

# Stockage des variétés de pommes de terre industrielles: l'après CIPC

Margot Visse-Mansiaux<sup>1,2</sup>, Maud Tallant<sup>1</sup>, Fabien Curty<sup>3</sup>, Ruedi Schwärzel<sup>1</sup>, Yves Brostaux<sup>2</sup> et Brice Dupuis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

<sup>2</sup>Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, 5030 Gembloux, Belgique

<sup>3</sup>Fenaco, 3001 Berne, Suisse

Renseignements: Margot Visse-Mansiaux, margot.visse@agroscope.admin.ch et Brice Dupuis, brice.dupuis@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs11-175> Date de publication: 8. Octobre 2020



**Figure 1** | Unité expérimentale automatisée fabriquée par Agroscope et permettant de traiter les pommes de terre de manière indépendante dans une même chambre froide. (Photo: Margot Visse-Mansiaux, Agroscope)

## Résumé

Le chlorprophame (CIPC) a été le produit le plus utilisé pendant des décennies pour contrôler la germination des pommes de terre durant le stockage. Le non-renouvellement de l'homologation de cette molécule a

pris effet en janvier 2020 dans l'Union européenne. En Suisse, son utilisation est interdite depuis le 30 septembre 2020. Anticipant cette situation, Agroscope a réalisé une série d'essais pendant cinq ans, de 2015 à 2020, afin de trouver des alternatives au CIPC pour le stockage des variétés de pomme de terre industrielles. L'efficacité de cinq molécules de traitement post-récolte a été évaluée pendant au moins deux années consécutives: 1,4-diméthylnaphtalène (1,4-DMN), 3-decen-2-one, éthylène seul ou en combinaison avec le 1-méthylcyclopropène (1-MCP), L-carvone et limonène. De plus, l'efficacité de l'hydrazide maléique (HM), qui s'applique sur les plantes au champ, a également été évaluée. L'efficacité des molécules a été évaluée jusqu'à cinq ou sept mois de stockage et comparée à un témoin non traité et au CIPC. Les sucres réducteurs ont été mesurés dans l'essai visant à évaluer l'efficacité de l'éthylène seul ou en combinaison avec le 1-MCP. Les résultats montrent que toutes les molécules testées sont efficaces pour contrôler la germination, toutefois avec des niveaux d'efficacité variables selon les molécules et les conditions d'expérimentation. L'efficacité de certaines molécules (HM et éthylène) pouvait en outre varier en fonction de la variété. Nous avons aussi observé que la molécule 1-MCP permettait d'éviter l'augmentation des sucres réducteurs causée par un traitement à l'éthylène. En général, les molécules testées ne sont pas aussi efficaces que le CIPC. Leur utilisation devra être combinée avec des stratégies de stockage innovantes, afin de relever le double défi de conserver des stocks sans germes pendant plusieurs mois et d'éviter l'augmentation des sucres réducteurs.

**Key words:** potatoes, sprouting, maleic hydrazide, essential oils, synthetic molecules.

## Introduction

Le chlorprophame (CIPC) est une molécule très efficace qui a été utilisée pendant des dizaines d'années à travers le monde afin de contrôler la germination des pommes de terre pendant plusieurs mois de stockage (Paul *et al.* 2016).

Dans l'Union européenne (UE) et en Suisse, dans un souci de préserver la santé humaine et de favoriser la durabilité environnementale, l'utilisation de pesticides est soumise à de plus en plus de contraintes. Dans ce contexte, l'utilisation du CIPC vit ses derniers jours. En effet, la décision du non-renouvellement de l'homologation de cette molécule a pris effet en janvier 2020 dans l'UE (EU regulation 2019). L'utilisation des stocks de CIPC est progressivement interdite. C'est déjà le cas dans plusieurs pays européens, comme en Belgique par exemple (Martin 2020a). En Suisse, la vente du CIPC a été encore autorisée jusqu'au 15 août 2020, et la date limite d'utilisation des stocks fixée au 30 septembre 2020 (OFAG 2020). Cela signifie que la saison de stockage 2020–2021 se fera sans CIPC dans la plupart des pays européens. La Suisse pouvait théoriquement encore traiter les pommes de terre avec le CIPC en septembre 2020, mais cela n'était pas conseillé afin d'éviter les problèmes de résidus dans les tubercules et dans les cellules de stockage, en raison de la forte persistance du produit. En effet, si dans l'UE la limite maximale de résidus (LMR) pour le CIPC reste inchangée pour le moment (LMR = 10 mg kg<sup>-1</sup>) (European Commission 2019), elle devrait évoluer rapidement. Un vote est prévu en automne 2020 qui devrait avaliser une LMR temporaire de 0,4 mg kg<sup>-1</sup>, laquelle sera mise en vigueur au printemps ou à l'été 2021. Cette LMR temporaire sera encore réduite par la suite (Martin 2020a). En Suisse, l'Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV) a décidé que la LMR actuelle de 30 mg kg<sup>-1</sup> restera valable jusqu'au 1<sup>er</sup> juillet 2021 et qu'elle passera alors à 10 mg kg<sup>-1</sup>. Tout comme l'UE, la Suisse devrait ultérieurement fixer une LMR temporaire de 0,4 mg kg<sup>-1</sup>. Toutefois, la date de cette révision pour la Suisse n'est pas encore connue (Swisspatat 2020). Le CIPC est un produit qui reste longtemps dans les installations et qui s'est montré persistant dans le béton des chambres de stockage, mais aussi dans les systèmes de ventilation (Douglas *et al.* 2018; Martin 2020b). Par conséquent, il est important d'anticiper les risques de persistance du produit dans les installations. La première mesure serait de ne plus utiliser de CIPC et la deuxième serait de nettoyer les locaux de stockage afin d'enlever un maximum de résidus issus des traitements des années précédentes.

L'interdiction d'utiliser le CIPC implique un réel besoin de trouver de nouvelles solutions anti-germinatives. Plusieurs molécules à appliquer après la récolte en alternative au CIPC sont déjà sur le marché à travers le monde, telles que:

### 1,4- diméthylnaphtalène (1,4-DMN)

La molécule 1,4-DMN est une hormone naturellement présente dans les pommes de terre (Campbell *et al.* 2012). Elle est synthétisée chimiquement pour être utilisée en tant qu'anti-germinatif. Le 1,4-DMN est homologué dans dix pays d'Europe ainsi qu'aux États-Unis, au Canada, en Nouvelle-Zélande, au Mexique et au Kenya (Jina 2020). Elle vient juste d'être homologuée en Suisse (OFAG 2020). La LMR de la molécule 1,4-DMN dans les pommes de terre est fixée à 15 mg kg<sup>-1</sup> dans l'UE (European Commission 2019) et en Suisse (OSAV 2020).

### 3-decen-2-one

La molécule 3-decen-2-one est un composé biochimique naturel (EPA 2013), que l'on retrouve dans certaines espèces de champignons du genre *Boletus* et qui est autorisée comme additif alimentaire dans l'UE. Cette molécule est produite chimiquement et homologuée en tant qu'anti-germinatif aux États-Unis, au Canada et en Israël. Elle devrait être homologuée dans l'UE en 2022 (Immaraju 2018).

### Éthylène

L'éthylène est une hormone présente naturellement dans de nombreux fruits et légumes. Cette molécule est homologuée en tant qu'anti-germinatif avec différents modes de diffusion. Premièrement, avec un système appelé «Biofresh Safestore» qui utilise de l'éthylène pur à 99,95% en bouteilles sous pression. L'éthylène est libéré de manière contrôlée dans la chambre de stockage grâce à une unité de gestion de l'éthylène Biofresh (EMU) (BioFresh 2020). Ce système est proposé par la firme Biofresh (Biofresh Group Ltd.) et est homologué dans six pays d'Europe, aux États-Unis et au Japon (Caisley 2020). Deuxièmement, produit par un générateur qui transforme de l'éthanol en éthylène directement dans la chambre de stockage, ce système est proposé par la firme Restrain<sup>®</sup> Company Ltd.

Le système Restrain<sup>®</sup> est également homologué dans de nombreux pays d'Europe et notamment en Suisse où il est commercialisé par la firme Netagco (Netagco Suisse Sàrl).

**L-carvone**

L'huile essentielle de menthe, contenant essentiellement la molécule active L-carvone, est homologuée en tant qu'anti-germinatif dans 18 pays européens (dont la Suisse) ainsi qu'aux États-Unis (De Barbeyrac 2020).

**Limonène**

L'huile essentielle d'orange, qui a pour principale matière active la molécule limonène, a récemment été homologuée en tant qu'anti-germinatif aux Pays-Bas (Bonnet 2020).

**Hydrazide maléique (HM)**

Un produit à base de la molécule active hydrazide maléique et qui s'applique au champ est également disponible dans de nombreux pays, notamment en Suisse, et permet de retarder la germination au stockage (Caldiz *et al.* 2001). Cette molécule est très ancienne vu qu'elle a eu sa première homologation à la fin des années quarante (Schoene et Hoffmann 1949).

Cette recherche vise à étudier toutes les solutions de traitement alternatives au CIPC pour contrôler la germination des pommes de terre et maintenir une marchandise de qualité pendant le stockage. L'efficacité des différentes molécules précitées a été testée dans des conditions expérimentales pour certaines molécules (200 kg de pommes de terre) et dans des conditions semi-industrielles (cinq tonnes) et industrielles (>300 tonnes) pour d'autres. Les essais ont été conduits à Agroscope et/ou chez notre partenaire Fenaco.

**Matériel et méthodes****Traitement anti-germinatif au champ****Hydrazide maléique (HM)**

Nous avons testé l'efficacité de l'hydrazide maléique (HM) jusqu'à sept mois de stockage afin d'étudier l'efficacité dans le temps de cette molécule sur le contrôle de la germination au stockage. L'efficacité du HM est comparée ici à un témoin non traité et au CIPC. La germination (poids des germes issus de 25 tubercules) a été observée à trois et cinq mois de stockage à 8°C et également à sept mois de stockage après une élévation graduelle de la température de 1°C par semaine, pour atteindre 15°C après sept mois. Ce procédé d'élévation graduelle de la température est appelé «reconditionnement» dans le reste de l'article. Neuf variétés ont été testées: Agria, Bintje, Fontane, Innovator, Lady Claire, Markies, Panda, Pirol et Verdi pendant deux saisons d'essais

consécutives (2016–2017 et 2017–2018). Les tubercules traités (100 kg par produits) et les tubercules témoins (100 kg) étaient stockés dans une chambre froide à 8°C et 80 % d'humidité relative.

Les molécules ont été appliquées selon les recommandations des fournisseurs (tabl. 1).

**Traitements anti-germinatifs au stockage****1,4-DMN et 3-decen-2-one**

L'efficacité des molécules 1,4-DMN et 3-decen-2-one a été testée dans des chambres expérimentales développées par Agroscope contenant 200 kg de pommes de terre et permettant un contrôle du taux de CO<sub>2</sub>. Ces chambres expérimentales étaient placées dans une unique chambre froide à 8°C et 80 % d'humidité relative, ce qui permet de tester les molécules dans des conditions identiques de température et d'humidité (fig. 1). Les molécules ont été testées sur neuf variétés: Agria, Bintje, Fontane, Innovator, Lady Claire, Markies, Panda, Pirol et Verdi pendant deux saisons d'essais consécutives (2016–2017 et 2017–2018). Afin d'évaluer l'efficacité des molécules, une observation de la germination (poids des germes issus de 25 tubercules) a été réalisée après trois et cinq mois de stockage à 8°C sur les tubercules traités ainsi que sur un témoin non traité. L'efficacité du contrôle de la germination du 1,4-DMN et du 3-decen-2-one a été comparée à l'efficacité du CIPC et du témoin non traité.

Les molécules ont été appliquées selon les recommandations des fournisseurs (tabl. 1).

**Éthylène seul ou combiné avec le 1-MCP**

L'efficacité de l'éthylène pour contrôler la germination (poids des germes de 25 tubercules), combinées ou non avec la molécule 1-MCP (nom commercial: SmartFresh™), a également été évaluée. Ces tests ont été réalisés dans les mêmes conditions expérimentales que pour les molécules 1,4-DMN et 3-decen-2-one, et comparées à un témoin non traité. L'efficacité de ces molécules a également été comparée à celle du CIPC. Les chambres «témoin» et «CIPC» étaient placées dans une chambre froide différente des chambres «éthylène» et «éthylène + 1-MCP». L'éthylène a été diffusé dans la chambre froide grâce au système Restrainer® (Restrainer® Company Ltd.) qui diffuse 10 ppm d'éthylène dans l'atmosphère en continu (après une augmentation progressive). Étant donné que le générateur d'éthylène n'était pas installé directement dans les unités expérimentales et que celles-ci ne prélevaient pas en permanence de l'air dans la chambre froide, la concentration en éthylène dans

**Tableau 1 | Informations sur l'application des molécules testées pour la Suisse (\*informations données à titre indicatif, d'autres fournisseurs, dosages ou méthodes d'application peuvent exister).**

| Nom commercial des produits utilisés | Molécules (matière active) | Modes d'action   | Fournisseur du produit en Suisse*   | Quantité à appliquer*                                  | Fréquence des traitements*   | Date de la première application*        | Modalités d'application dans nos essais  | Délai d'attente après application du produit* | Méthode d'application                |
|--------------------------------------|----------------------------|--|-------------------------------------|--|--|---|--|---|--------------------------------------|
| Fazor®                               | 60 % hydrazide maléique    | Inhibe la division cellulaire (entre autres)                                     | Arysta LifeScience Switzerland Sàrl | 5kg/ha   | Traitement unique  | Calibre de taille supérieure à 25–30 mm | Lorsque les calibres étaient >25 mm (1 traitement)                                       | –   | Pulvérisateur liquide                |
| Smart-Block®                         | 98 % de 3-decén-2-one      | Curatif: nécrose par destruction de la structure interne des cellules des germes | Pas encore homologué                | 100 ml/t   | Application quand les germes atteignent 3 mm (maximum 4 traitements)                 | Quand les germes atteignent 3 mm        | Fin novembre ou décembre selon les essais (4 traitements)                                | Inconnu car non homologué en Europe           | Nébulisateur à chaud                 |
| Dormir®                              | 98 % 1,4-DMN               | Préventif: prolonge la dormance des pommes de terre                              | AGROLINE (Fenaco**)                 | 10 à 20 ml/t (n)                                       | Toutes les 6 semaines (maximum 120 ml sur la saison)                                 | Possible dès l'entrée au stockage       | Mi-octobre (traitements toutes les 6 semaines)   | 30 jours (UE)                                 | Nébulisateur à chaud                 |
| Neo-Stop Starter®                    | 300g/l Chlorprophame       | Inhibe la division cellulaire  | Arysta LifeScience Switzerland Sàrl | 60 ml/t  | Traitement unique pour application liquide   | Au début du stockage                    | Mi-octobre (1 traitement)  | Quatre semaines après le dernier traitement   | Pulvérisation liquide***             |
| Argos®                               | 843,2 g/l Limonène         | Préventif et curatif (nécrose)   | Pas encore homologué                | 100 ml/t   | Toutes les 3 semaines  | 1 mois après l'entrée au stockage       | Variable de mi-octobre à mi-novembre selon les essais (traitement toutes les 3 semaines) | Pas de délai                                  | Nébulisateur à chaud (190 °C) ***    |
| Biox-M®                              | 65 à 85 % L-carvone        | Préventif et curatif (nécrose)   | Andermatt Biocontrol SA             | 90 ml/t (1 <sup>er</sup> traitement) puis 30 à 45 ml/t | Toutes les 3 semaines (30 ml/t) ou 4 semaines (45 ml/t) et maximum 360 ml/t au total | 6 à 20 jours après la récolte           | Variable de mi-octobre à mi-novembre selon les essais (traitement toutes les 3 semaines) | Pas de délai                                  | Nébulisateur à chaud (180–190 °C)*** |
| Éthylène                             | Éthylène                   | Préventif, ralentit la croissance des germes et leur vitesse d'élongation        | Netagco Suisse sàrl                 | Montée progressive puis 10ppm en continu               | En continu   | Au début du stockage                    | Dès le début du stockage (générateur Restrain®)  | Pas de délai                                  | Générateur Restrain®                 |

\*\*Le produit Dormir® a été homologué en Suisse en septembre 2020 et sera commercialisé par la nouvelle unité AGROLINE de Fenaco (<https://www.agroline.ch/fr>).

\*\*\*D'autres méthodes d'application existent, se renseigner auprès des fournisseurs.

les unités expérimentales était donc variable, inférieure ou égale à 10 ppm. Le 1-MCP a été appliqué dès fin octobre puis une fois par mois, à raison de 2 g de poudre du produit SmartFresh™ dilué dans 20 ml d'eau distillée. Une fois mélangé à l'eau, le 1-MCP produit un gaz qui se volatilise dans la chambre de stockage. Nous avons suivi le dosage recommandé dans la publication de Prange *et al.* (2005) qui utilise le 1-MCP via le produit EthylBloc® que nous avons adapté pour le volume de nos chambres expérimentales afin d'obtenir le même dosage (environ 0,9 µL.L<sup>-1</sup>) avec le SmartFresh™ utilisé dans notre étude.

L'impact de ces molécules sur le taux de sucres des pommes de terre a également été observé. Notre partenaire Zweifel (producteur de chips en Suisse) a réalisé les analyses des sucres réducteurs (glucose + fructose) sur quatre variétés (Markies, Agria, Verdi et Lady Claire) après trois et cinq mois de stockage, et ceci pendant deux années consécutives (2015–2016 et 2016–2017). Les molécules ont été appliquées selon les recommandations des fournisseurs (tabl. 1). Étant donné que ce produit n'est pas homologué pour traiter les pommes de terre, il n'est pas présenté dans le tableau 1.

### Huiles essentielles

L'efficacité des huiles essentielles de menthe et d'orange (L-carvone et limonène) a été évaluée après trois et cinq mois de stockage pendant deux années d'essais sur trois variétés (Agrida, Verdi et Innovator), et comparée à un témoin non traité. Une première année a été réalisée en conditions semi-industrielles (cinq tonnes, année 2017–2018) et une deuxième année en conditions industrielles (>300 tonnes, année 2018–2019). Les tubercules des différentes variétés provenaient d'un même lot, excepté pour les tubercules du témoin de l'année 2017–2018 qui provenaient d'un lot différent.

Les molécules ont été appliquées selon les recommandations des fournisseurs (tabl. 1).

### Design expérimental et analyses statistiques

Le logiciel R version 3.6.3 (R Core Team 2019) a été utilisé pour réaliser les analyses statistiques. L'expérimentation sur les traitements au champ suit un modèle linéaire mixte répété avec les facteurs fixes «variété» et «molécule» et le facteur répété «date d'observation». L'année est considérée comme le facteur aléatoire. Les essais post-récolte suivent un modèle linéaire mixte avec les facteurs fixes «variété» et «molécule», l'année étant considérée comme le facteur aléatoire. Pour ces essais post-récolte, les analyses statistiques ont été réalisées séparément pour les observations après trois et cinq mois de stockage.

Les modèles précités ont été construits avec la fonction «lmer» du package «lme4» de R (Bates *et al.* 2015). Pour

les différents modèles, le facteur aléatoire «année» a été retiré lorsqu'il était non significatif. Les différents modèles ont été analysés avec la fonction «Anova» du package «car» Version 3.0-7 de R qui utilise le test de significativité du Chi carré pour les modèles linéaires mixtes (Fox and Weisberg 2019) ou le test F pour les modèles linéaires sans facteur aléatoire. Des transformations de variables en log (x+1) ont été effectuées lorsque nécessaire afin de respecter la normalité et l'homogénéité des variances. Un test de comparaison multiple (Test marginal de Tukey avec la méthode des «emmeans») a été effectué sur les facteurs ou interactions ayant un effet significatif grâce au package «emmeans» de R (Lenth 2020). Le seuil de significativité pour l'ensemble des tests statistiques a été fixé à 5%.

### Résultats et discussion

Les résultats des tests de significativité montrant l'effet des facteurs «traitement», «variété», «période d'observation» ainsi que l'effet des interactions entre les différents facteurs sont résumés dans le tableau 2.

#### Traitement anti-germinatif au champ

##### Hydrazide maléique (HM)

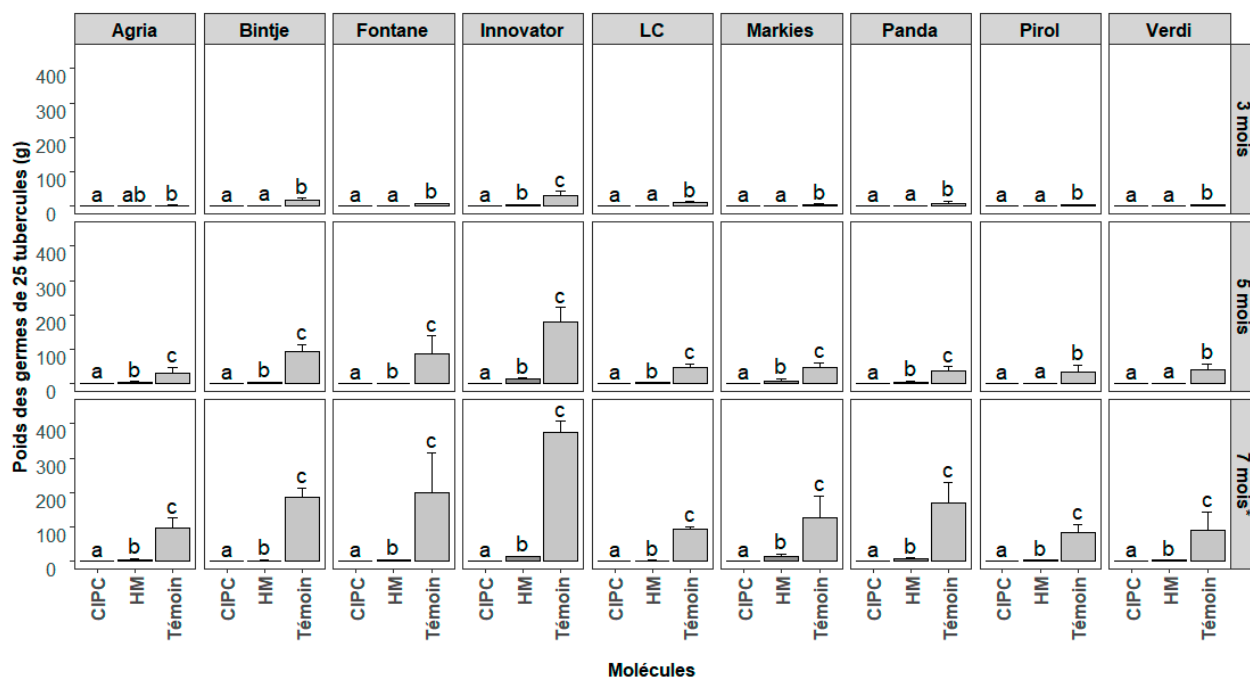
L'efficacité des traitements varie en fonction de la variété et de la période d'observation (tabl. 2); nous avons donc étudié l'effet des traitements pour chaque période d'observation et chaque variété (fig. 2).

**Tableau 2 |** P-values issues du test de significativité (test du Chi carré ou test F selon les essais) montrant les effets des différents facteurs et de leurs interactions (statistiques sur deux années d'essais; \*statistiquement différent; NA = non analysé).

| Facteurs                           | Période | P-values pour les essais avec différents traitements:             |                                      |  |                             |  |
|------------------------------------|---------|---|--------------------------------------|--|-----------------------------|--|
|                                    |         | Effet sur la germination (poids des germes de 25 tubercules en g) |                                      |  |                             | Effet sur les sucres réducteurs          |
|                                    |         | HM, CIPC, témoin  | 1,4-DMN, 3-decen-2-one, CIPC, témoin | Éthylène, éthylène + 1-MCP, CIPC, témoin | L-carvone, limonène, témoin | Éthylène, éthylène + 1-MCP, CIPC, témoin |
| Traitement                         | 3 mois  | p < 0,001*  | p < 0,001*                           | p < 0,001*                               | p < 0,001*                  | p < 0,001*                               |
|                                    | 5 mois  |   | p < 0,001*                           | p < 0,001*                               | p < 0,001*                  | NA                                       |
| Variété                            | 3 mois  | p < 0,001*  | p < 0,001*                           | p < 0,001*                               | > 0,05                      | p < 0,001*                               |
|                                    | 5 mois  |   | p < 0,01*                            | > 0,05                                   | > 0,05                      | NA                                       |
| Traitement × variété               | 3 mois  | p < 0,001*  | > 0,05                               | p < 0,05*                                | > 0,05                      | p < 0,01*                                |
|                                    | 5 mois  |   | > 0,05                               | > 0,05                                   | > 0,05                      | NA                                       |
| Période d'observation              | –       | p < 0,001*  | NA                                   | NA                                       | NA                          | NA                                       |
| Période d'observation × traitement | –       | p < 0,001*  | NA                                   | NA                                       | NA                          | NA                                       |
| Période d'observation × variété    | –       | p > 0,05  | NA                                   | NA                                       | NA                          | NA                                       |

Les p-values présentées dans les sections ci-après correspondent aux p-values issues des tests de Tukey.





**Figure 2** | Poids des germes de 25 tubercules traités avec l'hydrazide maléique (HM) et le CIPC et pour les tubercules du témoin après trois et cinq mois de stockage à 8 °C et après sept mois de stockage (\*sept mois de stockage avec un reconditionnement en température de 8 à 15 °C pour arriver à 15 °C à sept mois) pour les neuf variétés testées pendant deux années d'essais en conditions expérimentales contrôlées (200 kg de pommes de terre) (moyenne ± erreur standard). Les moyennes ne partageant pas une même lettre sont significativement différentes selon le test de Tukey.

Les résultats montrent que le HM permet un bon contrôle de la germination par rapport au témoin jusqu'à sept mois de stockage avec un reconditionnement en température de 8 à 15 °C. Après trois mois de stockage à 8 °C, l'efficacité du HM est similaire à celle du CIPC pour la plupart des variétés. Après cinq mois de stockage à 8 °C, le CIPC est plus efficace que le HM pour la plupart des variétés. Après sept mois de stockage avec un reconditionnement en température, le CIPC est plus efficace que le HM pour toutes les variétés testées.

En effet, après trois mois de stockage, le poids des germes est significativement inférieur pour les traitements au CIPC et au HM comparé au témoin non traité et ce pour les variétés Bintje, Fontane, Lady Claire, Markies, Panda, Pirol et Verdi ( $p < 0,05$ ). Pour la variété Innovator, les deux molécules ont permis un contrôle de la germination significatif comparé au témoin ( $p < 0,001$ ) mais le CIPC a toutefois permis un meilleur contrôle que le HM ( $p < 0,001$ ). Pour la variété Agria, un effet significatif mais faible a été observé sur le contrôle de la germination pour les tubercules traités au CIPC ( $p = 0,046$ ) et un effet marginalement significatif a été observé pour les tubercules issus de plantes traitées au HM ( $p = 0,050$ ) par rapport au témoin (fig. 2).

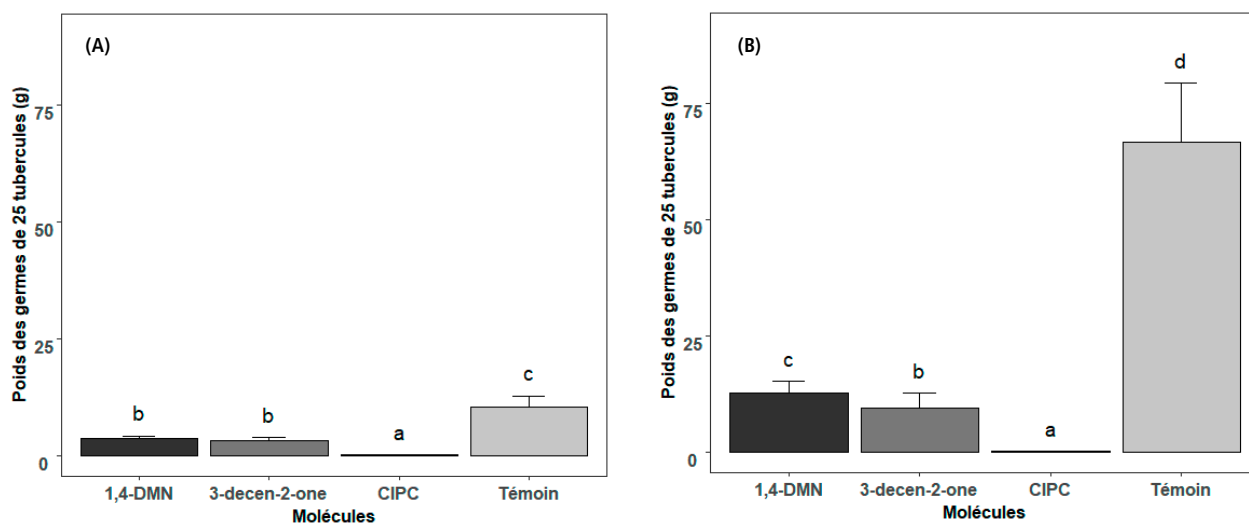
Après cinq mois de stockage, le poids des germes des traitements au CIPC et au HM est significativement inférieur pour les variétés Pirol et Verdi comparé au poids des germes du témoin non traité ( $p < 0,001$ ). Pour les sept autres variétés, le CIPC et le HM ont permis de contrôler la germination par rapport au témoin non traité ( $p < 0,001$ ) mais les tubercules traités au CIPC avaient systématiquement un poids de germes inférieur en comparaison du poids de germes des tubercules issus de plantes traitées au HM ( $p < 0,05$ ) (fig. 2).

Enfin, après sept mois de stockage et un reconditionnement à 15 °C, nous avons observé pour les neuf variétés que les molécules CIPC et HM permettent de contrôler la germination par rapport au témoin ( $p < 0,001$ ) et que pour toutes les variétés, le HM est significativement moins efficace que le CIPC ( $p < 0,05$ ).

### Traitements anti-germinatifs au stockage

#### 1,4-DMN et 3-decen-2-one

Les molécules 1,4-DMN et 3-decen-2-one permettent de contrôler efficacement la germination au moins jusqu'à cinq mois de stockage par rapport au témoin non traité ( $p < 0,001$ ). Après trois mois de stockage, l'efficacité



**Figure 3** | Efficacité des molécules 1,4-DMN et 3-decen-2-one après trois mois (A) et cinq mois (B) de stockage pendant deux années d'essais en conditions expérimentales contrôlées (200 kg de pomme de terre) et pour neuf variétés (moyenne  $\pm$  erreur standard). Les moyennes ne partageant pas une même lettre sont significativement différentes selon le test de Tukey.

des deux molécules est équivalente, tandis qu'après cinq mois, le 3-decen-2-one est plus efficace que le 1,4-DMN ( $p < 0,01$ ). Néanmoins, l'efficacité des deux molécules reste inférieure à l'efficacité du CIPC pour les deux périodes d'observation ( $p < 0,001$ ; fig. 3).

La molécule 3-decen-2-one a une action curative. En effet, nous avons observé que cette molécule nécrose et dessèche complètement les germes en seulement 24h après le traitement (fig. 4), ce qui explique le poids des germes inférieur pour les pommes de terre traitées avec le 3-decen-2-one par rapport au poids des germes des tubercules traités avec le 1,4-DMN après cinq mois de stockage. Des nécroses et dessèchements de germes après 24 à 36 heures provoqués par la molécule 3-decen-2-one ont déjà été reportés dans la littérature (Immaraju 2020; Knowles et Knowles 2015a, b). L'avantage du 3-decen-2-one, grâce à son action curative, est de pouvoir être utilisé pour récupérer des stocks de pommes de terre déjà germés. En effet, ce produit détruit la structure interne des cellules des germes et les tissus sont alors complètement nécrosés et desséchés jusqu'à la base des germes. Le 3-decen-2-one fonctionne très bien lorsqu'il est vaporisé sur des germes de petite taille (<3 mm). Il est encore plus efficace lorsqu'il est réalisé dès les premiers signes de rupture de la dormance (germes au stade «point blanc») car les vapeurs de produit vont pouvoir entrer à l'intérieur des germes et tuer les tissus méristématiques en développement (Immaraju 2018, 2020). Dans nos essais, l'efficacité de ce produit est probablement sous-estimée pour certaines variétés car plusieurs variétés avaient des dormances variables dans une même

chambre expérimentale. Les traitements pour certaines variétés plus germées que d'autres auraient alors dû être réalisés plus tôt pour avoir une meilleure action curative. Pour une saison complète de stockage (sept à huit mois), le nombre de traitements au 3-decen-2-one varie en fonction de la variété et de la température. On compte en moyenne un à deux traitements pour le stockage de variétés à dormance longue et à basse température et trois à quatre traitements pour les variétés à dormance courte et stockées à des températures plus hautes (Immaraju 2018).

#### Éthylène seul et combiné avec le 1-MCP

L'éthylène seul ou combiné avec la molécule 1-MCP permet de réduire la germination au moins jusqu'à cinq mois de stockage par rapport au témoin non traité ( $p < 0,05$ ; données non présentées).

Après trois et cinq mois de stockage, le poids des germes des tubercules traités avec le CIPC, l'éthylène et avec la combinaison éthylène + 1-MCP est significativement inférieur au poids des germes du témoin ( $p < 0,001$ ;  $p < 0,05$  et  $p < 0,05$ ).

À noter que l'efficacité de l'éthylène, seul ou combiné avec le 1-MCP, a pu être sous-évaluée dans nos essais, du fait que notre dispositif expérimental ne permettait pas une exposition des tubercules à une concentration constante d'éthylène, ce qui est normalement recommandé avec cette molécule. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de ne pas présenter dans cet article les résultats d'efficacité obtenus avec l'éthylène. Nous avons toutefois constaté que son efficacité dépend de



**Figure 4** | Tubercules de la variété Verdi traités avec la molécule 3-decen-2-one, après cinq mois de stockage en conditions expérimentales. On observe la nécrose complète et le dessèchement des germes. (Photo: Carole Parodi, Agroscope)

la variété. En effet, nous avons observé une progression moins rapide de la germination pour la variété Markies comparé aux trois autres variétés testées. Cette différence d'efficacité entre variétés a également été observée dans d'autres essais. Fleisch et Martin (2019) ont également observé un excellent contrôle de germination de la variété Markies stockée sous éthylène, alors que ce contrôle était moins bon pour les variétés Agria, Fontane et Challenger, et encore moins bon pour la variété Innovator.

Nous avons analysé les quantités de sucres réducteurs dans les tubercules traités avec les différentes molécules et dans les tubercules du témoin non traité après trois et cinq mois de stockage à 8°C. Étant donné que les tubercules testés étaient exposés à une concentration variable, inférieure ou égale à la dose recommandée (10 ppm), il est possible que l'effet de l'éthylène sur l'accroissement de la teneur en sucres réducteurs des tubercules traités ait été sous-évalué dans le cadre de cette étude. Les résultats sont présentés dans le tableau 3. Les analyses statistiques ont été réalisées uniquement pour les données à trois mois de stockage pour lesquelles nous avons les résultats pour toutes les molécules et toutes les variétés pour deux années d'essais consécutives (tabl. 4).

Comme montré précédemment dans la littérature (Harper et Stroud 2018), notre étude a montré que l'impact de l'éthylène sur le taux de sucres dépend de la variété (tabl. 2). Nous avons donc étudié l'effet de l'éthylène sur les sucres après trois mois de stockage et pour chacune des variétés (tabl. 4). Nos résultats ont montré que les variétés Lady Claire et Verdi ne sont pas sensibles au

sucrage sous éthylène, tandis que les variétés Agria et Markies le sont. Notre étude a montré que le 1-MCP permet de limiter le sucragé des pommes de terre causé par l'éthylène. Nos résultats sont en accord avec l'étude de Prange *et al.* (2005) qui montre que le 1-MCP peut être utilisé pour limiter le brunissement à la friture causé par l'éthylène sans bloquer le contrôle de la germination de l'éthylène.

En effet, après trois mois de stockage pour les variétés Lady Claire et Verdi, le taux de sucres réducteurs est bas et varie peu en fonction des molécules testées, alors que pour les variétés Agria et Markies, le taux de sucres réducteurs varie en fonction du traitement (tabl. 4). Les sucres réducteurs pour la variété Agria sont significativement plus élevés dans les tubercules stockés sous atmosphère riche en éthylène (moyenne de 1,97 g kg<sup>-1</sup>), par rapport aux sucres réducteurs mesurés dans les tubercules traités avec l'éthylène + 1-MCP (moyenne de 0,72 g kg<sup>-1</sup>) et ceux mesurés dans le témoin (moyenne de 0,29 g kg<sup>-1</sup>). Toutefois, ils ne sont pas significativement différents des sucres dans les tubercules traités avec le CIPC (moyenne de 1,18 g kg<sup>-1</sup>) (tabl. 3 et 4). Ce résultat s'explique par le fait que la concentration en sucres réducteurs était particulièrement élevée dans les tubercules traités au CIPC pendant la deuxième année d'essais (tabl. 3). Les sucres réducteurs pour la variété Markies ne sont pas significativement différents dans les tubercules traités avec le CIPC, l'éthylène + 1-MCP et dans le témoin (moyenne de 0,31, 0,82 et 0,39 g kg<sup>-1</sup> respectivement) mais sont significativement plus élevés dans les tubercules traités avec l'éthylène seul (moyenne de 1,77 g kg<sup>-1</sup>) (tabl. 4).



Après cinq mois de stockage, les tendances montrent que le taux de sucres réducteurs est toujours bas pour les variétés Verdi et Lady Claire, peu importe le traitement réalisé. Tandis que pour les variétés Agria et Markies, le taux de sucres réducteurs est relativement élevé dans les tubercules traités avec de l'éthylène (moyenne de 1,85 g kg<sup>-1</sup> et 2,27 g kg<sup>-1</sup>) par rapport au témoin (moyenne de 0,89 g kg<sup>-1</sup> et 1,15 g kg<sup>-1</sup>) ou au CIPC (moyenne de 0,94 g kg<sup>-1</sup> et 0,52 g kg<sup>-1</sup>). La diminution du taux de sucres réducteurs dans les tubercules traités avec de l'éthylène + 1-MCP paraît renforcée après cinq mois de stockage par rapport à trois mois de stockage. En effet, après cinq mois de stockage, le 1-MCP semble permettre un taux des sucres réducteurs dans les variétés Agria et Markies (moyenne de 1,13 g kg<sup>-1</sup> et 0,54 g kg<sup>-1</sup>) similaire à celui du témoin non traité (tabl. 3).

La molécule 1-MCP n'est pas encore homologuée sur pommes de terre en Union européenne; elle ne peut donc pas être utilisée dans le but de diminuer le taux de sucres réducteurs dans les tubercules stockés sous éthylène pour le moment, toutefois l'homologation de cette molécule sur pommes de terre est attendue pour 2022 dans l'Union européenne. Un taux élevé de sucres réducteurs favorise le risque de brunissement et la production de composés toxiques à la friture (Wiberley-Bradford et Bethke 2017). Pour cette raison, notre partenaire Zweifel a fixé une limite très stricte en sucres réducteurs auto-

risés avant transformation (0,4 g kg<sup>-1</sup>), afin d'éviter le moindre risque de brunissement et de présence de composés toxiques (principalement de l'acrylamide) dans le produit final. Nos résultats montrent que ce seuil est souvent dépassé dans les tubercules stockés sous atmosphère enrichie en éthylène, y compris parfois pour les variétés les moins sensibles telles que Lady Claire et même pour un stockage sous éthylène en combinaison avec la molécule 1-MCP (tabl. 3).

Ce seuil de sucres réducteurs peut varier en fonction du produit final (chips ou frites), des pays et des entreprises. Chez Frigemo, producteur de frites en Suisse, le seuil varie en fonction de la variété. Avant de transformer les pommes de terre en frites, un test de friture est réalisé avec une notation visuelle de la couleur des frites (Swisspatat 2018), puis un tableau de correspondance permet d'évaluer le taux de sucres réducteurs correspondant dans les frites (Grob 2003). Par exemple, la variété Markies peut être transformée en frites si elle ne dépasse pas le seuil moyen de 0,76 g kg<sup>-1</sup> tandis que la variété Agria peut être transformée en frites si elle contient une quantité inférieure ou égale à 0,95 g kg<sup>-1</sup> (Schertenleib 2020).

Ces seuils sont systématiquement dépassés dans notre étude pour les pommes de terre stockées sous éthylène. Ils sont parfois également dépassés dans les pommes de terre stockées sous éthylène + 1-MCP (tabl. 3). C'est

**Tableau 3 |** Taux de sucres réducteurs (g kg<sup>-1</sup> de poids frais) après trois et cinq mois de stockage dans les tubercules traités avec les molécules CIPC; éthylène, éthylène + 1-MCP et dans le témoin non traité pour les quatre variétés testées pendant deux années d'essais.

| Molécules        | Période | Année d'essai | Sucres réducteurs (g kg <sup>-1</sup> ) pour les différentes variétés: |             |         |       |
|------------------|---------|---------------|--|-------------|---------|-------|
|                  |         |               | Agria  | Lady Claire | Markies | Verdi |
| CIPC             | 3 mois  | 2015–2016     | 0,39   | 0,06        | 0,1     | 0,06  |
|                  |         | 2016–2017     | 1,97   | 0,07        | 0,51    | 0,14  |
|                  | 5 mois  | 2015–2016     | 0,74   | 0,13        | 0,46    | 0,13  |
|                  |         | 2016–2017     | 1,14   | 0,29        | 0,58    | 0,18  |
| Éthylène         | 3 mois  | 2015–2016     | 1,77   | 0,43        | 1,36    | 0,18  |
|                  |         | 2016–2017     | 2,17   | 0,41        | 2,17    | 0,36  |
|                  | 5 mois  | 2015–2016     | 1,04   | NA          | 2,1     | NA    |
|                  |         | 2016–2017     | 2,65   | 0,73        | 2,43    | 0,35  |
| Éthylène + 1-MCP | 3 mois  | 2015–2016     | 0,66   | 0,22        | 0,31    | 0,09  |
|                  |         | 2016–2017     | 0,78   | 0,29        | 1,32    | 0,26  |
|                  | 5 mois  | 2015–2016     | 0,71   | 0,53        | 0,69    | 0,17  |
|                  |         | 2016–2017     | 1,54   | 0,24        | 0,38    | 0,51  |
| Témoin           | 3 mois  | 2015–2016     | 0,12   | 0,18        | 0,08    | 0,08  |
|                  |         | 2016–2017     | 0,45   | 0,14        | 0,7     | 0,12  |
|                  | 5 mois  | 2015–2016     | 0,68   | 0,08        | 0,39    | 0,15  |
|                  |         | 2016–2017     | 1,09   | 0,51        | 1,91    | 0,33  |

**Tableau 4** | *P-values* issues du test de Tukey comparant les effets des traitements sur le taux de sucres réducteurs (glucose+fructose) après trois mois de stockage pour les quatre variétés testées (statistiques sur deux années d'essais, \*statistiquement différent, (\*) différence limite)

| Traitements comparés        | Agria    | Lady-Claire | Markies  | Verdi |
|-----------------------------|----------|-------------|----------|-------|
| CIPC – Éthylène             | >0,05    | >0,05       | <0,01*   | >0,05 |
| CIPC – Éthylène + 1-MCP     | >0,05    | >0,05       | >0,05    | >0,05 |
| CIPC – Témoin               | 0,055(*) | >0,05       | >0,05    | >0,05 |
| Éthylène – Éthylène + 1-MCP | <0,01*   | >0,05       | 0,034(*) | >0,05 |
| Éthylène – Témoin           | <0,001*  | >0,05       | <0,01*   | >0,05 |
| Éthylène + 1-MCP – Témoin   | >0,05    | >0,05       | >0,05    | >0,05 |

pourquoi il est très important de systématiquement réaliser ces tests de friture et/ou sucres réducteurs avant la transformation des pommes de terre en chips ou en frites afin d'éviter tout risque de production de composés toxiques à la friture.

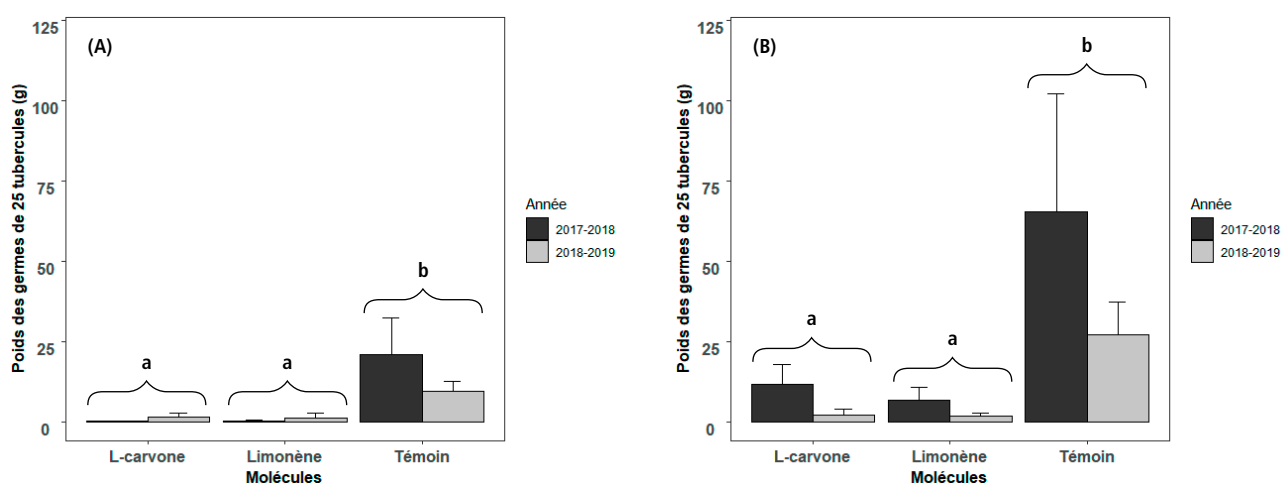
#### Huiles essentielles

L'étude a montré que les molécules L-carvone et limonène permettent également un bon contrôle de la germination après trois et cinq mois de stockage par rapport au témoin non traité ( $p < 0,01$  et  $p < 0,05$ ) et avec une efficacité similaire puisqu'aucune différence significative n'a été observée entre l'efficacité des molécules L-carvone et limonène ( $p > 0,05$ ; fig. 5).

Dans nos essais, les huiles essentielles ont provoqué des nécroses de germes localisées sur la partie apicale des germes.

#### Avantages et inconvénients des différentes molécules

Les différentes molécules précitées sont susceptibles de remplacer le CIPC avec plus ou moins d'efficacité. L'inconvénient de l'éthylène est son efficacité antigermineuse bonne à insuffisante en fonction de la variété (Flesch et Martin 2019) et son effet négatif sur la teneur en sucres réducteurs pour certaines variétés. L'inconvénient des huiles essentielles appliquées à chaud est la fréquence élevée des traitements (toutes les trois à quatre semaines) qui nécessite du temps et de la main d'œuvre supplémentaire pour les réaliser comparé aux autres produits. Les huiles essentielles peuvent aussi être diffusées automatiquement par évaporation grâce à un appareillage tel que le Xedavap®. Ce type d'appareillage devrait permettre de limiter les coûts de main d'œuvre mais nous n'avons pas testé son efficacité dans le cadre de nos essais. Toutefois, l'éthylène et les huiles essentielles offrent certains avantages. En effet, deux



**Figure 5** | Efficacité des huiles essentielles à trois mois (A) et à cinq mois (B) pendant deux années d'essais, une année en conditions semi-industrielles (cinq tonnes = année 2017–2018) et une année en conditions industrielles (>300 tonnes = année 2018–2019) pour trois variétés testées: Agria, Verdi et Innovator (moyenne  $\pm$  erreur standard). En 2017–2018, les tubercules du témoin venaient d'un lot différent. Les moyennes ne partageant pas une même lettre sont significativement différentes selon le test de Tukey.

d'entre eux sont déjà homologués en Suisse: l'huile essentielle de menthe (L-carvone, homologuée sous le nom: Biox-M<sup>®</sup>) et l'éthylène (homologué en application sur les pommes de terre avec le générateur Restrain<sup>®</sup>). Ces produits sont compatibles avec le cahier des charges de l'agriculture biologique et ne sont donc pas soumis à une LMR. L'éthylène a l'avantage d'avoir un prix d'utilisation équivalent au CIPC (Martin 2012; Visse-Mansiaux *et al.* 2017). Les autres alternatives au CIPC sont en général plus coûteuses. Par exemple, l'huile essentielle de menthe a un coût d'utilisation au moins deux fois supérieur au CIPC (Curty 2019; Martin 2012; Visse-Mansiaux *et al.* 2017).

Quant aux molécules 1,4-DMN et HM, elles sont très efficaces et faciles à utiliser. Toutefois leur utilisation n'est pas autorisée en agriculture biologique et elles sont soumises à une LMR dans les produits finaux (LMR de 15 et 60 mg kg<sup>-1</sup> respectivement dans l'UE) (European Commission 2019) et en Suisse (OSAV 2020). La molécule 3-decen-2-one est également très efficace et facile d'utilisation, puisque selon nos résultats, quatre traitements suffisent pour assurer le contrôle de la germination tout au long d'une saison de stockage. De plus, ce produit a un effet curatif et permet de récupérer des stocks de pommes de terre déjà germés. Cependant, cette molécule n'est pas encore homologuée dans l'UE et en Suisse. Quand elle le sera, il sera préférable de disposer dans une même chambre froide des variétés avec des dormances comparables afin d'optimiser l'utilisation du produit. En effet, le produit s'applique lorsque les tubercules commencent à germer (Immaraju 2020). Il est donc inutile de traiter des variétés dont les tubercules ont une dormance longue qui ne présenteraient pas de germes en même temps que les tubercules de variétés à dormance plus courte qui auraient déjà commencé à germer.

Contrairement au CIPC, qui peut être appliqué en une seule fois en début de stockage en pulvérisation liquide, les produits candidats à son remplacement sont appliqués plusieurs fois par nébulisation ou en continu (vaporisation ou gazage) durant la saison de stockage (tabl. 1). Pour optimiser l'efficacité de ces produits, il faut donc des bâtiments de stockage adaptés, avec des systèmes de ventilation performants pour une bonne répartition des produits. Il faut également que les locaux de stockage soient suffisamment étanches afin d'éviter les pertes de produits, qui engendreraient une diminution de leur efficacité et une perte financière directe. Étant donné que ces molécules sont moins efficaces que le CIPC, il serait souhaitable de favoriser autant que possible les variétés avec des dormances moyennes à longues.

Le CIPC a été retiré du marché en raison des risques de présence de résidus dans la peau des tubercules (Ezekiel et Singh 2008) dépassant parfois la LMR autorisée de 10 mg kg<sup>-1</sup> dans l'UE (European Commission 2019). Toutefois, ce produit avait l'avantage d'être partiellement ou totalement éliminé lors du processus d'épluchage des pommes de terre avant la transformation par l'industrie. À l'inverse, l'hydrazide maléique est un produit systémique et se retrouve dans la chair du tubercule, il n'est donc que partiellement éliminé lors de la transformation. Toutefois, les résidus de HM sont en général bien inférieurs à la LMR de 60 mg kg<sup>-1</sup> autorisée dans l'UE. Les molécules 1,4-DMN et 3-decen-2-one ont l'avantage, par rapport au CIPC et au HM de laisser très peu de résidus sur les tubercules et d'éviter ainsi les risques pour la santé et l'environnement. Les analyses de résidus de CIPC, de HM, de 1,4-DMN et de 3-decen-2-one réalisées dans nos essais sur les tubercules traités confirment les informations présentées ci-dessus (données non présentées).

## Conclusions

Pour éviter les pertes de marchandise pendant le stockage des pommes de terre, et pour maintenir des stocks de bonne qualité pendant plusieurs mois sans germe, il est important de combiner l'utilisation des différentes molécules alternatives au CIPC avec de nouvelles stratégies de stockage. Les chercheurs d'Agroscope travaillent à différentes solutions innovantes pour contrôler la germination.

- Un modèle de germination a été développé afin de prédire la date de dormance et, par conséquent, la date de germination d'une variété donnée pendant une saison donnée sur base des paramètres météo durant la période de croissance de la pomme de terre (Visse-Mansiaux *et al.* 2018). Ce modèle servira d'outil d'aide à la décision afin de mieux gérer le stockage des pommes de terre en fonction de la date de germination prévue. Il pourra aussi aider à diminuer ou éviter l'application de produits anti-germinatifs selon la durée de la dormance prédite et donc de diminuer les coûts de traitements mais aussi le risque de présence de résidus de produits.
- Agroscope, en collaboration avec Swisspatat, travaille également à l'identification de variétés industrielles qui ne seraient pas sensibles au sucrage lors d'un stockage à basse température. Cela permettrait de stocker ces variétés à 4 °C ou 6 °C pour retarder la germination des tubercules. Avec de telles variétés, il serait possible

de prolonger le stockage et/ou de diminuer ou même supprimer l'application de produits anti-germinatifs. Ces travaux ont déjà permis d'identifier trois variétés peu sensibles au sucrage pour un stockage à 4 °C: Lady Claire, Verdi et Kiebitz (Visse-Mansiaux *et al.* 2019).

Pour face à l'interdiction du CIPC, les différentes stratégies précitées devront être mises en œuvre et combinées afin de maintenir un stockage de bonne qualité et de garantir la durabilité du stockage des pommes de terre en Suisse. ■

- Agroscope teste également l'effet d'un stockage à basse température (4 °C) sur des variétés sensibles au sucrage, suivi d'un reconditionnement. En effet, nous avons observé que le reconditionnement permettait de diminuer significativement la teneur en sucres réducteurs de certaines variétés sensibles au sucrage (données non présentées). Toutefois, le taux de sucres, même dans les variétés peu sensibles au sucrage à basse température, peut varier en fonction de l'année et du lieu de croissance (données non présentées) et nous recommandons de toujours effectuer des analyses de sucres réducteurs et/ou un test de friture avant de transformer des pommes de terres stockées à 4 °C, avec ou sans reconditionnement, afin de limiter le risque de brunissement et de production d'acrylamides à la friture.

#### Remerciements

Nous remercions les partenaires suisses du projet: Fenaco, Zweifel, Innosuisse – l'Agence suisse pour l'encouragement de l'innovation et Swisspatat. Nous remercions également les partenaires belges du projet: UPL Benelux, la Région wallonne (subvention EUREKA), l'Université de Gembloux Agro-Bio Tech et tout particulièrement Prof. Hélène Soyeurt, Dr. Leonard Shumbe et Prof. Hervé Vanderschuren. Enfin, nous remercions les collègues d'Agroscope pour leur soutien, de Fenaco et de Zweifel impliqués activement dans le projet et tout particulièrement Maud Tallant (Agroscope), Christoph Kohli (Fenaco) et Marco Blumenthal (Zweifel) qui ont permis de réaliser ces essais pendant toutes ces années. Nous remercions également chaleureusement les firmes qui nous ont fourni les produits à tester et/ou qui ont donné des recommandations (Restrained® Company Ltd, AgroFresh, DormFresh Ltd, BASF SA, Xeda International, Andermatt Biocontrol Suisse AG, UPL Benelux, Arysta LifeScience Switzerland Sàrl et AMVAC Chemical corporation), ainsi que la firme Netagco Suisse sàrl qui nous a mis à disposition le générateur d'éthylène.

#### Bibliographie

- Bates D., Maechler M., Bolker B. & Walker S., 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *67*, 1–48.
- BioFresh, 2020. Accès: <https://www.bio-fresh.com/productdetail.php?id=1>.
- Bonnet M., 2020. Herbicides Product Development Lead - Europe, UPL Benelux, comm. pers.
- Caisley J., 2020. Jonathan Caisley, Managing Director at Biofresh Group Limited, comm pers.
- Caldiz D. O., Fernandez L. V. & Inchausti M. H., 2001. Maleic hydrazide effects on tuber yield, sprouting characteristics, and french fry processing quality in various potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars grown under Argentinian conditions. *American Journal of Potato Research* **78**, 119–128.
- Campbell M. A., Gleichsner A., Hilldorfer L., Horvath D. & Suttle J., 2012. The sprout inhibitor 1,4-dimethylnaphthalene induces the expression of the cell cycle inhibitors KRP1 and KRP2 in potatoes. *Functional & Integrative Genomics* **12**, 533–541.
- CERTIS, 2019. BioX-M® Brochure Application & utilisation. Certis Europe BV, Accès: [https://www.certiseurope.be/fileadmin/BE/Downloads/Solutions/Factsheets/Biox-M/Certis\\_BIOX-M\\_folder\\_6p\\_FR-min.pdf](https://www.certiseurope.be/fileadmin/BE/Downloads/Solutions/Factsheets/Biox-M/Certis_BIOX-M_folder_6p_FR-min.pdf).
- Curty F., 2019. Product manager, Fenaco Genossenschaft, Erlachstrasse 5, CH-3001 Bern, Switzerland. <https://www.fenaco-landesprodukte.ch/>, comm. pers.
- De Barbeyrac J., 2020. Project and regulatory affairs manager chez Xeda International, comm. pers.
- Douglas L., MacKinnon G., Cook G., Duncan H., Briddon A. & Seemark S., 2018. Determination of chlorpropham (CIPC) residues, in the concrete flooring of potato stores, using quantitative (HPLC UV/VIS) and qualitative (GCMS) methods. *Chemosphere* **195**, 119–124.
- EPA, 2013. 3-decen-2-one Fact Sheet. Office of Pesticide Programs U.S. Environmental Protection Agency.
- EU regulation, 2019. Commission implementing regulation (EU) 2019/989 of 17 June 2019 concerning the non-renewal of approval of the active substance chlorpropham, in accordance with Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council concerning the placing of plant protection products on the market, and amending the Annex to Commission Implementing Regulation (EU) No 540/2011. Accès: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0989&from=EN>.
- European Commission, 2019. European pesticides database, Pesticides EU-MRLs, Regulation (EC) No 396/2005. Accès: <https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/public/?event=homepage&language=EN>.
- Ezekiel R. & Singh B., 2008. Effect of Cooking and Processing on CIPC Residue Concentrations in Potatoes and Processed Potato Products. *Potato Research* **50**, 175.
- Fleisch M. & Martin M., 2019. Expérimentation 2018–2019: Effet de l'éthylène en conservation pour les pommes de terres destinées à la transformation industrielle, Quali'Pom juin 2019, 2 p.
- Fox J. & Weisberg S., 2019. An R Companion to Applied Regression. Sage, Thousand Oaks (CA).
- Grob K., 2003. Eichkurve Korrelation Backtest zu Zuckergerhalte durch Dr Konrad Grob, Kantonslabor Zürich.
- Harper G. & Stroud G., 2018. Final Report, Use of ethylene and CIPC on processing varieties of potato, 2013–2016. AHDB Sutton Bridge Crop Storage Research, © Agriculture and Horticulture Development Board 2018, p. 21.
- Immaraju J. A., 2018. Ph.D., Sr. Director of Product Commercialization & International Product Development. AMVAC Chemical Corporation, 4695 MacArthur Court, Suite 1200, Newport Beach, California 92660, USA, comm. pers.

- Immaraju J. A., 2020. The changing landscape for potato sprout control in storage. *Potato Association of America, Spudman*, 58 (6), pp. 28–31.
- Jina A., 2020. Technical Specialist, DormFresh Limited, comm. pers.
- Knowles L. O. & Knowles N. R., 2015a. A model system that elucidates the mode of action of  $\alpha,\beta$ -unsaturated carbonyl compounds as toxicants to potato sprout tissue, 98th Annual Meeting of the Potato Association of America. *Potato Research*, p. 195.
- Knowles L. O. & Knowles N. R., 2015b. Sprout inhibition by  $\alpha,\beta$ -unsaturated aliphatic carbonyls – discovery, chemistry and physiological responses, 98th Annual Meeting of the Potato Association of America. *American Journal of Potato Research*, pp. 195–196.
- Lenth R., 2020. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means, R package version 1.4.4 ed.
- Martin M., 2012. Pomme de terre Hebdo, le journal de la pomme de terre. CNIPT (Comité National Interprofessionnel de la Pomme de Terre), Arvalis-Institut du végétal, p. 4.
- Martin M., 2020a. Arvalis - Institut du végétal, France, comm. pers.
- Martin M., 2020b. L'après CIPC: comment s'organiser ?, Arvalis – Institut du végétal (Ed.), Accès: <https://www.arvalis-infos.fr/l-apres-cipc-comment-s-organiser-/@/view-30943-arvarticle.html>.
- OFAG, 2020. Office fédéral de l'agriculture (OFAG), index des produits phytosanitaires. Accès: <https://www.psm.admin.ch/fr/produkte>.
- OSAV, 2020. Annexe 2 de l'ordonnance du DFI sur les limites maximales applicables aux résidus de pesticides présents dans ou sur les produits d'origine végétale ou animale (OPOVA). Accès <https://www.blv.admin.ch/blv/fr/home/lebensmittel-und-ernaehrung/rechts-und-vollzugsgrundlagen/gesetzgebung-lme.html>
- Paul V. R. E. & Pandey R., 2016. CIPC as a potato sprout suppressant during storage: Present scenario and future perspectives. *Processed Food Industry* 19, 15–18, 48.
- Prange R., Daniels-Lake B., Jeong J.-C., Binns M., 2005. Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene on potato tuber sprout control and fry color. *American Journal of Potato Research* 82, 123–128.
- R Core Team, 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Schoene D. L. & Hoffmann O. L., 1949. Maleic Hydrazide, a Unique Growth Regulant. *Science* 109, 588.
- Schertenleib A., 2020. M. Arnaud Schertenleib, Manager assurance qualité, Frigemo AG, Accès: <https://www.frigemo.ch/2/groupe-frigemo/>, comm. pers.
- Swisspatat, 2018. Übernahmebedingungen Kartoffelnetze 2018, Veredelungskartoffeln.
- Swisspatat 2020. Accès: <https://www.patate.ch/fr/branche/branche/culture-et-qualite.html>.
- Visse-Mansiaux M., Ballmer T., Tallant M., Shumbe L., Vanderschuren H. & Dupuis B., 2019. Sprouting control of the potato varieties using cold storage. In: Harper, G., Hofman, T. (Eds.), EAPR Post Harvest section meeting 2019. Harper, G. (AHDB Potatoes, Sutton Bridge, UK) and Hofman, T. (Certis Europe BV, Maarssen, Netherlands), The Maids Head Hotel, Norwich, UK.
- Visse-Mansiaux M., Schwaerzel R. & Dupuis B., 2017. Contrôle de la germination, Fiche qualité Swisspatat (Diffusion de fiches techniques sur la pomme de terre en Suisse). Swisspatat.
- Visse-Mansiaux M., Vanderschuren H., Soyeurt H. & Dupuis B., 2018. Dormancy models to optimize the storage of various potato cultivars. In: Scientific committee WPC-ALAP 2018 (Ed.), Abstract Book, 10th World Potato Congress – XXVII ALAP 2018 Congress, Cusco, Peru, p. 90.
- Wiberley-Bradford A. E. & Bethke P. C., 2017. Rate of Cooling Alters Chip Color, Sugar Contents, and Gene Expression Profiles in Stored Potato Tubers. *American Journal of Potato Research* 94, 534–543.