



■ Sommaire

- I. La terre de diatomée
- II. Facteurs impactant l'efficacité de la terre de diatomée
- III. Impact sur la qualité
- IV. Efficacité en traitement sur grain
- V. Efficacité de Silicosec® en traitement des locaux
- VI. Conclusion

■ Inscrivez-vous - Rappel

Si vous souhaitez recevoir cette lettre technique, merci de bien vouloir vous inscrire à l'aide du formulaire prévu :

<http://enquete.arvalis-fr.com>

Terre de diatomée au stockage : Quelle efficacité ? Comment l'utiliser ?

Silicosec® :

Terre de diatomée autorisée en France

La terre de diatomée est une substance active (s.a.) autorisée dans l'Union Européenne depuis 2009 : elle figure en annexe I du règlement 540/2011 sous la dénomination « Kieselgur (terre à diatomées) ». Elle ne dispose pas de Limite Maximale de Résidu (LMR). Une formulation insecticide et acaricide à base de terre de diatomée s'est vue délivrer une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM) par l'ANSES le 21.09.2015. Ce produit, dénommé Silicosec®, est fabriqué par la société Allemande BIOFA AG distribué en France par Kreglinger. Cette formulation sous forme de Poudre de Contact (CP) qui contient 920g/Kg de terre de diatomée est autorisée pour deux usages :

- Traitements généraux* Désinsectisation* Locx Struct. Matér. (POV), à la dose maximale de 10g/m² dans la limite d'une application par an ;
- Céréales* Trt Prod. Réc.* Ravageurs des denrées stockées, à la dose maximale de 2 Kg/t dans la limite d'une application par an.

Il est précisé que « Pour protéger l'opérateur et le travailleur s'il doit intervenir dans le local d'application, porter des gants, une combinaison de travail et une protection respiratoire (masque de type FFP2 conforme à la norme EN 149) ». Car si cette s.a. est non-classée toxique, elle peut néanmoins présenter un risque par inhalation pour les opérateurs exposés. En effet, l'approbation d'une formulation à base de terre de diatomée doit respecter le critère de pureté de 0,1% de silice cristalline. De par la délivrance de son AMM, Silicosec® respecte ce critère. Toutefois, puisqu'il a été démontré que la silice cristalline inhalée est carcinogénique (IARC 1997) et que les particules de terre de diatomée restent en suspension dans l'air pendant de nombreuses heures après le traitement (Z. K. Korunić et al., 2016), il est probable qu'une exposition chronique d'opérateurs non-protégés présente un risque sanitaire. De plus la fiche de sécurité précisant, dans la section Premiers secours/Contacts avec les yeux, que le produit est abrasif il est conseillé de porter une protection oculaire.

Enfin, l'AMM de Silicosec® s'accompagne d'une unique contrainte d'usage : **l'interdiction du transport pneumatique des grains après traitement**. L'interdiction du nettoyage des grains après traitement mentionnée dans la Lettre de décision du Ministère de l'alimentation de l'agriculture et de la pêche en date du 26.06.2015 a été abrogée suite à la décision de l'ANSES du 21.09.2015.



Figure 1 : Sac de Silicosec® en format 15Kg.
Source : <http://www.biofa-profi.de/en/>

I. La terre de diatomée

1. Composition

Les diatomées sont des micro-algues unicellulaires enveloppées par un squelette externe majoritairement composé de silice amorphe (transparent et rigide). Selon les sources, le nombre d'espèces de diatomées se situe entre 3 000 et 12 000. Chaque espèce de diatomée possède un squelette aux caractéristiques uniques :

- Forme ;
- Masse volumique ;
- Superficie ;
- Capacité de rétention d'huile/d'eau.

On appelle terres de diatomées les dépôts fossiles de squelettes de diatomées. Ces dépôts datent en majorité d'il y a 30 à 80 millions d'années (Z. K. Korunić et al. 2016; P. G. Fields 1998), sont répartis sur toute la planète et peuvent s'accumuler sur plusieurs centaines de mètres de profondeur (Vincent, Panneton, et Fleurat-Lessard 2001). Une terre de diatomée correspond donc à une origine géographique, c'est-à-dire un gisement, lequel contient un ensemble d'espèces fossilisées. Les propriétés d'une terre de diatomée seront donc dépendantes de l'espèce majoritairement présente dans le gisement d'origine.

Toutes les terres de diatomées ne sont pas les mêmes, et n'ont donc pas les mêmes propriétés insecticides. En plus de ces caractéristiques, la teneur en dioxyde de silicium de la terre de diatomée impacte également son efficacité (Vincent, Panneton, et Fleurat-Lessard 2001). Selon l'origine l'efficacité insecticide de la terre de diatomée peut varier dans un rapport de 20.

La majorité des terres de diatomées ont des particules de taille comprises entre 10 et 50 µm (Z. K. Korunić et al. 2016). Silicosec® est une terre de diatomée issue de la fossilisation d'espèces en eau douce qui contient approximativement 92% de SiO₂, 3% de Al₂O₃, 1% de Fe₂O₃ et 1% de Na₂O, avec une taille moyenne des particules entre 8 et 12 µm (Vayias et Athanassiou 2004).

2. Modes d'actions

Les insectes meurent quand ils ont perdu approximativement 60% de leur eau ou environ 30% de leur poids (Ebeling 1971). Il est donc vital pour eux de maintenir leur équilibre hydrique, ce qu'ils font principalement grâce à la partie la plus externe de leur exosquelette, la cuticule, constituée de corps gras (hydrophobes).

La terre de diatomée agit *via* le dioxyde de silicium qu'elle contient. Ce composé chimiquement inerte



Figure 2 : vue au microscope à balayage électronique d'une diatomée.

Source : <http://www.thenaturelabs.com>

agit par abrasion de la cuticule et des voies digestives (Z. K. Korunić et al. 2016; Jackson et Webley 1994), par obstruction des spiracles (orifices respiratoires) (Jackson et Webley 1994) et par adsorption des corps gras. Lors de leur déplacement les insectes rentrent en contact avec le produit, rendant leur cuticule perméable aux échanges hydriques (Zlatko Korunic 1998). Les insectes meurent donc par dessiccation.

3. Modes d'application

La terre de diatomée peut être appliquée par poudrage de l'ensemble d'un lot, mais cela entraînera un coût important et une perte de poids spécifique (PS) de l'ordre de 5 Kg/hL. En Australie, par exemple, elle est surtout utilisée en traitement des locaux. Aux Etats-Unis souvent seule la partie supérieure (10-20%) de la masse de grain est traitée (P. Fields et Korunic 2002). L'application sur la partie supérieure de la masse de grain présente notamment l'intérêt de diminuer le coût du traitement d'un lot stocké, ainsi que l'impact sur le PS (P. G. Fields 1998).

La terre de diatomée peut être appliquée en traitement des locaux par poudrage via un atomiseur compatible, mais cela génère beaucoup de poussière. Il est également possible de disperser la poudre via un pistolet à air comprimé réglé entre 5 et 8 bars (pistolet de sablage) (Allen 2000). Il est possible, comme cela se fait beaucoup en Australie, d'appliquer la terre de diatomée en suspension dans l'eau, par pulvérisation. Bien qu'elle diminue considérablement l'émission de particules, cette méthode diminue aussi l'efficacité du traitement (Vincent, Panneton, et Fleurat-Lessard 2001; P. Fields et Korunic 2002). Il est également possible d'appliquer ce produit via le système d'aération dans un silo vide.

II. Facteurs impactant l'efficacité de la terre de diatomée

1. Espèce et stade d'insecte

Toutes les espèces d'insectes ravageurs des denrées stockées n'ont pas la même sensibilité à la terre de diatomée. Fields et Muir (1995) classent les espèces de la plus à la moins sensible (lors de traitement sur la masse totale de grain) : le Petit Silvain plat (*Cryptolestes ferrugineus*), le Silvain (*Oryzaephilus surinamensis*), les Charançons (*Sitophilus spp.*), le Capucin des grains (*Rhyzopertha dominica*) et les Triboliums. Il est d'ailleurs établi que le Tribolium brun (*Tribolium confusum*) est l'une des espèces les plus résistantes à la terre de diatomée (Vayias et Athanassiou 2004).

La tolérance à la sécheresse peut intervenir mais n'est pas systématiquement corrélée à la sensibilité des insectes (Vincent, Panneton, et Fleurat-Lessard 2001). L'hydrophobie, et donc la composition de la cuticule, jouerait un rôle important. De même la capacité de rétention de la terre de diatomée par la cuticule rendrait l'espèce plus sensible. Ainsi l'espèce la plus sensible, le Petit silvain plat, retient bien plus la poudre qu'une espèce beaucoup plus résistante, le Tribolium roux (*Tribolium castaneum*) (Vincent, Panneton, et Fleurat-Lessard 2001). Le comportement des insectes jouerait également un rôle dans leur sensibilité : les espèces les plus mobiles comme le Petit silvain plat entreraient plus en contact avec la terre de diatomée que des espèces plus « sédentaires » comme le Capucin des grains.

Le stade de développement des insectes impacte l'efficacité du traitement, en général les adultes sont plus résistants que les formes larvaires (Baldassari et Martini 2014; Shayesteh et Ziaee 2007).

2. La tolérance des insectes

La résistance des insectes ravageurs des céréales stockées aux insecticides de synthèse est un facteur ayant fortement motivé la recherche de solutions alternatives. Il a cependant été démontré en laboratoire qu'au bout de 5 à 7 générations du Tribolium roux, du Petit silvain plat et du Capucin des grains la sensibilité des insectes à la terre de diatomée diminuait significativement (Z. Korunic et Ormesher 1998). Sans en expliquer l'origine, les auteurs suggèrent le développement de mécanismes physiologiques et comportementaux. En comparant différentes souches de Tribolium roux Rigaux, Haubruge, et Fields (2001) ont démontré que les insectes pouvaient générer une tolérance nécessitant de quasiment doubler la dose de terre de diatomée pour tuer 50% de la

population. Il a notamment été déterminé que les insectes tolérants étaient plus légers, se déshydrataient moins vite, et se déplaçaient plus lentement que les insectes sensibles. Il a également été noté que les insectes tolérants évitent les zones traitées, même à très faibles doses, tandis que les souches susceptibles ne présentent pas ce comportement même à forte concentration.

3. Teneur en eau et hygrométrie

Pour obtenir un bon niveau d'efficacité insecticide, le grain doit être relativement sec (Vincent, Panneton, et Fleurat-Lessard 2001; P. G. Fields 1998; P. Fields et Korunic 2002). La présence d'humidité va, en effet, réduire l'efficacité du traitement *via* 3 mécanismes : (1) en réduisant la capacité d'adsorption des lipides de l'épicuticule des insectes ; (2) en réduisant la capacité de la terre de diatomée à se disperser (tendance à l'agglomération) et donc à rentrer en contact avec les insectes ; (3) la capacité des insectes à contrebalancer les pertes en eau subies augmente avec le degré d'humidité (Z. K. Korunić et al. 2016).

Une teneur en eau supérieure à 14% permettrait aux insectes de contrebalancer la déshydratation engendrée par le traitement (Baldassari, Martini, et others 2014; Quarles 1992; Zlatko Korunic 1998).

De la même manière, en situation de milieu « ouvert », l'hygrométrie de l'air impacte fortement l'efficacité du traitement (Z. K. Korunić et al. 2016). Plus elle est élevée, moins le traitement sera efficace (P. G. Fields 1998).

4. Température

La température est un facteur prédominant dans la détermination de l'efficacité insecticide de la terre de diatomée (P. Fields et Korunic 2002; P. G. Fields 1998; Z. K. Korunić et al. 2016; Quarles 1992). Cela s'explique simplement par le fonctionnement biologique des insectes et le mode d'action de la terre de diatomée (Ciesla et Guery 2014). La terre de diatomée agit au contact des insectes par abrasion de la cuticule et des voies digestives, et par adsorption des corps gras de cette dernière. Les insectes sont des organismes dont la température interne, et donc l'activité métabolique, dépend de la température de leur milieu. Ainsi lorsque la température augmente les insectes se déplacent et se nourrissent davantage ce qui favorise fortement l'action insecticide de la terre de diatomée.

5. Culture stockée

La nature de la culture impacte également l'efficacité du traitement (P. G. Fields 1998; Z. K. Korunić et al. 2016). Ainsi le riz blanc est la culture

nécessitant la plus forte dose, puis viennent le tournesol, le maïs, le riz paddy, l'avoine, l'orge, le blé tendre puis le blé dur (Vincent, Panneton, et Fleurat-Lessard 2001).

III. Impact sur la qualité

La limite majeure pour l'utilisation de la terre de diatomée pour un traitement sur grain est la réduction du PS engendrée. Ainsi appliquer 2Kg/t peut réduire d'environ 4 Kg/hL le PS du maïs et d'environ 6Kg/hL le PS du blé (P. G. Fields 1998). Cependant l'impact sur le PS varie selon le type de terre de diatomée, il n'est donc pas possible de généraliser ces valeurs. La réduction du PS engendrée par l'application de la terre de diatomée peut varier d'un facteur 4 selon son origine (P. G. Fields 1998). **Des essais réalisés par Arvalis – Institut du végétal ont démontré que des applications de Silicosec® à 0,5 ou 1 Kg/t de blé tendre pouvaient engendrer une perte de PS allant de 3 à 5 kg/hL** (Losser 2012). Ces résultats sont extrapolables à la dose homologuée de 2 Kg/t

pour Silicosec® car il a été démontré qu'au-delà d'une certaine dose, se situant autour de 0,5 Kg/t, la diminution du PS engendrée par l'augmentation de la dose est minime (Zlatko Korunic, Cenkowski, et Fields 1998).

Ce désavantage limite fortement le potentiel d'utilisation de la terre de diatomée. Par exemple DryAcide®, disponible depuis 1986 en Australie, n'y est quasiment pas utilisé sur les lots de grains entiers. Il est bien plus utilisé en traitement des locaux et, plus récemment, en traitement de la partie superficielle du lot (Allen 2000).

Il n'y aurait cependant pas d'impact de la terre de diatomée sur la qualité boulangère du blé tendre, sur les propriétés de l'orge de brasserie et sur le blé dur (P. G. Fields 1998; Z. Korunic et al. 1996).

IV. Efficacité en traitement sur grain

1. Application de Silicosec® sur lot entier

• Efficacité sur les Tribolium

Vayias et Athanassiou (2004) ont étudié en laboratoire l'efficacité de SilicoSec® contre les larves et les adultes du Tribolium brun à plusieurs températures, teneurs en eau (11% et 13%) et doses lors d'un traitement sur blé tendre. Il a ainsi été démontré que les larves du Tribolium brun sont plus sensibles que les adultes, et que pour ces dernières 24 et 48h après un traitement à 32°C les mortalités atteintes sont respectivement d'environ 65 et 95%. Une semaine de contact permanent des larves de Tribolium brun avec du grain traité, entre 27 et 32°C, est nécessaire pour obtenir une mortalité quasi-totale. Pour les adultes une semaine de contact permanent à 32°C avec le grain traité n'entraîne qu'environ 85% de mortalité, et allonger cette durée à deux semaines ne permet pas de dépasser 95% de mortalité en moyenne, même à la plus forte dose de 1,5 g/Kg. Peu importe le stade, passer de 32 à 22°C divise par deux l'efficacité du traitement. De même, traiter sur un grain plus humide (13% contre 11%) diminue considérablement l'efficacité du traitement sur les deux stades, avec une baisse moyenne de mortalité de 10% pour les adultes. A titre de comparaison, d'autres essais réalisés à 30 et 32°C

sur du blé tendre à 11,3% de teneur en eau avec une dose de 1,5 Kg/t de Silicosec® ont permis d'obtenir 100% de mortalité des adultes du Tribolium brun après 14 jours d'exposition (C. G. Athanassiou et al. 2005).

L'efficacité de SilicoSec® sur le Tribolium roux a été testée sur du blé tendre à 11,4% de teneur en eau et 27°C (Shayesteh et Ziaee 2007). D'abord, il été constaté que les adultes sont plus tolérants que les larves à la terre de diatomée. Ensuite, plus la dose appliquée et la durée de contact augmentent, plus la mortalité des insectes croît. Enfin, les auteurs concluent sur le fait que 2 semaines de contact des adultes du Tribolium roux avec 1,7 Kg/t de SilicoSec® permettent d'atteindre un taux de mortalité de 100%. A titre de comparaison, 10 jours de traitement à 1,6 Kg/t de lots de maïs à 11% de teneur en eau et à 27°C ne permet d'atteindre qu'environ 85% de mortalité du Tribolium roux (Mohitazar et al. 2009).

• Efficacité sur Charançons et Silvains

L'efficacité de SilicoSec® a également été étudiée sur le seul stade du charançon du riz susceptible d'être en contact avec le produit : les adultes (Ciesla et Guery 2014). Des lots de blé tendre à 13% de teneur en eau ont été traités à 1 ou 2 Kg/t

de SilicoSec® et infestés à hauteur de 200 insectes/Kg régulièrement durant 3 mois avec, pour chaque date, 14 jours de contact entre les insectes et le blé traité. Cela dans deux conditions de température : 15°C et 25°C. Cet essai a permis de constater deux faits marquants : **le rôle crucial de la température lors du traitement et la persistance d'action de la terre de diatomée au fil du temps**. Deux semaines de contact à 25°C entre le charançon du riz et le blé traité ont permis d'obtenir en moyenne 97,5% de mortalité à 1Kg/t et 99,9% à 2Kg/t. A 15°C les mortalités sont bien moindres, avec en moyenne 11% et 41%. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Baldassari et Martini (2014) qui sur du blé tendre, à 26,7°C et 12% de teneur en eau, traité à 1Kg/t de SilicoSec® constatent 99% de mortalité après deux semaines.

Comme précédemment évoqué, la teneur en eau de 14% est communément admise comme le seuil à partir duquel les insectes peuvent contrebalancer la déshydratation engendrée par le traitement (Baldassari, Martini, et others 2014; Quarles 1992; Zlatko Korunic 1998). Ainsi il n'a pas été observé une différence significative d'efficacité de SilicoSec® lors d'un traitement sur le charançon du riz à 1Kg/t et à 27-30°C sur du blé à 11% et 13% de teneur en eau (Christos G. Athanassiou et al. 2006). Les taux de mortalités obtenus étaient alors de 100% après 14 jours d'exposition. Cependant, des essais réalisés par Arvalis-Institut du végétal ont permis d'observer l'efficacité sur le charançon du riz de SilicoSec® appliqué à 1Kg/t et à environ 27°C sur du blé à 14,5-15% de teneur en eau. Ainsi après 14 jours de traitement, seuls 60% des insectes sont morts (Losser 2012). La teneur en eau des céréales lors de l'application de la terre de diatomée, et notamment **le respect du seuil de 14%, semble**

donc être un facteur conditionnant fortement l'efficacité du traitement.

L'augmentation de la mortalité avec la dose et la durée de contact des insectes avec SilicoSec® a également été reportée sur le Silvain (Mohitazar et al. 2009). Lors de cet essai sur maïs à 11% de teneur en eau et à 27°C, une plus grande sensibilité du Silvain par rapport au Tribolium roux a été constatée. Après une exposition de 10 jours à 2,5 Kg/t de SilicoSec®, 90 % des Silvains adultes sont morts.

L'efficacité à taille réelle a été testée sur le charançon des grains, le Silvain et le Petit silvain plat, lors d'un traitement de l'ensemble d'un lot de 10 t blé à 0,7 ou 2Kg/t de SilicoSec® par tonne de grain. Si à 0,7kg/t de haut niveaux de mortalité peuvent être atteints pour le Silvain et le Petit silvain plat (90% et 95%, respectivement), seuls environ 60% des charançons sont morts (17,5 °C et 12% de teneur en eau). Cependant à pleine dose toutes ces espèces présentent le même niveau de mortalité avoisinant 95% (21,6°C et 11,5% de teneur en eau).

- **Efficacité sur le Capucin des grains**

La sensibilité des Capucins des grains adultes à 1Kg/t de SilicoSec® a été étudiée sur du blé tendre à 11% de teneur en eau et à 26,7°C (Baldassari et Martini 2014). Sur ce blé sec la mortalité observée après 2 semaines de contact est de 97,7%. Ici encore, nos résultats obtenus sur du blé plus humide à 27°C et à 1Kg de SilicoSec® par tonne de blé ne permettent d'observer que 65% de mortalité pour cette espèce, après 2 semaines (Losser 2012).

A retenir : Efficacité du traitement sur grains

L'application de SilicoSec® sur l'ensemble d'un lot permet d'atteindre de très haut de niveau de mortalité des insectes si deux conditions sont respectées (1) le grain doit être sec (11-13%) et (2) le lot doit être chaud (25-30°C). Dans ces conditions des taux de mortalités compris entre 90 et 100% seront atteints après 2 semaines. Cependant, après 2 semaines, en conditions plus fraîches (15°C) la mortalité chute à environ 40% (charançon du riz, blé à 13% traité à 2Kg/t) et sur du blé relativement humide (14,5-15%) elle passe à 60% (charançon du riz, blé à 27°C traité à 1Kg/t).



Figure 3 : Application de SilicoSec® sur grain.
Source : <http://www.biofa-profi.de/de/>

2. Traitement de la couche superficielle du lot

Cette stratégie visant à minimiser l'impact de la terre de diatomée sur le PS de la denrée a été premièrement conçue en complément du refroidissement par aération à air ambiant (Nickson, Desmarchelier, et Gibbs 1994). L'idée est que la surface du lot est plus encline à se réchauffer et donc à héberger un départ d'infestation, et qu'elle est plus vulnérable aux infestations par le milieu environnant (Allen 2000; E. A. Vardeman et al. 2006). Ainsi, des essais en laboratoire ont été menés afin de déterminer la profondeur de traitement nécessaire pour empêcher le passage des insectes dans la couche non-traitée sous-jacente.

- **Sensibilité des insectes : un classement bouleversé**

Un essai mené en Australie avec le produit Dryacide® a permis un constat surprenant : les espèces habituellement les plus sensibles à la terre de diatomées lors de traitement du lot entier ou lors de traitement des locaux requièrent la profondeur de traitement la plus importante (1m pour le Silvain et 1,5m pour le Petit silvain plat) (Allen 2000). Cela s'expliquerait par leur mobilité. En effet celle-ci les désavantage lors d'un traitement de la masse entière du lot, cependant dans le cas d'un traitement de la couche superficielle cela leur permet de passer plus rapidement dans la couche non-traitée sous-jacente. Pour une espèce plus sédentaire, comme le capucin des grains la profondeur nécessaire n'est ici que de 30cm. Cependant, lors de cet essai le charançon des grains qui est une espèce ayant pourtant une bonne mobilité ne requiert que 30 cm de profondeur de traitement.

- **Effet de la profondeur du traitement**

Une autre étude réalisée en laboratoire s'est intéressée à la profondeur de traitement nécessaire pour empêcher le capucin des grains de franchir la zone traitée (E. A. Vardeman et al. 2006). Ainsi la formulation Protect-it®, à base de terre de diatomée, a été appliquée à 0,4Kg/t sur 15,2, 22,9 et 30,5cm sur du blé tendre à 27-30°C et environ 11% de teneur en eau, dans des colonnes de 90 cm de hauteur. 100 insectes adultes ont été introduits sur le dessus de la masse de grains, et des suivis des populations ont été réalisés après 7, 10 et 14 jours. Contrairement aux résultats d'Allen (2000) avec DryAcide®, aucune de ces profondeurs de traitement n'a empêché le passage des insectes. Cependant une augmentation de la

profondeur de traitement augmente de façon significative la mortalité sur l'ensemble de la colonne, avec à 15,2, 22,9 et 30,5 cm de profondeur 49,1, 73,8 et 85,2% de mortalité, respectivement. De plus l'analyse de la répartition des insectes morts indique bien qu'augmenter la profondeur de traitement ne fait pas qu'allonger le contact des insectes avec la couche traitée, ces derniers mourant dans la couche sous-jacente. En effet, passer d'une profondeur de 15,2-22,9 cm à 30,5 cm permet de faire passer la proportion d'insectes dont la mort est survenue au sein de la couche traitée de 75-75,9% à 83,4%.

- **Effet de la formulation de terre de diatomée**

Les mêmes auteurs ont utilisé le même matériel et mode opératoire pour comparer différentes formulations de terre de diatomée, à leur dose homologuée respective, à l'unique profondeur de 30,5cm sur le Capucin des grains (Erika A. Vardeman et al. 2007). Les résultats de cette étude montrent à quel point l'efficacité de cette pratique peut différer selon la formulation utilisée. Ainsi pour le produit Insecto™ (0,5Kg/t) la mortalité moyenne constatée est de 72,6%, pour Protect-It® (0,4Kg/t) elle est 83,4% et pour Dryacide® (1Kg/t) elle est de 98,1 % (avec la quasi-totalité des insectes morts retrouvés dans la couche traitée). Ce dernier résultat est entériné par une autre étude ayant constaté une efficacité totale de la technique sur le Capucin des grains en traitant à plus forte dose (2Kg/t) du blé sur 30,5cm de profondeur avec Dryacide® (Allen 2000).

- **Conclusion à échelle pilote**

Un essai à l'échelle pilote a permis de comparer sur du blé à 21-28°C et de 14,2-15,1% de teneur en eau, l'efficacité de deux doses de la formulation Protect-It® (0,5 et 0,75 Kg/t) sur deux profondeurs de traitement (0,5 et 1m), dans des cellules de 1,5m de hauteur, sur le Tribolium roux, le Capucin des grains et le Charançon du riz (Z. Korunić et Mackay 2000). Après traitement des quantités de grains nécessaires, 400 insectes de chaque espèce ont été introduits sur le dessus de chaque cellule et le suivi des populations a eu lieu après 59 jours. Les résultats de cette étude indiquent qu'à la dose de 0,75 Kg/t une profondeur de traitement de 50 cm permet une prévention quasi-totale de la pénétration des insectes dans le lot sous-jacent. A 0,5Kg/t une profondeur de 1m est cependant nécessaire.

• **Dilution de la couche traitée : impact sur le PS**

Enfin l'impact sur le PS de la dilution d'une couche superficielle traitée, à l'ensemble du lot a été déterminé. Ainsi pour ne pas dépasser une perte

de 2-3 Kg/hL, la couche traitée à 0,5 ou 0,75 Kg/t ne devrait pas dépasser 20 et 10% du lot, respectivement (Z. Korunić et Mackay 2000).

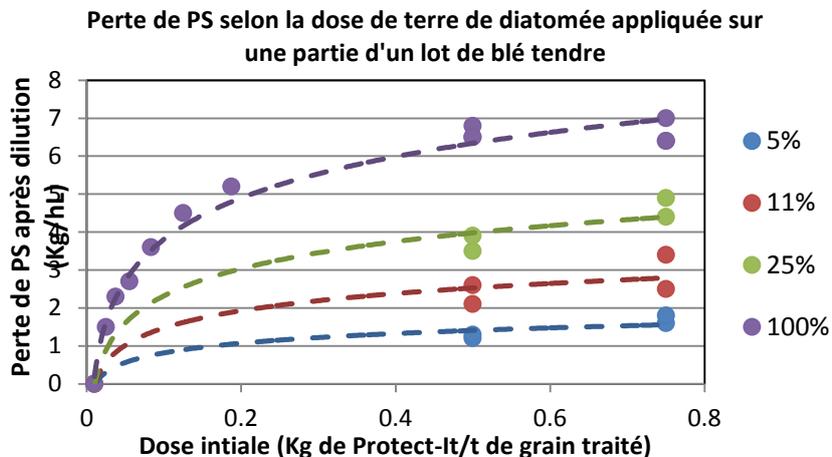


Figure 4 : Perte de PS observée après dilution de la couche superficielle (représentant 5 à 100% du lot), traitée avec la formulation Protect-It® à des doses allant de 0 à 0,75 Kg/t

A retenir : Traitement de la couche superficielle

Des essais de laboratoire et à l'échelle pilote ont permis de démontrer l'efficacité possible d'une application superficielle de la terre de diatomée permettant de limiter l'impact du traitement sur le PS du lot. Aucune référence sur ce thème n'est cependant connue pour la formulation Silicosec®. De plus, depuis les travaux menés par Nickson, Desmarchelier, et Gibbs (1994) l'intérêt de l'association du traitement de la couche superficielle du lot à la terre de diatomée avec la ventilation de refroidissement à air ambiant n'a plus été étudié. Il y est pourtant mentionné la mise en œuvre pratique et réussie par des industriels australiens de cette pratique. Il est par ailleurs suggéré que la combinaison de ces deux leviers permet de réduire la profondeur de la couche traitée (Allen 2000). De plus les résultats de modélisations effectuées par Arvalis-Institut du Végétal (non-publié), sur la sensibilité des insectes du stockage au froid, et l'analyse des résultats de la bibliographique semblent indiquer une complémentarité des deux moyens de lutte (cf. Figure 5).

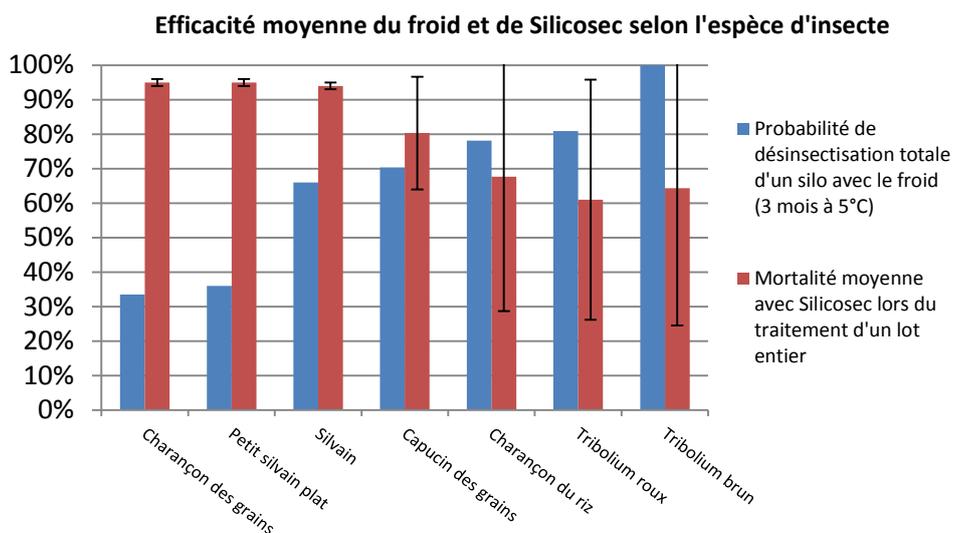


Figure 5 : Modélisation des probabilités de désinsectisation totale d'un silo via le refroidissement et mortalités moyennes (± écart type) des insectes adultes exposés à des doses de Silicosec allant de 1 à 2 Kg/t pour des températures moyennes d'au moins 22°C, des teneurs en eau allant de 11 à 12% et des durées d'expositions comprises entre 1 et 3 semaines

V. Efficacité de Silicosec® en traitement des locaux

- **Nettoyage des locaux : le préalable indispensable**

Afin de vérifier l'utilité d'un nettoyage préalable avant traitement des locaux, un essai de laboratoire a été mené en exposant le Tribolium roux, le Silvain et le Capucin des grains à 5g/m² de Silicosec® à 27°C et 55% d'humidité relative (Ziaee et Khashaveh 2007). De plus, afin de simuler le déplacement des insectes dans des zones refuges (non-traitées avec ou sans source d'alimentation) ces derniers ont été maintenus 1 jour sur la surface traitée, puis transférés sur des surfaces non-traitées avec ou sans produits céréaliers. Après une semaine d'exposition à une situation de « locaux non-nettoyés » (avec source d'alimentation) 81,6% des Tribolium, 93,3% des Capucins et 100% des Silvains sont morts. En revanche, en situation de « locaux nettoyés » (sans source d'alimentation) la mortalité des Tribolium atteint 96,6%, celle des autres espèces est de 100%. Ces résultats sont entérinés par ceux de Ziaee, Safaralizadeh, et Shayesteh (2006) qui constatent 100% de mortalité du Tribolium roux et du Capucin des grains suite à l'application de 10 g/m² de Silicosec®, en absence de source d'alimentation.

- **Essai de Silicosec® à échelle pilote : homogénéité de l'application et efficacité insecticide à court termes**

Un essai pilote a été réalisé en Allemagne (où SilicoSec® est disponible depuis 1997) afin d'étudier la répartition du produit, et l'efficacité insecticide sur plusieurs types de surfaces d'une application en traitement des locaux de Silicosec® sous forme de poudre, à l'aide d'un compresseur équipé d'un pistolet de sablage (Schöller et Reichmuth 2010). Un traitement avec un objectif de 20g/m² a été réalisé dans une salle d'une surface totale de 145m² dont 41,12m² au sol. Afin d'atteindre cette dose sur la surface totale 3Kg de Silicosec® ont été appliqués. A hauteur de 2 points d'échantillonnage par mètre carré de sol, les résultats mettent en lumière une **très forte hétérogénéité de la répartition de la terre de diatomée**. Avec une concentration moyenne de 15,4 g/m², la densité de produit varie de 2,6 à 49,5 g/m². Les auteurs relèvent qu'une grande majorité de la terre de diatomée a été retrouvée au sol, malgré l'objectif de traiter les parois, entraînant ponctuellement des taux de 73g/m² (soit plus de 3 fois la dose voulue).

Afin d'évaluer l'efficacité insecticide du traitement, des plaques dispersées dans la précédente salle

ont été traitées, puis 50 Tribolium roux et 100 Petits silvains plats y ont été déposés. Avec un dispositif empêchant leur fuite, la mortalité engendrée a été observée après 14 jours de contact. Malgré la plus grande résistance communément admise des Tribolium par rapport au Silvain ou au Petit silvain plat lors de traitements sur grains, seuls 65,4% des Petits silvains plats ont été tués contre 94,2% des Tribolium roux (73% d'hygrométrie et 15,4°C en moyenne durant le traitement).

- **Une étude de longue durée pour des recommandations pratiques**

En Grande Bretagne, où Silicosec® est disponible depuis les années 2000, une étude de longue durée a été menée en 3 étapes afin d'aboutir à des recommandations pratiques d'utilisation pour des applications en poudre ou en suspension liquide (Cook, Collins, et Collins 2004).

Deux essais préliminaires pour choisir la dose, les espèces et le mode d'application

Un premier screening en laboratoire a permis de comparer la réponse de 3 espèces d'insectes (Tribolium roux, Charançon des grains et Silvain) à 3 doses (5, 10 et 20g/m²) dans des conditions représentatives du climat local, relativement loin des conditions optimales des études de laboratoires habituelles (15°C et 80% HR). Le Charançon des grains a été identifié comme le plus résistant à Silicosec® avec au bout de 2 semaines 88% de mortalité en moyenne avec l'application de la suspension liquide, et 96% avec l'application sous forme de poudre. De plus, **il n'a pas été noté d'augmentation d'efficacité avec l'accroissement de la dose appliquée, la dose optimale semblant être 10g/m²**. Cette absence de réponse à la dose de produit en traitement des locaux a été constatée lors d'autres travaux (Cook et others 2003; Mewis et Ulrichs 2001), et serait due au fait que la cuticule des insectes n'est capable de capter qu'une quantité limitée de terre de diatomée, laquelle aurait tendance à y adhérer durablement (Le Patourel, Shawir, et Moustafa 1989). Ainsi, une fois le corps des insectes recouvert, une augmentation de la quantité de produit aurait peu d'effet.

Une deuxième phase de test (dans les mêmes conditions contrôlées) a permis de tester plus en profondeur la sensibilité du charançon des grains à 10g/m² de Silicosec® (appliqué en poudre ou en suspension liquide) et, en même temps, la persistance d'action du produit durant 3 mois sur

une surface offrant davantage de zones de refuge : le bois. Les résultats obtenus confirment la plus grande efficacité d'une application sous forme de poudre. Ainsi 2 semaines après l'introduction des insectes sur les surfaces traitées, les taux de mortalité moyens sont 86% si Silicosec® est appliqué sous forme de poudre, et de 40% s'il l'est sous forme de suspension liquide. Il a également été démontré que, peu importe le type d'application, le niveau de protection ne baisse pas au fil du temps.

Validation en conditions réelles : importance du nettoyage, traitement des parois difficiles, délai avant réception de 2 mois

Enfin une dernière phase de test visait à valider l'efficacité immédiate (après nettoyage des locaux en début d'été) et prolongée (jusqu'au printemps suivant) de l'application de 10 g/m² de Silicosec® en poudre, en conditions réelles, à la fois contre l'espèce identifiée comme la plus résistante (ici Charançon des grains) et la moins résistante (Silvain). Pour cela une aire de stockage de 120t en cellules sous abri a été traitée fin Juillet, après un nettoyage approfondi. Durant toute la durée de l'essai, les activités de réception et expéditions du site ont continué normalement. Une semaine avant le traitement (réalisé fin-juillet), 60 000 Charançons et 30 000 Silvain y ont été dispersés. Une deuxième infestation a eu lieu l'année suivante en Mars. Sur 12 points répartis dans la zone de stockage, les conditions ambiantes ainsi que les quantités de poudre déposées ont été suivies (plaques de suivi au sol et suspendues). Sur ces mêmes points, des essais « contrôlés » d'efficacité ont été mis en place. Pour cela 2 paires de récipients ont été déposées, une pour chaque date d'infestation (été ou printemps), dont l'une de chaque paire servant de témoin non-traité (couverte pendant le traitement). 100 insectes de chaque espèce y ont été introduits aux mêmes périodes que les lâchers d'insectes. Enfin, l'efficacité du traitement sur les insectes errants a été suivie en positionnant 1 piège de type PCTM floor traps (Insects limited) à chaque point de suivi. Ces derniers ont été relevés hebdomadairement jusqu'à ce que l'efficacité de l'essai contrôlé soit de 100%, puis mensuellement.

Les conditions ambiantes ont fortement fluctuées durant l'essai avec des températures moyennes allant jusqu'à 20°C en début d'essai, 10°C mi-octobre puis 5 et 0°C en Novembre puis Décembre. La remontée des températures n'a commencé qu'en Mars, pour atteindre 10°C fin Avril puis 15°C début Juin. Concernant l'hygrométrie des pics à 100% ont fréquemment été atteints durant les

mois d'hiver, et le niveau 65% a été ponctuellement atteint en été et au printemps.

Le suivi des quantités de terre de diatomée appliquée a permis d'observer une dose moyenne appliquée de 7,7 g/m² au sol et de 1,1 g/m² sur les parois, malgré l'objectif de 10g/m². De plus là encore une forte hétérogénéité de la répartition du produit a été constatée, la densité de produit variant au sol de 3,7 à 14,1 g/m² et sur les surfaces verticales métalliques de 0,2 à 1,3 g/m².

Les récipients à infestation contrôlée révèlent qu'en été (températures de 14,4°C à 19,3°C) 1 semaine d'exposition du Silvain à Silicosec® permet d'atteindre 100% de mortalité, contre 3 semaines pour le Charançon des grains. Au printemps suivant, ces durées s'allongent d'une semaine (températures de 7,3°C à 11,6°C), portant le délai minimum avant réception à 1 mois, toute espèce et saison confondue.

Cependant, les suivis des captures d'insectes dans l'aire de stockage contrastent avec les précédentes conclusions. En effet, une semaine après le traitement (en été) les captures indiquent une absence de charançons. Les niveaux de captures des Silvains baissent considérablement indiquant une éradication de cette espèce 2 mois plus tard. Au printemps suivant, aucun Charançon des grains n'est détecté, mais des Silvains subsistent. Après le second lâcher d'insectes, au printemps, **2 mois d'exposition permettent de diminuer significativement le nombre de captures des 2 espèces mais n'entraînent pas une mortalité totale.**



Figure 6 : Emissions de particules lors d'un traitement des locaux avec Silicosec®.
Source : (Cook, Collins, et Collins 2004)

Plusieurs aspects, mentionnés par les auteurs de l'étude, sont à souligner. Tout d'abord, lors de l'application de Silicosec® en poudre de fortes émissions de particules ont été constatées (Cf. Figure 6), formant un brouillard assez épais pour diminuer la visibilité. Ainsi, l'application ayant durée plus de 2h le port d'une protection respiratoire semble indispensable, et le port de lunettes de protection préférable. Ensuite, il a été noté qu'une quantité non-négligeable d'insectes

lâchés sont morts avant même l'application du produit, ce qui permet de penser que le seul effet du nettoyage approfondi des locaux permet de réduire significativement le niveau des populations présentes. Enfin, la différence de réponse des insectes entre les essais réalisés sur le terrain et ceux réalisés en laboratoire demande d'appréhender les résultats de ces derniers avec précaution.

A retenir : Efficacité de Silicosec® en traitement des locaux

Ces études traitant de l'efficacité et la qualité de l'application de Silicosec® lors d'un traitement des locaux de stockage permettent d'aboutir aux recommandations pratiques suivantes (Cook, Collins, et Collins 2004) :

- 1) Nettoyer les locaux de manière approfondie
- 2) Appliquer la formulation de terre de diatomée Silicosec® au minimum un mois et de préférence 2 mois avant réception du grain. A titre de comparaison, en Australie la formulation Dryacide® est appliquée en traitement des locaux après nettoyage, 6 semaines avant réception du grain (Allen 2000)
- 3) Appliquer à l'aide d'un atomiseur compatible poudrage
- 4) N'appliquer la terre de diatomée sous forme de suspension liquide que si nécessaire (parois métalliques verticales, nécessité absolue de limiter les émissions de poussières etc.)
- 5) Veiller à conserver par agitation la terre de diatomée en suspension dans l'eau durant le traitement
- 6) Allonger la durée de traitement en cas de pulvérisation d'une suspension liquide
- 7) Toujours porter une protection respiratoire adaptée, et y ajouter de préférence une protection oculaire

Nicolas BAREIL

n.bareil@arvalisinstitutduvegetal.fr

VI. Conclusion

La terre de diatomée est une des solutions disponibles pour lutter contre les insectes au stockage. Elle l'est maintenant en France avec la formulation Silicosec® de la société Allemande Biofa AG. Sauf à traiter l'ensemble d'un lot à forte dose, la terre de diatomée n'est pas adaptée pour un traitement curatif, elle est davantage un outil de protection préventive des infestations (Z. Korunić et Mackay 2000). Il s'agit d'un levier efficace dans certaines conditions d'utilisation (températures élevées et faible humidité), qui ne doit pas être utilisé seul mais en combinaison avec d'autres mesures au sein d'une stratégie de Protection Intégrée : nettoyage préalable pour un traitement des locaux ou aération de la masse grain pour un traitement par couche. Enfin il faut garder à l'esprit que ce type de traitement reste relativement onéreux, son prix allant de 7,5 à 10€/Kg.

Dates à retenir

Formations

Maîtriser le stockage et la conservation des grains en organismes stockeurs ou à la ferme

Intervenant : Jean-Yves MOREAU

16/11/2016 – Boigneville (91)

Contact : Marianne DEMAY

m.demay@arvalisinstitutduvegetal.fr

28/03/2017 – Ecardenville-la-Campagne (27)

Contact : Josseline Jean

j.jean@arvalisinstitutduvegetal.fr

Optimiser le séchage du maïs

07/03/2017 – Boigneville (91)

Intervenant : Amandine BONNERY

Contact : Marianne DEMAY

m.demay@arvalisinstitutduvegetal.fr

Maîtriser l'aéraulique pour optimiser la consommation énergétique lors de la ventilation des grains

25 et 26/04/2017 – Boigneville (91)

Intervenant : Jean-Yves MOREAU et Services Coop de France

Contact : formation@servicescoopdefrance.coop

VII. Bibliographie

- Allen, Sylvia. 2000. « Integration of inert dust into control of storage pest in bulk grain in storage in Australia ». <http://www.ftic.co.il/2000FresnoPDF/28.pdf>.
- Baldassari, Nadia, et Antonio Martini. 2014. « The efficacy of two diatomaceous earths on the mortality of *Rhyzopertha dominica* and *Sitophilus oryzae* ». *Bulletin of Insectology* 67 (1): 51–55.
- Ciesla, Y, et B Guery. 2014. « EFFICACITE DE LA TERRE DE DIATOMÉES MELANGÉE AUX GRAINS POUR LA LUTTE CONTRE LE CHARANCON DU RIZ ». In . MONTPELLIER.
- Cook, D. A., D. A. Collins, et L. E. Collins. 2004. « Efficacy of diatomaceous earths, applied as structural treatments, against stored product insects and mites ». *HGCA PROJECT REPORT*.
- Cook, D. A., et others. 2003. « The efficacy of high temperature and diatomaceous earth combinations against adults of the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) and the grain weevil *Sitophilus granarius* (Coleoptera: Curculionidae) ». In *The BCPC International Congress: Crop Science and Technology, Volumes 1 and 2. Proceedings of an international congress held at the SECC, Glasgow, Scotland, UK, 10-12 November 2003.*, 445–450. British Crop Protection Council.
- Fields, Paul G. 1998. « Diatomaceous earth: Advantages and limitations ». In *Proceedings of the 7th international working conference on stored-product protection*. Vol. 1. <http://home.cc.umanitoba.ca/~fieldspg/fields/fields-DE-1998.pdf>.
- Fields, Paul, et Zlatko Korunic. 2002. « Post-harvest insect control with inert dusts ». *Encyclopedia of Pest Management* 48: 650–653.
- IARC, éd. 1997. Silica, some silicates, coal dust and para-aramid fibrils. 68. Lyon: World Health Organization.
- Korunic, Z., et Peter Ormesher. 1998. « Evaluation and standardised testing of diatomaceous earth ». In *Proceedings of the Seventh International Working Conference on Stored-product Protection*, 14–19.
- Korunic, Zlatko. 1998. « Diatomaceous earths, a group of natural insecticides ». *Journal of Stored Products Research* 34 (2): 87–97.
- Korunić, Zlatko Korunić, Vlatka Rozman, Anita Liška, et Pavo Lucić. 2016. « A review of natural insecticides based on diatomaceous earths ». *POLJOPRIVREDA* 22 (1): 10–18.
- Korunić, Zlatko, et Andrew Mackay. 2000. « Grain surface-layer treatment of diatomaceous earth for insect control ». *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* 51 (1): 1–11.
- Le Patourel, G. N. J., M. Shawir, et F. I. Moustafa. 1989. « Accumulation of mineral dusts from wheat by *Sitophilus oryzae* (L.)(Coleoptera: Curculionidae) ». *Journal of stored products research* 25 (2): 65–72.
- Mewis, I., et Ch Ulrichs. 2001. « Action of amorphous diatomaceous earth against different stages of the stored product pests *Tribolium confusum*, *Tenebrio molitor*, *Sitophilus granarius* and *Plodia interpunctella* ». *Journal of Stored Products Research* 37 (2): 153–164.
- Quarles, William. 1992. « Diatomaceous earth for pest control ». *IPM Practitioner* 14 (5/6): 1–11.
- Rigaux, Marilyn, Eric Haubruge, et Paul G. Fields. 2001. « Mechanisms for tolerance to diatomaceous earth between strains of *Tribolium castaneum* ». *Entomologia Experimentalis et Applicata* 101 (1): 33–39.
- Schöller, M., et Ch Reichmuth. 2010. « Field trials with the diatomaceous earth SilicoSec® for treatment of empty rooms and bulk grain ». *Julius-Kühn-Archiv*, n° 425: 899.
- Shayesteh, N., et Mahsomeyeh Ziaee. 2007. « Insecticidal efficacy of diatomaceous earth against *Tribolium castaneum* (Herbst)(Coleoptera: Tenebrionidae) ». *Caspian Journal of Environmental Sciences* 5 (2): 119–123.
- Vayias, B.J., et C.G. Athanassiou. 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 (7): 565–73. doi:10.1016/j.cropro.2003.11.006.
- Vincent, Charles, Bernhard Panneton, et Francis Fleurat-Lessard. 2001. *Physical control methods in plant protection*. Springer Science & Business Media. https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=DQNJCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=physical+control+methods+in+plant+protection&ots=3tb3WeN3lr&sig=0yNsRbrJx2kF1NiMm9_EFC6cHLO.
- Ziaee, Masumeh, et Adel Khashaveh. 2007. « Effect of five diatomaceous earth formulations against *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae), *Oryzaephilus surinamensis* (Coleoptera: Silvanidae) and *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrychidae) ». *Insect Science* 14 (5): 359–365.
- Ziaee, Masumeh, Mohammad Hasan Safaralizadeh, et Nouraddin Shayesteh. 2006. « Effects of temperature and exposure interval on the toxicity of Silico Sec® against two stored products insects ». *Pakistan Entomologist* 28 (1): 45–50.