismes : les radiations affectent les cellules en cours de division, ce qui, chez les insectes adultes, concernent essentiellement les gonades et le tube digestif (Hallman, 2013). Le traitement induit donc un arrêt de la reproduction et de l'alimentation. La résistance des insectes aux irradiations est extrêmement variable, les coléoptères les plus résistants sont ainsi 6 à 7 fois plus résistants que les espèces les plus sensibles et les lépidoptères sont plus résistants que les coléoptères. Parmi les espèces spécifiques des grains stockés, on notera donc que les *Sitophilus* font partie des espèces les plus sensibles, *O. surinamensis* présente une résistance modérée, alors que *P. interpunctella* serait particulièrement résistante. De manière générale, les femelles semblent plus sensibles que les mâles aux irradiations (Tilton, 1974). La dose retenue pour traiter un lot de grains infesté par plusieurs espèces est de 0,5 kGy (Tilton, 1974). Cette dose permet le contrôle des coléoptères les plus résistants et des stades immatures des lépidoptères. Certains lépidoptères adultes restent fertiles, mais leur descendance sera stérile en raison de dommages génétiques héréditaires. Cependant, la présence d'insectes vivants après traitement reste un frein à la commercialisation des céréales, même si le traitement contrôle parfaitement l'infestation en supprimant toute émergence (Tilton, 1974).

Les traitements par rayonnement ionisant sont susceptibles de conduire à la formation de substances chimiques néoformées (telles que furanes, peroxydes, hydrocarbures...), néanmoins dans les mêmes proportions que lors d'un traitement thermique classique (EFSA, 2011). La dose maximale autorisée dans l'Union Européenne est de 10 KGy conformément aux recommandations de l'OMS (1981) et un produit traité par ionisation doit être étiqueté. Le traitement des céréales brutes n'est pas autorisé en France (arrêté du 20/08/2002).

Bien qu'autorisé depuis des décennies dans plusieurs pays (USA, Canada, Chine, Belgique, Pays-Bas, République Tchèque, Algérie, Russie, Ukraine), le traitement par ionisation des céréales est peu pratiqué à l'échelle industrielle, en raison notamment d'un coût d'investissement élevé (Tilton, 1974 ; Lévy, 2010). La seule expérience durable de traitement par rayonnements ionisants des céréales a été faite en Ukraine, sur le port d'Odessa, entre 1980 et 2007, pour des céréales destinées à l'exportation vers l'URSS (jusqu'à 400 000 tonnes par an) (Hallman, 2013).

Au-delà du coût du traitement, une contrainte forte à l'utilisation de ce type de traitement est l'image négative qu'il véhicule auprès des consommateurs (Phillips, 2006), bien qu'a priori sans fondement (OMS, 1981).

CONCLUSION

Les méthodes de lutte physique disponibles pour le stockage des grains sont nombreuses, et pour certaines connues depuis fort longtemps. Parmi ces méthodes de lutte cependant, seule l'utilisation du froid, et tout particulièrement le refroidissement à l'air ambiant, est aujourd'hui largement utilisée par les opérateurs du stockage en France. L'enjeu pour les opérateurs est aujourd'hui plus d'optimiser le pilotage de la ventilation (utilisation de thermostat pour limiter les heures de

fonctionnement inutile, exploitation de toutes les heures de froid disponibles, utilisation d'un groupe froid lorsque cela s'avère nécessaire) pour atteindre une température inférieure à 10°C, que d'augmenter sa pratique (plus de 90% des organismes stockeurs ventilent les grains). S'agissant d'une méthode essentiellement prophylactique, elle doit cependant pouvoir être, si nécessaire, complétée par une méthode curative. Or force est de constater que parmi les méthodes de lutte curative disponibles, peu ont trouvé leur place actuellement dans les itinéraires de stockage mis en œuvre. Pour beaucoup, le coût de mise en œuvre de ces techniques est le principal frein à leur utilisation, soit en raison du coût à l'investissement (rayonnements ionisants, traitement par ondes électromagnétiques), soit en raison du coût en fonctionnement. Le coût d'une lutte physique est en effet estimé, pour l'ensemble des méthodes présentées ci-dessus entre 15 et 25 €/tonne. A titre de comparaison, le coût d'un traitement insecticide est en général inférieur à 1€/tonne (Vancrayens et al., 2014 ; Phillips et al., 2002). Même en considérant qu'une plus faible proportion de grains stockés sera traitée (en raison d'un traitement uniquement curatif, et en misant sur une amélioration des pratiques prophylactiques) la mise en œuvre d'une lutte physique reste un surcoût considérable pour les organismes stockeurs.

Ceci a deux conséquences :

1. Pour limiter le surcoût lié à la mise en œuvre d'une lutte physique curative, il faut limiter leur utilisation aux situations où le risque économique lié à la présence d'insectes le justifie réellement. Ceci implique une surveillance de la présence d'insectes dans le grain stocké permettant une détection précoce des infestations, une meilleure connaissance des

insectes par les chefs de silo (reconnaissance des espèces, conditions de développement, risque engendré pour le grain) et une meilleure appréciation du risque tenant compte des conditions d'environnement (température et hygrométrie) qui ont une incidence directe sur le taux d'accroissement des populations, une prise en compte de la durée de stockage prévue à mettre en relation avec une durée de stockage sans risque. Cette analyse serait facilitée si des seuils de nuisibilité économique étaient reconnus par les opérateurs de la filière française, comme c'est le cas aux USA par exemple, où ce seuil a été défini pour le blé non transformé à 2 adultes par kg (Hagstrum et Flinn, 2014 ; USDA, 2007).

2. Puisque sur le plan économique, aucune méthode ne se distingue vraiment des autres (hormis celles nécessitant un investissement important). C'est donc sur d'autres considérations que s'effectuera le choix des opérateurs. Parmi celles-ci, on peut citer : la facilité de mise en œuvre, l'absence d'impact sur la qualité du grain, la durée de traitement et d'immobilisation du stock nécessaire, la rémanence du traitement, le risque pour l'opérateur, les contraintes réglementaires, l'acceptabilité sociale et enfin, l'impact environnemental car les méthodes de lutte physique peuvent être coûteuses en énergie et/ou nécessiter l'utilisation de gaz à effet de serre.

Enfin, si la lutte physique offre de nombreuses alternatives à la lutte chimique conventionnelle, il convient de rappeler qu'il existe d'autres méthodes alternatives d'intérêt, telle que la lutte biologique, ou l'utilisation de bio-pesticides dont on peut imaginer l'utilisation en combinaison avec une lutte physique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adda C., Barrier-Guillot B. et Le Boudec S., 2017. Plan de transformation filière céréales, Intercéréales, décembre 2017.
- Allen S., 2000. Integration of inert dust into control of storage pests in bulk grain in storage in Australia. Proc. Int. Conf. Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, Fresno, CA. 29 Oct. - 3 Nov. 2000, 279-284.
- Andrić G., Marković M., Adamović M., Daković A., Golić M.P., Kljajić P.J., 2012. Insecticidal potential of natural zeolite and diatomaceous earth formulations against rice weevil (Coleoptera : Curculionidae) and red flour beetle (Coleoptera : Tenebrionidae). Journal of Economic Entomology, 105, 670-678.
- Armitage D.M., 1994. Some effects of grain cleaning on mites, insects and fungi. In : Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-product protection, vol. 2, 896-901.
- Armitage D.M., Cook D.A., Duckett C., 1996. The use of an aspirated sieve to remove insects, mites and pesticides from grain. Crop Protection, vol. 15, No. 8, 675-680.
- Armitage D.M., Cook D.A., Duckett C., 1996. The use of an aspirated sieve to remove insects, mites and pesticides from grain. Crop Protection Vol. 15, no 8, 675-680.
- Athanassiou C.G., Kavallieratos N.G., Economou L.P., Dimizas C.B., Vayias B.J., Tomanović S., Milutinović M., 2005. Persistence and Efficacy of Three Diatomaceous Earth Formulations Against *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) on Wheat and Barley. Journal of Economic Entomology, 98 (4), 1404-1412.
- Athanassiou C.G., Kavallieratos N.G., Dimizas C.B., Vayias B.J., Tomanović Ž., 2006. Factors affecting the insecticidal efficacy of the diatomaceous earth formulation SilicoSec against adults of the rice weevil, *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae). Applied Entomology and Zoology, 41 (2), 201-207.
- Athanassiou C.G., Vayias B.J., Dimizas C.B., Kavallieratos N.G., Papagregoriou A.S., Buchelos C.T., 2005. Insecticidal efficacy of diatomaceous earth against *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera : Curculionidae) and *Tribolium confusum* du Val (Coleoptera : Tenebrionidae) on stored wheat : influence of dose rate, temperature and exposure interval. Journal of Stored Products Research, 41, 47-55.
- Bailey S.W., 1969. The effects of physical stress in the grain weevil *Sitophilus granarius*. Journal of Stored Products Research 5 (1969), 311-324.
- Bailey, S.N. and Banks, H.J. 1975. The use of controlled atmospheres for the storage of grain. Proc. 1st Internat. Working Conf. Stored-prod. Entomol., Savannah, GA. USA. (1974), 362-374.
- Baldassari N., Martini A., 2014. The efficacy of two diatomaceous earths on the mortality of *Rhyzopertha dominica* and *Sitophilus oryzae*. Bulletin of Insectology, 67 (1), 51-55.
- Banks H.J., Annis P.P., 1980. Conversion of existing grain storage structures for modified atmosphere use. In : Shejbal L. (Eds) Controlled atmosphere storage of grains. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Bareil N., 2018. Grain cleaning as a management tool to control internal feeding pests. In Integrated Protection of Stored Products, IOBC-WPRS Bulletin Vol. 130, 2018, 6-12
- Bareil N., Crépon K., 2018. Désinsectisation du blé tendre à l'aide d'un séchoir à céréales : évaluation de l'efficacité du traitement selon la quantité d'air insufflée. In : Phloème - les Biennales de l'innovation céréalière, 24-25 janvier 2018, Paris, Ed. ARVALIS.
- Beckett S.J., 2010. Protecting and disinfesting stored products by drying and cooling, and disinfesting stored products during handling by mechanical

- treatments. In Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection, 27 June to 2 July 2010, Estoril, Portugal. Julius Kühn-Institut, Berlin, Germany.
- Beckett S.J., Fields P., Subramanyam B., 2007. Disinfestation of Stored Products and Associated Structures Using Heat. In : Tang J., Mitcham E., Wang S. and Lurie S. (Eds) Heat treatments for postharvest control : theory and practice, Oxon, CAB International, 182-237
 - Beckett S.J., Morton R., Darby J.A., 1998. The mortality of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae) and *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) at moderate temperatures. *Journal of Stored Products Research* 34 (1998), 363-376.
 - Bern C.J., Bbosa D., Brumm T.J., Rosentrater K.A., Raman D.R., 2016. Controlling weevils in maize by means of physical disturbance. In: Proceedings of the International Conference on Agricultural and Food Engineering, 23-25 August 2016.
 - Bern C.J., Bbosa D., Brumm T.J., Rosentrater K.A., Raman D.R., In : Proceedings of the 3rd International Conference on Agricultural and Food Engineering, 23-25 August 2016, Kuala Lumpur.
 - Bodroža-Solarova, M.I., Kljajić P., Andrić G., Pražić-Golić M., Filipčeva B.V., Šimurina O., Adamović M., 2011. Trading quality and breadmaking performance of wheat treated with natural zeolite and diatomaceous earth. *Acta Periodica Technologica* 42 (2011), 1-9.
 - Bodroža-Solarov M., Kljajić P., Andrić G., Filipčev B., Dokić L., 2012. Quality parameters of wheat grain and flour as influenced by treatments with natural zeolite and diatomaceous earth formulations, grain infestation status and endosperm vitreousness. *Journal of Stored Products Research*, 51, 61-68.
 - Cabacos M, Duyme F., Crépon K., 2019. The effects of grain cleaning on the development of *S. oryzae* infestation. International Working conference on Stored Product Protection, 3-6 september, Pise. In press.
 - Cabacos M., Rozelle P., Crépon K., 2019. Efficacité des zéolithes pour la protection du blé tendre au stockage. In : Phloème - les Biennales de l'innovation céréalière, 29-30 janvier 2020, Paris, Ed. ARVALIS.
 - Chanbang Y., Arthur F.H., Wilde G.E., Throne J.E., 2007. Efficacy of diatomaceous earth to control *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae) in rough rice : Impacts of temperature and relative humidity. *Crop Protection*, 26, 923-929.
 - Ciesla Y. et Guéry B., 2014. Efficacité de la terre de diatomées mélangée aux grains pour la lutte contre le charançon du riz. AFPP-Dixième conférence internationale sur les ravageurs en agriculture, Montpellier, 22 et 23 octobre 2014.
 - Claderon M., Navarro S., 1980. Synergic effect of CO₂ and O₂ mixture on two stored grain insect pest. In: Shejbal L. (Eds) Controlled atmosphere storage of grains. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
 - Conyers S.T.; Bell C.H., 2007. A novel use of modified atmospheres: storage insect population control. *Journal of Stored Products Research* 43 (2007), 367-374.
 - Dermott T. and Evans D.E., 1978. An evaluation of fluidized-bed heating as means of disinfesting wheat. *Journal of Stored Products Research* 14 (1978), 1-12.
 - Directive 2009/128/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 instaurant un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable.
 - Driscoll R., Longstaff B.C., Beckett S., 2000. Prediction of insect populations in grain storage. *Journal of Stored Products Research* 36 (2000), 131-151.
 - Duhamel du Monceau H.-L., 1754. *Traité de la conservation des grains et en particulier du froment*. H.-L. Guérin et L.-F. Delatour.
 - Dutartre S., Lavarde P., Malpel G.-P., Pelosse H., Winter L. et Englebert P., 2014. Préfiguration de la mise en œuvre des certificats d'économie des produits phytosanitaires – mission d'appui, rapport de la mission CGEDD-IGF-CGAAER, juillet 2014.
 - EFSA, 2011. Statement summarising the Conclusions and Recommendations from the Opinions on the Safety of Irradiation of Food adopted by the BIOHAZ and CEF Panels. *EFSA Journal* 2011; 9(4):2107.
 - Ferizli A.G., Beris G., 2005. Mortality and F1 progeny of the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F), on wheat treated with diatomaceous earth : effects of rate, exposure period and relative humidity. *Pest Management Science*, 61 (11), 1103-1109.
 - Fields P., 1992. The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures. *Journal of Stored Products Research* 28, 89-118.
 - Fields P., 2006. Alternatives to chemical control of stored-product insects in temperate regions. In Proceedings of the 9th International Working Conference on Stored Product Protection, 15 to 18 October 2006, Campinas, São Paulo, Brazil. Brazilian Post-harvest Association - ABRAPOS, Passo Fundo, RS, Brazil, 2006. (ISBN 8560234004).
 - Fields P.G., Muir W., 1995. Physical Control. In: B. Subramanyam & D. Hagstrum (eds), *Integrated Management of insects in Stored Products*. Marcel Dekker Inc., New York, 195-221.
 - Fleurat-Lessard F., 2015. Dangers biologiques et risques d'altération de la qualité. In : *Résidus de pesticides dans les céréales alimentaires : origine, devenir et gestion raisonnée*, Ed. Quae/ACTA, Paris, 31-51.
 - Fleurat-Lessard, F., 1990. Effect of modified atmospheres on insect and mites infesting stored products. In: *Food Preservation by Modified Atmospheres*. Calderon, M., Barkai-Golan, R. (Eds), CRC press, Inc., Boca Raton.
 - Fleurat-Lessard, F., 2001. Control of Insects in Post-harvest: radio frequency and microwave heating in Vincent C., Panneton B., Fleurat-Lessard F. (eds) *Physical Control Methods in Plant Protection*. Berlin: Springer 162-173, Florida, USA. 21-38.
 - Hagstrum D.W., Flinn P.W., 2014. Modern stored-product insect pest management. *Journal of Plant Protection Research*, vol. 54 (3), 205-210.
 - Hallman G.J., 2013. Control of stored product pests by ionizing radiation. *Journal of Stored Products Research*, 52, 36-41.
 - Jayas D.S., Jeyamkondan S., 2002. Modified Atmosphere Storage of Grains Meats Fruits and Vegetables. *Biosystems Engineering* (2002) 82 (3), 235–251
 - Joffe A., Clarke B., 1963. The effect of physical disturbance or « turning » of stored maize on the development of insect infestations. *Laboratory studies with *Sitophilus oryzae* (L.)*. *S. Afr. J. Agric. Sci.* (1963) 6, 65-84.
 - Kavallieratos N.G., Athanassiou C.G., Pashalidou F.G., Andris N.S., Tomanović Z., 2005. Influence of grain type on the insecticidal efficacy of two diatomaceous earth formulations against *Rhyzopertha dominica* (F) (Coleoptera: Bostrychidae). *Pest Management Science*, 61 (7), 660-666.
 - Khan M.A., 1983. Effect of relative humidity on adults of 10 different species of stored product beetles. *Journal of applied entomology*. Volume 95, issue 1-5, 217-227.
 - Kljajić P., Andrić G., Adamović M., Bodroža-Solarov M., Marković M., Perić I., 2010a. Laboratory assessment of insecticidal effectiveness of natural zeolite and diatomaceous earth formulations against three stored-product beetle pests. *Journal of Stored Products Research*, 46, 1-6.
 - Kljajić P., Andrić G., Adamović M., Pražić Golić M., 2010. Laboratory evaluation of insecticidal effectiveness of a natural zeolite formulation against *Sitophilus oryzae* (L.), *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Tribolium castaneum* (Herbst) in treated wheat. In: Carvalho M.O., Fields P.G., Adler C.S., Arthur F.H., Athanassiou C.G., Campbell J.F., Fleurat-Lessard F., Flinn P.W., Hodges R.J., Isikber A.A., Navarro S., Noyes R.T., Riudavets J., Sinha K.K., Thorpe G.R., Timlick B.H., Trematerra, P., White N.D.G. (Eds.), *Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product*

- Protection, Estoril, Portugal, June 2010. Julius-Kühn-Archiv, 862-867.
- Korunić Z, Fields P.G., Kovacs M.I.P., Noll J.S., Lukow O.M., Demianyk C.J., Shibley K.J. The effect of diatomaceous earth on grain quality. *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 9, 3, 373-387.
 - Korunić Z., 1998. Diatomaceous earths, a group of natural insecticides. *Journal of Stored Products Research* 34 (1998), 87-97.
 - Korunić Z., Fields P., Timlick B., Ormsher P., Van Natto C., 1997. Enhanced Diatomaceous Earth Insecticide, Safe, Effective and Long Lasting Grain Protectant. Presented at FAO VIII Round Table on Prevention of Postharvest Food Losses, 13-15 August, Cartagena, Columbia.
 - Korunić Z., Mackay A., 2000. Grain surface-layer treatment of diatomaceous earth for insect control. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* 51(1), 1-11.
 - Lévy C., 2010. Principaux facteurs influençant l'efficacité de la lumière pulsée pour la décontamination des microorganismes pathogènes et d'altération des denrées alimentaires (thèse de doctorat de l'Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France) <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00747302>
 - Loschiavo S.R., 1978. Effect of disturbance of wheat on four species of stored-product insects. *Journal of Economic Entomology*, vol.71, n°6, 889-893.
 - Mason L.J., Rulon R.A., Maier D.E., 1997. Chilled versus ambient aeration and fumigation of stored popcorn – Part 2: Pest management. *Journal of Stored Products Research* 33 (1997), 51-58.
 - Mortas N., Pennetier A., 2008. Méthodes de lutte contre les insectes dans les silos. In : ONIGC - Publication du service des Statistiques et de l'orientation, Coord. Bova F., mars 2008.
 - Navarro S., 1978. The effects of low oxygen tensions on three stored product insect pests. *Phytoparasitica* 6(2), 51-58.
 - Navarro S., Calderon M., 1980. Integrated approach to the use of controlled atmospheres for insect control in grain storage. In: Shejbal L. (Eds) *Controlled atmosphere storage of grains*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
 - Nelson, S. O., 1996. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored grain insect control. *ASAE*, 39 (4) 1475-1484.
 - Nelson, S. O., Bartley, P. G., & Lawrence, K. C., 1998. RF and microwave dielectric properties of stored-grain insects and their implications for potential insect control. *Transactions of the ASAE*, 685-692.
 - OMS, 1981. Salubrité des aliments irradiés : rapport d'un comité mixte AIEA/FAO/OMS d'experts. Organisation mondiale de la Santé. Série de rapports techniques ; no. 659.
 - Phillips, T. W., Noyes, R. T., Adam, B. D. 2002: Integrated pest management for grain elevators that supply the breakfast cereal industry: case study and economic analysis. http://storedproducts.okstate.edu/sprec_folder/sprec/Publications/OSU-Elevator-IPM.pdf
 - Pons M.J., Camara A.G., Guri S., Riudavets J., 2010. The use of carbon dioxide in big bags and containers for the control of pest in food products. In *Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection*, 27 June to 2 July 2010, Estoril, Portugal. Julius Kühn-Institut, Berlin, Germany.
 - Rulon A.R., Maier D.E., Boehlje M.D., 1999. Post-harvest economic model to evaluate grain chilling as an IPM technology. *Journal of Stored Products Research* 35 (1999), 369-383.
 - Sayesteh N et Ziaee M., 2007. Insecticidal efficacy of diatomaceous earth between strains of *Tribolium castaneum* (Herbst). *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 5(2), 119-123.
 - Schöller M. et Reichmuth C., 2010. Field trials with the diatomaceous earth SilicoSec® for treatment of empty rooms and bulk grain. 10th International Working Conference on Stored Product Protection, Estoril, Portugal, June 2010. Julius-Kühn-Archiv, 899-905.
 - Shayesteh N., Barthakur N.N., 1996. Mortality and behaviour of two stored-product insect species during microwave irradiation. *Journal of Stored Products Research* 32 (1996) 239-246.
 - Shejbal J., Tonolo A., Careri G, 1973. Conservation of wheat in silos under nitrogen. *Annals of Technology in Agriculture*, 22(4), 773-785.
 - Subramanyam B.H. and Roesli R., 2000. Inert dusts. Dans: Subramanyam B.H., Hyagstrum, D.W. *Alternatives to pesticides in stored-product IPM*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 321-380.
 - Suleiman R, 2016. Periodic physical disturbance : an alternative method for controlling *Sitophilus zeamais* infestation. *Insects* 2016, 7(4), 51.
 - Sun D-W., Woods J.L., 1994. The selection of sorption isotherm equations for wheat based on the fitting of available data. *Journal of Stored Products Research*, 30, No1, 27-43.
 - Tang J. and Wang S., 2007. Fundamental heat transfer theory for thermal treatments. In : Tang J., Mitcham E., Wang S. and Lurie S. (Eds) *Heat treatments for postharvest control : theory and practice*, Oxon, CAB International, 27-55.
 - Tang, J., Wang S., 2001. Radio frequency and microwave alternative treatments for insect control in nuts : a review. *Agricultural Engineering Journal*, 105-120.
 - Tateya A., T. T., 1977. Effects of microwave radiation on two species of stored-product insects. *Research Bulletin of the Plant Protection Service Japan*, (14), 52-59.
 - Tilley D.R., Casada M.E., Arthur F.H., 2007. Heat treatment for disinfection of empty grain storage bins. *Journal of Stored Products Research* 43 (2007), 221-228.
 - Tilton E.W., 1974. Achievements and limitations of ionizing radiation for stored-product insect control. In : *Proceedings of the 1st International Working Conference on Stored Product Entomology*, Savannah, Georgia. 354-361.
 - United State Department of Agriculture (USDA), 2007. Official United States Standards for Grain, Subpart A -- General Provisions. https://www.gipsa.usda.gov/fgis/standards/general_provisions.pdf
 - Vadivambal R., D. O., 2010. Desinfestation of stored corn using microwave energy. *Agricultural and Biology Journal of North America*, 1 (1) 18-26.
 - Vancraynest L., Frérot E., Crépon K., 2014. Technical and economic analysis of pest management practices for stored wheat in 14 grain elevators in France. *IOBC-WPRS Bulletin* Vol. 98, 2014, 395-402.
 - Vayias B.J., Athanassiou C.G., 2004. Factors affecting the insecticidal efficacy of the diatomaceous earth formulation SilicoSec against adults and larvae of the confused flour beetle, *Tribolium confusum* DuVal (Coleoptera : Tenebrionidae). *Crop Protection*, 23, 565-573.
 - Vincent C., Hallman G., Panneton B., Fleurat-Lessard F., 2003. Management of agricultural insects with physical control methods. *Annu.Rev. Entomol.* 48, 261-281.
 - White N.D.G., Jayas D.S., Demianyk C.J., 1997. Movement of grain to control stored-product insects and mites. *Phytoprotection* 78 (2) 75-84
 - Yadav D.N., Anand T., Sharma M., Gupta R.K., 2014. Microwave technology for disinfection of cereals and pulses: An overview. *J Food Sci Technol* (December 2014) 51(12), 3568-3576.
 - Ziaee, M., Khashaveh, A., 2007. Effect of five diatomaceous earth formulations against *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae), *Oryzaephilus surinamensis* (Coleoptera: Silvanidae) and *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrychidae). *Insect Sci.* 14, 359-365.