



## SOMMAIRE

Un microonde au silo pour éliminer les insectes des grains : une démonstration concluante sur la plateforme expérimentale d'ARVALIS ..... Pages 1 - 7

Peut-on quantifier des alcaloïdes dans un lot de blé sans sclérotés ? ..... Pages 8 - 10



**INSCRIVEZ-VOUS**

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

<https://www.arvalis.fr/contacter-arvalis>

## UN MICROONDE AU SILO POUR ÉLIMINER LES INSECTES DES GRAINS : UNE DÉMONSTRATION CONCLUANTE SUR LA PLATEFORME EXPÉRIMENTALE D'ARVALIS

► *GRANlonde, une étude pilote de désinsectisation conduite en partenariat par ARVALIS et SAIREM, expert français dans la conception de microondes industriels*

La pression en insectes dans les silos est forte et les opérateurs sont parfois démunis pour maîtriser une population en cours de prolifération. En effet, les enquêtes menées par ARVALIS et FranceAgriMer montrent que seuls 35 % des 650 échantillons collectés en coopératives et négoce étaient dépourvus d'insectes vivants (ARSAN, 2022 et 2023). Les contraintes de logistique et la difficulté à mettre en œuvre un vide sanitaire systématique entretiennent inévitablement des réservoirs d'insectes sur les sites. Refroidir au plus vite les grains est alors déterminant puisque la vitesse de développement des populations d'insectes est exponentielle. Néanmoins, les performances de ventilation sur certains sites, couplées à la baisse d'offre climatique rendent difficile la « sécurisation des lots » vis-à-vis du développement d'insectes en début de campagne.



C'est pourquoi ARVALIS a voulu explorer la lutte électromagnétique par microonde, jusqu'ici délaissée dans les silos au profit des insecticides conventionnels (ratio coût / efficacité). Ce levier semble intéressant pour répondre au manque de solutions alternatives de lutte curative au silo, en particulier contre les espèces à formes cachées (charançons et capucins), dont les formes juvéniles ne peuvent être extraites par un simple passage au nettoyeur-séparateur. Pour conduire des tests avec cette technologie, SAIREM spécialiste français des microondes, a souhaité mettre à profit son savoir-faire pour adapter une machine pilote de traitement des grains au silo. Le projet GRANlonde, a reçu une subvention de l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre d'Ecophyto Maturation (ANR 23 ECOM 0005) et a été co-financé par l'Office français de la Biodiversité via la redevance pour pollution diffuse au titre du plan Ecophyto. Cette étude de 2 ans (avril 2024-mars 2026) visait à produire des références sur l'intérêt et la faisabilité des traitements par chauffage microonde des grains, à une échelle pilote au silo.

### L'efficacité insecticide des températures élevées n'est plus à démontrer ...

La sensibilité à la chaleur des ravageurs des céréales stockées est bien documentée (Fields, 1992). Les températures sont létales dès 45 °C, d'autant plus rapidement que la température est élevée. Au-delà de son intensité, plusieurs facteurs influencent 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, le capucin des grains *Rhyzopertha dominica* et le petit silvain plat *Cryptolestes ferrugineus* sont considérées comme les plus tolérantes à la chaleur (Dermott et Evans, 1978). Le charançon du riz *Sitophilus oryzae* présente une résistance à la chaleur intermédiaire. Les paramètres de traitement (température, débit d'air spécifique, durée de traitement) nécessaires à la désinsectisation du grain en séchoir ont été étudiés par ARVALIS (2014).

Le chauffage diélectrique par radiofréquences ou microondes permettrait d'atteindre la même efficacité insecticide que le chauffage conventionnel plus rapidement, et avec un impact moindre sur la teneur en eau des grains (Nelson et al., 1998 ; Yadav et al., 2014). Toutefois, l'impact sur la qualité des produits après traitement n'a été que peu documenté (Wang et Tang, 2001).

## ► L'étude GRANlonde a nécessité des aménagements matériels sur la plateforme expérimentale d'ARVALIS

Une tour modulaire<sup>1</sup> constituée de 3 niveaux de plateformes a été conçue et installée afin de pouvoir intégrer des équipements temporairement dans le circuit des grains préexistant (Figure 1). Le micro-onde SAIREM est le premier équipement testé sur cette nouvelle structure. Parmi les modèles d'applicateurs d'ondes conçus par SAIREM, c'est une colonne de descente gravitaire qui semblait la plus adaptée à un produit granulaire, car cela permet d'avoir une « couche » de produit chauffée constante et évite les espaces d'air permettant aux insectes d'échapper à la montée en température du produit. Cette colonne positionnée au 1<sup>er</sup> niveau de la tour matérielle était alimentée par un transporteur à chaîne en amont, et un tapis roulant en sortie de colonne permettait de réguler le débit des grains. Le grain continuait ensuite son chemin vers l'élévateur le plus proche, ou bien était prélevé directement dans un conteneur sous le tapis.

L'exposition des grains aux ondes était de seulement quelques secondes, au niveau du centre de la colonne sur laquelle était raccordé un guide d'ondes métallique (Figure 2), permettant de conduire les ondes, depuis le générateur (54 kW) posé au pied de la tour. La fréquence de microondes choisie était celle de 915 MHz (plutôt que 2,45 GHz) pour limiter le coût du générateur en vue du marché du stockage de grains.



**L'installation matérielle pilote est visualisable dans la vidéo de présentation de l'étude GRANlonde sur la chaîne ARVALIS TV ou en cliquant ici.**



**Figure 1 : Tour modulaire pour le test d'équipements temporaires sur la plateforme d'ARVALIS**



**Figure 2 : Colonne d'application microonde de SAIREM intégrée à la tour d'essai d'ARVALIS**

Durant le fonctionnement, la température des grains et l'élévation de température sont mesurées en continu dans la colonne à microondes. Le pilotage de la machine se fait à partir de l'écran du générateur, en indiquant une consigne de température pour une régulation automatique en fonction de la température mesurée en sortie de colonne. L'élévation de température du produit chauffé pour une puissance incidente donnée de microondes dépend de différents facteurs comme la température initiale du lot et sa teneur en eau, ou encore le débit de traitement.

<sup>1</sup> Financée par Plant2Pro® Institut Carnot dans le cadre de son appel à projets 2023. Plant2Pro® est soutenu par l'ANR (convention #23-CARN-0024-01)

▶ *GRANlonde a mis en évidence une désinsectisation complète des grains infestés avec des charançons du riz, grâce aux microondes*

Différentes intensités de traitement ont été testées pour trouver le meilleur compromis entre efficacité insecticide et préservation de la qualité des grains : chaque modalité était définie par une température cible et un débit de grains dans la tour (Tableau 1). Ces évaluations ont d’abord été conduites sur du blé tendre Prestance de la moisson 2024 (12,4 % de teneur en eau initiale, poids spécifique de 80,1 kg/hl et 10,4 % MS de teneur en protéines en moyenne).

**Tableau 1 : Modalités de chauffage micro-ondes des grains de blé tendre**

	Débit 1,4t/h	Débit 2,1t/h
Température grains 60 °C	T60 d	T60 D
Température grains 70 °C	T70 d	T70 D
Température grains 80 °C	T80 d	T80 D <sup>2</sup>

Pour chaque intensité de chauffage testée, 3 répétitions étaient conduites sur un flux de blé sain (pour les évaluations de qualité), entrecoupé par une quantité de blé infesté avec des charançons du riz (pour les évaluations insecticides), sans arrêt du fonctionnement de l’application d’ondes entre les blés sains/infestés (le microonde ne doit jamais fonctionner à vide). Cette alternance rapide était permise par l’installation de 2 trémies en amont du microonde, une principale pour le blé sain et une annexe, plus petite, pour déverser les fûts infestés avec tous les stades de charançons du riz (Figure 3).



**Figure 3 : Chargement du blé infesté au sommet de la tour comportant la colonne microonde**



**Figure 4 : Echantillonnage à la canne sonde dans un fût de blé infesté par des charançons du riz**

Chaque fût comportait 80 kg de blé infesté 9 semaines avant le traitement, avec une densité initiale de 10 insectes/kg. La population s’est ensuite multipliée, atteignant une densité moyenne très élevée de 571 insectes adultes /kg lors de l’exposition des grains infestés aux microondes. Un échantillonnage (5 prélèvements à la canne sonde, cf. Figure 4) a été réalisé juste avant chauffage des grains (noté prélèvement « Av », pour évaluer la mortalité naturelle moyenne dans le fût), puis 15 minutes après chauffage (prélèvement « Ap »). Ces échantillons d’environ 1 kg ont été tamisés pour extraire et dénombrer les charançons adultes vivants et morts. Puis ils ont été incubés (à 25 °C et 70 % d’humidité relative) durant 42 jours pour évaluer l’efficacité sur les stades juvéniles cachés dans les grains, sensés émerger des grains durant cette période.

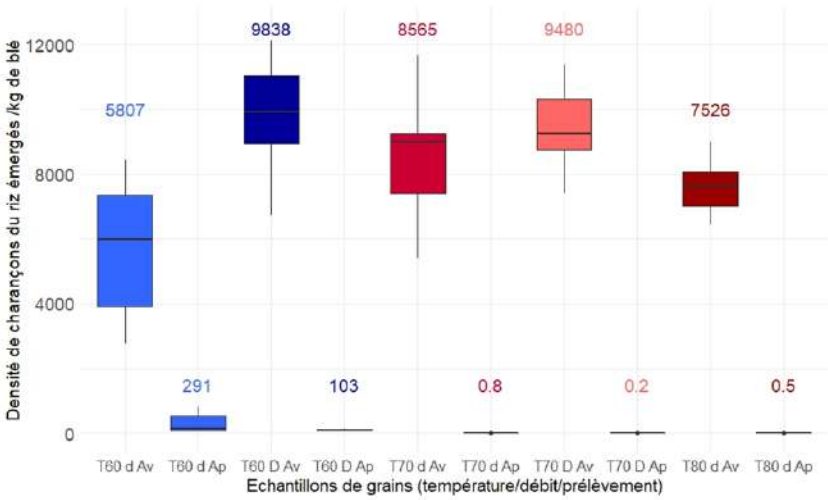
<sup>2</sup> La modalité la plus intense (80 °C) à grand débit (2,1t/h) initialement prévue n’a pas pu être mise en œuvre compte-tenu de la capacité de puissance du générateur utilisé et de la température initiale des grains.

Les taux de mortalité dans les échantillons n'ayant pas été chauffés (prélèvements « Av ») sont tous inférieurs à 2 %, ce qui correspond à une mortalité naturelle acceptable (méthode CEB 106) et permet de valider les résultats d'évaluation d'efficacité insecticide menée sur blé. Une efficacité insecticide totale sur les adultes a été constatée pour toutes les modalités avec une température consigne d'au moins 70 °C, quel que soit le débit de travail (Figure 5). Une élimination partielle des adultes (>94 %), a été observée dans les échantillons chauffés à 60 °C.

L'efficacité du chauffage microondes sur les formes juvéniles de charançons s'est avérée similaire à celle sur adultes (Figure 6). En effet, quasiment aucun insecte n'a émergé dans les échantillons chauffés à 70 °C ou plus. Parmi les rares individus émergés trouvés, seuls 2 étaient vivants. En revanche, une élimination incomplète de la descendance a été constatée dans l'ensemble des échantillons issus des prélèvements sur blé chauffé à 60 °C, avec des densités de charançons émergés importantes (entre 103 et 291 insectes/kg de blé). Cela correspond à une densité fortement réduite par rapport aux niveaux d'insectes dans les échantillons témoins non chauffés (entre 5 000 et 10 000 insectes/kg), néanmoins cette densité reste trop élevée pour une méthode de lutte curative visant à préserver les grains durant les semaines de stockage restantes d'un lot. La consigne de 60 °C semble donc insuffisante pour désinsectiser totalement le blé.



**Figure 5 : Mortalités des charançons adultes dans les prélèvements de blés effectués avant ou après passage dans le microonde, pour les différentes modalités de chauffage testées (température / débit)**



**Figure 6 : Densités de charançons émergés dans les prélèvements de blés effectués avant ou après passage dans le microonde, pour les différentes modalités de chauffage testées (température / débit)**

Les élévations de température mesurées dans les grains sont données dans le tableau 2.

**Tableau 2 : Elévations moyennes de température mesurées sur blé et écarts avec la consigne du générateur**

Modalité	Température moyenne des grains en entrée (°C)	Température moyenne des grains en sortie (°C)	Elévation de température moyenne (°C)	Ecart moyen avec consigne (°C)
T70 d	20.6	73	52.3	3
T80 d	18.2	79.3	61.1	-0.7
T60 d	17.4	60.2	42.7	0.2
T70 D	15.6	64.9	49.3	-5.1
T60 D	15	55.7	40.7	-4.3

Deux des intensités testées sur blé tendre ont été répétées sur de l'orge RGT Planet (teneur en eau initiale de 13,1 %, poids spécifique de 60,8 kg/hl et teneur en protéines de 10,1 % MS) : une modalité « optimale » pour désinsectiser tout en préservant les qualités des grains et une modalité « intense » pour tester les éventuels impacts du microonde sur la qualité (Tableau 3).

Tableau 3 : Modalités de chauffage ayant été reproduites sur orge

	Débit (t/h)	Température consigne (°C)	Notation
Modalité « optimale »	2.1	70	T 70 D
Modalité « intense »	1.4	80	T 80 d

Une efficacité insecticide totale sur les adultes a été constatée pour les deux modalités reproduites sur orge, confirmant les observations sur blé, c’est-à-dire une efficacité totale avec une température consigne de 70 °C a minima. Seul un charançon vivant a été observé dans l’ensemble des échantillons chauffés aux deux intensités puis incubés durant 42 jours, alors que plus de 4 000 charançons par kilogramme d’orge ont été dénombrés dans les témoins.

► Les qualités du blé sont préservées pour tous ses débouchés...

Pour chaque intensité de chauffage testée, une partie du lot correspondant aux grains dépourvus d’insectes était collectée, refroidie à 20 °C (par ventilation à l’air ambiant) puis échantillonnée, avant et après chaque chauffage micro-onde afin de suivre l’évolution potentielle de divers critères physiques et technologiques des grains. Pour chaque critère étudié, un test de comparaison de moyennes pour données appariées a été effectué afin de déterminer si le chauffage (toutes modalités confondues) avait un effet significatif sur le critère qualité étudié (Tableau 4).

Tableau 4 : Evolutions moyennes constatées sur divers critères qualités mesurés sur le blé tendre avant et après chauffage, toutes modalités confondues (les p-values sont celles résultantes des tests de comparaison de Student ou Wilcoxon)

Critère (unité)	Moyenne initiale blé PRESTANCE	Moyenne finale blé PRESTANCE	Impact du chauffage
Teneur en eau (%)	12,4	12,0	Oui (p-value=3,23.10-6)
Teneur en protéines (%MS)	10,3	10,2	Non (p-value=0,08)
Poids spécifique (kg/hl)	80,8	80,2	Oui (p-value=1,31.10-7)
TCH (s) temps de chute de Hagberg	390,7	394,1	Non (p-value=0,483)
P (mm) ténacité	94,6	89,5	Oui (p-value=2,77.10-3)
W (10-4J) force boulangère	195,7	189,9	Non (p-value=0,127)
Ie (%) Indice d’élasticité	48,4	48,5	Non (p-value=0,717)
G Indice de gonflement	16,8	17,1	Non (p-value=0,912)
L (mm) Paramètre d’extensibilité	57,2	59,7	Non (p-value=0,15)
P/L rapport	1,66	1,51	Oui (p-value=0,0301)
Taux d’extraction de la farine (%)	70,4	70,6	Non (p-value=0,5)

Le premier critère impacté de manière significative par le passage du blé au microonde est la teneur en eau avec une perte moyenne de 0,4 %. La comparaison des pertes de teneur en eau moyennes observées pour chaque intensité de chauffage, montre une perte en eau des blés significativement plus élevée (>0,5 %) avec les modalités 70 °C et 80 °C à 1,4t/h, par rapport aux intensités les plus faibles (60 °C à 1,4 et 2,1t/h) pour lesquelles une perte inférieure à 0,3 % est observée (Figure 7).

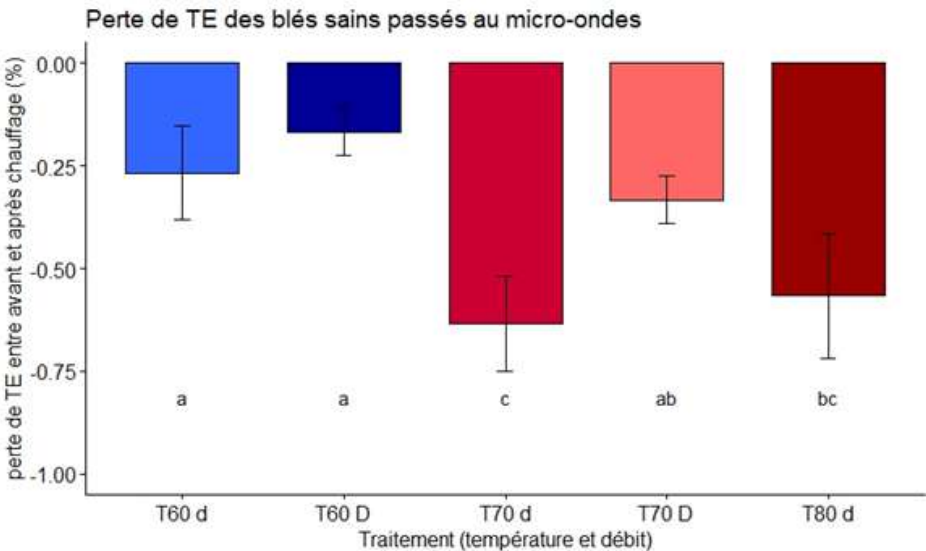


Figure 7 : Pertes de teneur en eau moyennes selon l’intensité du chauffage microonde (les lettres définissent les groupes homogènes d’après le test de comparaison de Tukey)

Le deuxième critère physique significativement impacté par le passage du blé au microonde est le poids spécifique. Une baisse significative de ce critère a été constatée sur les grains chauffés (Tableau 4), de l'ordre de 0,6 kg/hl. Si l'on compare les diminutions de poids spécifiques entre intensités de chauffage grâce à une analyse de variance, aucun effet significatif de l'intensité du chauffage n'est révélé. Autrement dit, la diminution de poids spécifique ne semble pas fonction de l'intensité du chauffage microonde. Compte-tenu de la perte de teneur en eau des grains observée à la suite du chauffage, une augmentation de leur poids spécifique aurait pourtant été attendue.

Des variations significatives ont été observées sur deux critères technologiques de la meunerie, le paramètre de

ténacité P et le rapport ténacité/extensibilité P/L (Tableau 4). Les faibles variations observées sur ces paramètres ne sont toutefois pas de nature à modifier l'aptitude du blé à la transformation en meunerie ou en boulangerie.

Des tests de panification de type pain courant français ont également été conduits sur des échantillons chauffés à 2 intensités (T70 D et T80 d), par comparaison avec un témoin non chauffé. L'évaluation conduite par le boulanger d'essai d'ARVALIS a livré des notes très similaires pour les pâtes, les mies et les pains correspondant aux 3 modalités. La note globale obtenue était de 262/300 pour chaque modalité, démontrant l'absence d'un impact du chauffage des blés pour la panification.

### Le chauffage par microondes a-t-il un impact sur la valorisation du blé en alimentation animale ?

Un essai de performances de croissance chez le jeune poulet a été conduit sur 24 groupes de 6 animaux (8 répétitions par aliment), pour comparer 3 aliments formulés à partir de deux lots de grains chauffés (T70 D et T80 d) et à partir de grains non chauffés par microonde. Les consommations d'aliment, le gain de poids et l'indice de consommation de chaque poulet ou groupe de poulets ont été suivis à la station expérimentale d'ARVALIS de Villerable.



La consommation d'aliment entre 7 et 21 jours n'était pas significativement différente (p-value = 0,614) selon l'aliment donné aux poulets, et normal pour le stade physiologique de ces poulets (1 030 g). Aucune différence significative entre traitements n'a été mise en évidence non plus pour l'indice de consommation des poulets (p-value = 0,442). Il était de 1,35 environ chez les poulets entre 7 et 21 j. Si les gains de poids vifs des poulets étaient similaires entre 7 et 14 j, ceux des poulets nourris avec l'aliment à base de blé chauffé à la plus grande intensité (80 °C) étaient significativement inférieurs à ceux des témoins entre 14 et 21 j. En revanche, ceux des poulets nourris avec l'aliment à base de blé chauffé à l'intensité intermédiaire (70 °C) étaient similaires aux témoins.

En définitive, s'il n'est pas excessif mais suffisant pour désinsectiser les grains traités, le chauffage électromagnétique n'aura pas d'impact négatif sur les performances des animaux (démonstré sur volailles ici).

### ► L'énergie germinative de l'orge est un paramètre sensible rendant délicate l'utilisation des microonde pour la filière brasserie

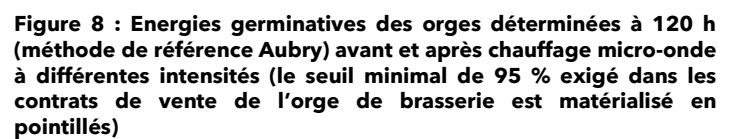
L'évolution de certains critères qualité a aussi été suivie sur les orges chauffées selon 2 intensités (Tableau 3).

Les deux critères ayant montré une variation significative avant et après chauffage microonde sont la teneur en eau et le poids spécifique de l'orge (Tableau 6).

**Tableau 6 : Evolutions moyennes constatées sur divers paramètres mesurés sur l'orge avant et après chauffage, toutes modalités confondues (les p-values sont celles résultantes des tests de comparaison de Student ou Wilcoxon)**

Critère (unité)	Moyenne initiale orge PLANET	Moyenne finale orge PLANET	Impact du chauffage
Teneur en eau (%)	13,2	12,1	Oui (p-value= 0,00243)
Teneur en protéines ( %MS)	10,6	10,7	Non (p-value=0,137)
Poids spécifique (kg/hl)	62,2	61,3	Oui (p-value= 3,3.10-5)

L'énergie germinative est un paramètre très important pour l'orge destinée à la brasserie. En effet, un seuil de 95 % est attendu d'après l'addendum technique pour la vente des orges de brasserie. Un effet significatif du chauffage a été observé sur ce critère (p-valeur égale à 0,0313). A 120 h (seule observation prise en compte dans les contrats), les énergies germinatives des grains d'orge chauffés étaient inférieures à 95 % (Figure 8). Désinsectiser l'orge de brasserie par microonde semble plus délicat que le blé tendre pour préserver sa valeur marchande en cas de débouché brassicole, à moins d'accepter une désinsectisation incomplète mais de l'ordre de 95 % avec une température de chauffe plus faible, à 60 °C.



Le coût de fonctionnement du chauffage des grains par microondes a été évalué de 5,9 à 9,4 €/t. A titre de comparaison, la consommation de gaz nécessaire pour la thermo-désinsectisation avec un séchoir à recirculation (air chaud à 70 °C en sortie et durée d'exposition de 100 minutes), avait été estimée à 5.96 kg de propane soit un coût d'environ 13,7 €/t chauffée (en considérant un prix unitaire de 2,30 €/kg de propane).

## Références bibliographiques

- 7

Dans l'Union Européenne, la protection des consommateurs vis-à-vis des alcaloïdes de l'ergot est obtenue par l'instauration de seuils sur la présence de sclérotés dans les lots de céréales avant transformation et sur la présence d'alcaloïdes sur les produits transformés <sup>i</sup>. Ce double seuil est justifié par le fait que la relation entre masse de sclérotés et teneur en alcaloïdes n'est pas parfaitement linéaire, en particulier pour les faibles teneurs en sclérotés ou en alcaloïdes. En effet, lorsque les teneurs en alcaloïdes sont inférieures à 350 µg/kg de grains, celles-ci ne sont corrélées ni à la masse, ni au nombre de sclérotés présents dans l'échantillon <sup>ii</sup>. Cette observation s'explique d'abord par la grande variabilité observée de la teneur en alcaloïdes des sclérotés (de 57 µg/kg à 36 385 µg/kg) et de leur masse (de 2 mg à 60 mg) <sup>iii</sup>, mais une autre hypothèse est avancée : le fait que la manipulation des céréales brise les sclérotés, générant une poussière d'ergot, qui est ensuite adsorbée sur les grains de céréales. Ainsi, il se pourrait que même en absence de sclérotés, il soit possible de quantifier des alcaloïdes.

Peu de travaux scientifiques permettent toutefois d'étayer cette hypothèse. Un travail réalisé par une équipe allemande montre que des alcaloïdes peuvent être mesurés dans des farines produites à partir de blé tendre initialement contaminé en sclérotés mais duquel tous les sclérotés auraient été éliminés par nettoyage <sup>iv</sup>. La répartition des alcaloïdes dans les différentes farines de passage illustrerait une contamination par contact entre la

surface du blé et les sclérotés. À l'inverse, Fajardo et al. (1995) ont écarté cette possibilité et concluent à l'absence de possibilité de transfert <sup>v</sup>.

Afin d'étudier la possibilité de transfert d'alcaloïdes lors de la manipulation des céréales, nous avons cherché à reproduire en laboratoire des mouvements de grains contenant des sclérotés volontairement introduits pour l'essai et mesuré l'attrition de ces sclérotés. Nous avons utilisé un lot de blé tendre récolté sur la ferme de Boigneville (récolte 2024), stocké à la PFMG et nettoyé avant stockage à l'aide d'un nettoyeur Denis NSD2 (grilles criblages 2.1\*20 et Ø 3, grilles émottage 4.5\*20 et 4.0\*20). Ces 50 kg ont été échantillonnés avec 2 prélèvements élémentaires pour constituer un échantillon qui a été adressé au laboratoire de Capinov pour vérifier l'absence d'alcaloïdes dans ce lot. Nous avons ensuite constitué 32 sous-lots de 1kg puis contaminé ces sous-lots à l'aide de sclérotés récupérés dans des échantillons de la récolte 2024 réceptionnés au laboratoire d'ARVALIS ou de FranceAgriMer. Pour chaque contamination, les sclérotés sont dénombrés et pesés sur une balance de précision (portée 220 g, précision 0,0001 g). Le mouvement de grain est simulé à l'aide d'une mélangeuse Chopin MRL2 (Figure 1 et Figure 2). Une fois le mouvement de grains réalisé, les sclérotés introduits sont extraits manuellement, comptés puis pesés. L'échantillon de blé sans ses sclérotés est expédié au laboratoire Capinov pour mesure de la teneur en alcaloïdes.

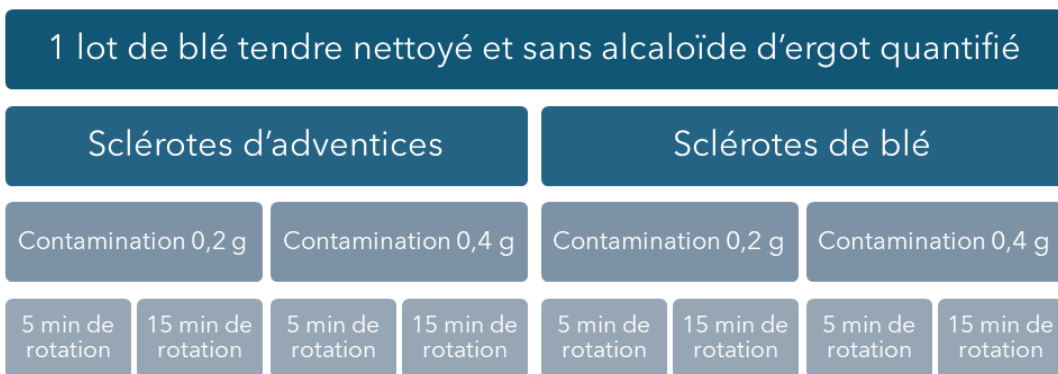


Figure 1 : Mélangeuse Chopin MR2L

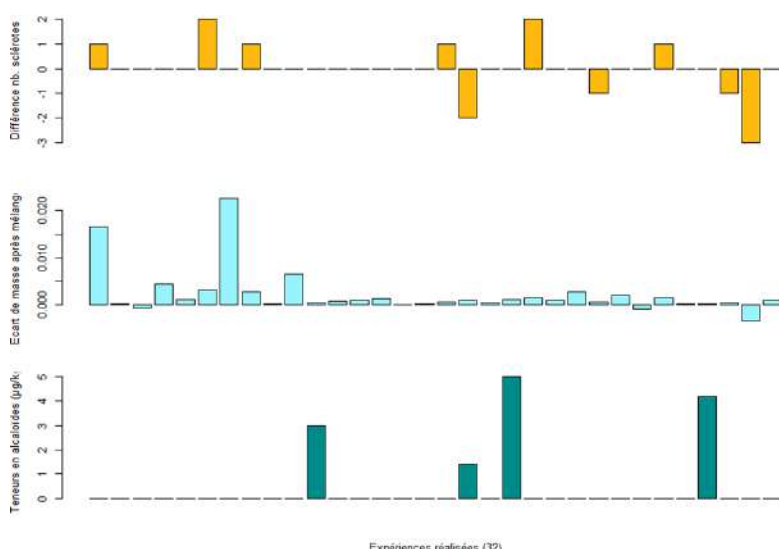


Figure 2 : Bouteille pour la mélangeuse avec vis de fermeture

Trois facteurs sont étudiés : la durée du mouvement (5 ou 15 min), le type de sclérotés (sclérotés d'adventice ou de céréale cultivée), la masse de sclérotés introduite (0,2 g ou 0,4 g). Chaque combinaison de ces modalités est répétée 4 fois, ce qui conduit à réaliser 32 expériences (Figure 3).



**Figure 3 : Plan d'expériences mis en œuvre. Chaque expérience est reproduite 4 fois, soit un total de 32 expériences**



Dès la première expérience, nous avons extrait de l'échantillon un sclérote de plus qu'introduit : le lot de départ, dont l'analyse sur la base d'un échantillonnage n'avait révélé ni sclérotés ni alcaloïdes, contenait en fait des sclérotés. Par la suite, une inspection visuelle attentive de chaque kg de blé mis en œuvre avant contamination par les sclérotés a été effectuée afin de s'assurer de l'absence initiale de sclérotés. Malgré cela, dans 6 expériences sur 32, nous avons retrouvé plus de sclérotés que nous en avons introduits. A l'inverse, dans 4 expériences, nous n'avons pas réussi à retrouver et à extraire tous les sclérotés introduits initialement dans l'échantillon (Figure 4).

**Figure 4 : Différence de nombre de sclérotés retrouvés et introduits, écart de masse des sclérotés après mouvement du grain, teneurs en alcaloïdes des échantillons après extraction des sclérotés pour chaque expérience.**



Compte tenu des incertitudes sur la présence de sclérotés avant contamination dans les échantillons de blé tendre, la base de données initiale a été nettoyée des 10 données aberrantes pour la variable « Ecart de nombre de sclérotés » (voir paragraphe précédent) et de 4 données statistiquement aberrantes au regard de l'écart de masse constatée. Ils restent donc les données relatives à 18 expériences sur les 32 réalisées pour réaliser l'analyse statistique. La comparaison des écarts de masse des sclérotés avant et après mélange est effectuée à l'aide d'un test de Student. La différence de masse moyenne est de +0,0004 g, ce qui traduit une augmentation de la masse des sclérotés après mélange, ne confirmant donc pas l'hypothèse d'attrition. La différence avant/après est significative (t-test,  $p=0,0167$ ), l'effet est modéré ( $d \text{ Cohen}=-0,626$ ).

4 échantillons ont présenté une teneur en alcaloïdes quantifiable, la teneur maximale étant de 5  $\mu\text{g/kg}$ , soit très éloignée des seuils réglementaires sur les produits céréaliers (100 à 150  $\mu\text{g/kg}$  selon la teneur en cendres des produits de mouture du blé). La présence d'alcaloïdes dans le blé ne doit pas nécessairement être interprétée comme un transfert via la poussière, en raison, on l'a vu, de la forte incertitude concernant l'absence de sclérote dans l'échantillon initial. Par ailleurs, concernant l'expérience 18, deux sclérotés manquaient lors de l'extraction après mélange. Pour les trois autres échantillons dans lesquels des alcaloïdes ont pu être quantifiés (expériences 11, 20 et 29), tous les sclérotés introduits ont été récupérés et la différence de masse constatée avant et après mélange est de +0,0001 g. L'attrition des sclérotés de ces échantillons ne peut donc être une explication à la présence de ces alcaloïdes.



