



• Sommaire

- Et si des roches volcaniques étaient au service de la protection des grains stockés ?
- Ventilation à l'air ambiant en France : retour sur les conditions météo de la campagne 2018/2019

• Inscrivez-vous - Rappel

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

<https://www.arvalis-infos.fr/demande-d-informations-@/view-127-dynamicform.html>

Et si des roches volcaniques étaient au service de la protection des grains stockés ?

La zéolithe, une nouvelle poudre minérale pour lutter contre les insectes au stockage

La protection des grains durant leur stockage repose de plus en plus sur des actions préventives et de la surveillance, suivies par des actions curatives seulement lorsqu'un seuil critique est atteint et qu'elles sont alors jugées nécessaires. Le recours aux produits phytopharmaceutiques étant au cœur des préoccupations sociétales et soumis à de nombreuses restrictions, l'intérêt pour



Figure 1 : Zéolithe

les solutions alternatives est ainsi amplifié et leur introduction sur le marché s'accélère depuis plusieurs années.

L'utilisation de poudres minérales est une alternative intéressante à l'utilisation de produits insecticides de contact pour la protection intégrée des grains stockés (Andrić *et al.*, 2012). Parmi ces poudres, on retrouve la zéolithe, un cristal d'origine volcanique formé d'un squelette microporeux d'aluminosilicates hydratés. Il se caractérise par un arrangement tridimensionnel de tétraèdres de SiO_4 et d' AlO_4 , reliés par des atomes d'oxygène (Reháková *et al.*, 2005 ; Sprynskyy *et al.*, 2005 ; Kljajić *et al.*, 2010a ; Rumbos *et al.*, 2016). Les pores de cette matrice sont remplis d'eau et de cations alcalins ou alcalinotereux (Reháková *et al.*, 2005 ; Sprynskyy *et al.*, 2005). Plus simplement, la zéolithe est une poudre chimiquement inerte qui contient de la silice naturelle, tout comme les terres de diatomées. La zéolithe est déjà couramment employée en tant que complément alimentaire destiné aux animaux pour lutter contre les mycotoxines (Kljajić *et al.*, 2010a), mais également en tant que fertilisant des sols (Kljajić *et al.*, 2010a ; Ramesh and Reddy, 2011). Désormais, différentes études s'intéressent à l'effet des zéolithes sur les ravageurs des grains stockés.

Quelle efficacité sur les ravageurs en traitement préventif du grain ? Synthèse des résultats publiés dans la littérature

Rumbos *et al.* (2016) ont testé 3 produits formulés à base de zéolithe pour lutter contre des individus adultes de trois espèces d'insectes : le charançon du riz (*Sitophilus oryzae*), le tribolium brun de la farine (*Tribolium confusum*) et le silvain dentelé (*Oryzaephilus surinamensis*). La mortalité des charançons du riz est faible après seulement 2 jours de traitement quelle que soit la formulation ou la dose de zéolithe utilisée (250, 500 mg/kg ou 1g/kg de grains) car elle n'excède pas 8 %. Elle atteint 14 à 27 % en 2 semaines puis jusqu'à 44 % en 3 semaines de traitement. Le tribolium brun de la farine semble moins sensible à l'application de zéolithe car un taux de mortalité de

seulement 25 % est atteint au bout de 3 semaines. En revanche, le silvain dentelé est l'espèce la plus sensible avec une mortalité pouvant atteindre 55 % dès 2 jours après traitement, puis dépassant 96 % après 3 semaines pour la dose de 1g/kg de grains. Cette meilleure efficacité sur le silvain dentelé peut être expliquée par le fait que cette espèce possède une couche de poils apte à retenir des quantités de zéolithe accrues par unité de surface.

Kljajić *et al.* (2010a) ainsi que Andrić *et al.* (2012) ont chacun testé l'efficacité insecticide de deux poudres à base de zéolithe naturelle d'origine serbe, ayant la composition suivante : 63 à 68 % de SiO_2 , 11 à 14 % de Al_2O_3 , 2,5 à 4,5 % de CaO , 0,8 à 2,5 % de Fe_2O_3 , jusqu'à 1,5 % de MgO , Na_2O et K_2O . L'une d'elle comportait en plus de l'ammonium destiné à améliorer l'adhérence au grain. Finalement, les taux de mortalité obtenus dans leurs essais étaient systématiquement

plus élevés avec le produit dont la formulation ne comportait pas d'ammonium, quelle que soit l'espèce visée. L'utilisation de zéolithe a permis d'atteindre 86 % de mortalité chez le charançon du riz, 53 % et 25 % de mortalité chez le tribolium rouge de la farine et le capucin des grains respectivement, 7 jours après exposition aux grains traités à la dose de 0,75g/kg. A cette dose, 100 % des charançons du riz et des triboliums rouges de la farine sont éliminés en 14 jours, alors que seulement 36 % des capucins des grains sont tués. Il faut attendre 21 jours après traitement pour obtenir une mortalité plus élevée de 73 % chez les capucins des grains. Le traitement des grains à la zéolithe à la dose la plus élevée de 1g/kg a entraîné, après 2 ou 3 semaines de contact avec les insectes, une mortalité de 88 et 96 % des charançons respectivement, et 90 et 100 % des triboliums rouges de la farine respectivement.

Bohinc *et al.* (2018) ont étudié l'effet de deux zéolithes naturelles, d'origine slovène et serbe, ainsi qu'un produit à base de zéolithe synthétique, vendu en tant qu'absorbant, sur le charançon du maïs *Sitophilus zeamais*. L'étude a été conduite en laboratoire sur des

petits lots de blé traités à la dose de 0,9g de poudre pour un kilogramme de grain, à différentes températures (15, 20 et 25 °C) et différents taux d'humidité relative (55 et 75 %). Les zéolithes naturelles sont celles qui ont permis d'atteindre les plus hautes efficacités. Le traitement était par ailleurs plus efficace à 55 % d'humidité relative qu'à 75 %. Ainsi, à 15°C et 55 % d'humidité relative, après 7 jours d'exposition aux grains traités 23 % des charançons du maïs ont été éliminés avec le traitement le plus efficace, environ 30 % sont morts au bout de 2 semaines, puis on atteint des niveaux de mortalité de l'ordre de 60 à 70 % après 3 semaines. A 20°C, les taux de mortalités obtenus sont similaires à ceux observés à 15°C. Le meilleur taux de mortalité a été obtenu après 3 semaines d'exposition avec une température ambiante de 25°C et 55 % d'humidité relative : 83 % des charançons du maïs ont alors été éliminés.

L'ensemble de ces études montrent ainsi que la durée d'exposition des insectes conditionne la réussite du traitement du grain et qu'une **exposition de 3 semaines** est celle qui conduit aux plus fortes mortalités, quelle que soit l'espèce (tableau 1).

Tableau 1 : Efficacité d'une exposition durant 21 jours à du blé traité avec de la zéolithe de plusieurs ravageurs du grain adultes selon différentes conditions de traitement

Zéolithe	Dose (g/kg)	Conditions ambiantes (°C et r.h.%)	Espèces ciblées	Taux de mortalité des adultes (%)	Taux de réduction de la génération F1 (%)	Référence
naturelle	0,75	24±1°C 45±5 %	<i>S.oryzae</i>	100,0	95,5	Kljajić <i>et al.</i> , 2010a
			<i>R. dominica</i>	73,7	88,8	
naturelle modifiée	0,75		<i>T.castaneum</i>	100,0	90,3	
			<i>S.oryzae</i>	98,9	80,0	
			<i>R. dominica</i>	43,7	76,3	
			<i>T.castaneum</i>	100,0	80,6	
naturelle en fines particules	1,0	24±1°C 50-65 %	<i>S.oryzae</i>	94,0	85,1	Kljajić <i>et al.</i> , 2010b
			<i>R. dominica</i>	78,8	96,1	
			<i>T.castaneum</i>	100	98,8	
naturelle	1,0	24±1°C 50-65 %	<i>S.oryzae</i>	96,0	81,8	Andrić <i>et al.</i> , 2012
			<i>T.castaneum</i>	100	96,5	
naturelle modifiée	1,0		<i>S.oryzae</i>	45,0	62,0	
			<i>T.castaneum</i>	28,0	71,3	
Zeoprofeed Land 93 50µm	1,0	25°C 55 %	<i>S.oryzae</i>	33,3	Non significatif	Rumbos <i>et al.</i> , 2016
			<i>T.confusum</i>	3,8		
			<i>O. surinamensis</i>	78,8		
Zeofeed 50µm	1,0		<i>S.oryzae</i>	23,9	Non significatif	
			<i>T.confusum</i>	8,8		
			<i>O. surinamensis</i>	75,3		
Bulk zeolite 50µm	1,0		<i>S.oryzae</i>	33,9	Non significatif	
			<i>T.confusum</i>	8,2		
			<i>O. surinamensis</i>	95,7		
naturelle	0,9	15°C 55 %	<i>S. zeamais</i>	69.7	/	Bohinc <i>et al.</i> , 2018
		25°C 55 %		83.7		

Quel impact du traitement sur la descendance des insectes ?

Concernant la mortalité de la descendance, les résultats divergent selon les études et les espèces (tableau 1). Les taux d'émergence des formes cachées du charançon du riz (*Sitophilus oryzae*), du tribolium brun de la farine (*Tribolium confusum*) et du silvain dentelé (*Oryzaephilus surinamensis*) ne sont pas impactés par un traitement des grains avec la zéolithe d'après Rumbos et al. (2016). En revanche, dans l'étude de Kljajić et al. (2010a), l'application de zéolithe à 0,75 g/kg de grains, en contact des insectes durant 21 jours, diminue significativement la descendance du tribolium rouge de la farine, du charançon du riz et du capucin des grains. La réduction atteint jusqu'à 95,5 % chez les formes cachées du charançon du riz. Andrić et al. (2012) ont obtenu jusqu'à 81 % d'émergence en moins chez les charançons du riz exposés à la zéolithe durant 3 semaines à 1g/kg de grains et jusqu'à 96 % de descendance en moins chez les triboliums rouges de la farine. Subramanyam et al. (2015) ont montré que

l'impact sur la descendance est variable selon l'espèce visée. En effet, si la descendance du charançon du maïs, des triboliums et du silvain dentelé a été supprimée pour la majeure partie (79 à 97 %), en revanche une réduction d'émergence plus faible, de 24 à 47 %, a été obtenue pour le charançon du riz et le capucin des grains.

Quelle efficacité des zéolithes pour le traitement préventif des locaux ?

Le nettoyage physique d'un local de stockage peut être complété par une application de poudre de zéolithes pour éliminer les populations de ravageurs qui auraient persisté et ainsi prévenir une infestation du grain entrant à la nouvelle récolte. Bohinc et al. (2018) ont observé 99 à 100 % de mortalité chez des charançons du maïs exposés dans des boîtes de Petri dont la surface a été traitée avec 10 ou 20 g/m² de zéolithes naturelle, à 25°C et 55 % d'humidité relative.

Le Forcegrain MN, une nouvelle solution disponible en France et testée par ARVALIS - Institut du végétal



Figure 2 : Le Forcegrain MN à base de chabazite (LODI GROUP)

En France, une solution a été autorisée en 2018 en tant que barrière physique pour empêcher l'insecte d'accéder aux grains et de se nourrir. Il s'agit du Forcegrain MN (LODI Group), composé de chabazite, un cristal de la famille des zéolithes. Les différentes utilisations et doses recommandées correspondantes sont décrites dans le tableau 2.

Tableau 2 : Quelles utilisations pour le Forcegrain MN ?

	Traitement préventif des locaux vides	Traitement préventif des grains	Traitement curatif des grains
Dose recommandée	80g/m ²	8 à 10kg/t	10kg/t

Actuellement, cette solution est autorisée en Agriculture Biologique en tant que traitement des locaux uniquement. Cette poudre peut être appliquée à l'aide d'une poudreuse pneumatique à dépression ou directement via le système de ventilation des installations de stockage, en saupoudrant la poudre à l'entrée du ventilateur. Il est recommandé pour l'opérateur de porter un masque lors de la manipulation du produit (car la poudre se disperse facilement dans l'air environnant).

ARVALIS - Institut du végétal a testé cette solution en tant que traitement préventif des grains en laboratoire sur des petits lots d'un kilogramme de blé tendre (figure 3). Les lots traités et lots témoins ont tous été infestés ensuite avec 100 charançons du riz (figure 4), puis conservés à 26°C et 68% d'humidité relative dans le grain.



Figure 3 : Traitement de 1 kg de blé avec du Forcegrain MN (avant mélange)



Figure 4 : Infestation des lots de blé mis en essai

Des comptages pour évaluer la mortalité dans les différents lots ont été effectués à 2 jours, 7 jours, 14 jours et 21 jours après infestation. Une différence significative est apparue dès la première semaine, avec une mortalité accrue des insectes dans les lots traités, mais qui reste faible (15%). Conformément aux résultats publiés dans la littérature, une mortalité quasi-totale (99%) est apparue au bout de trois semaines de traitement (figure 5)

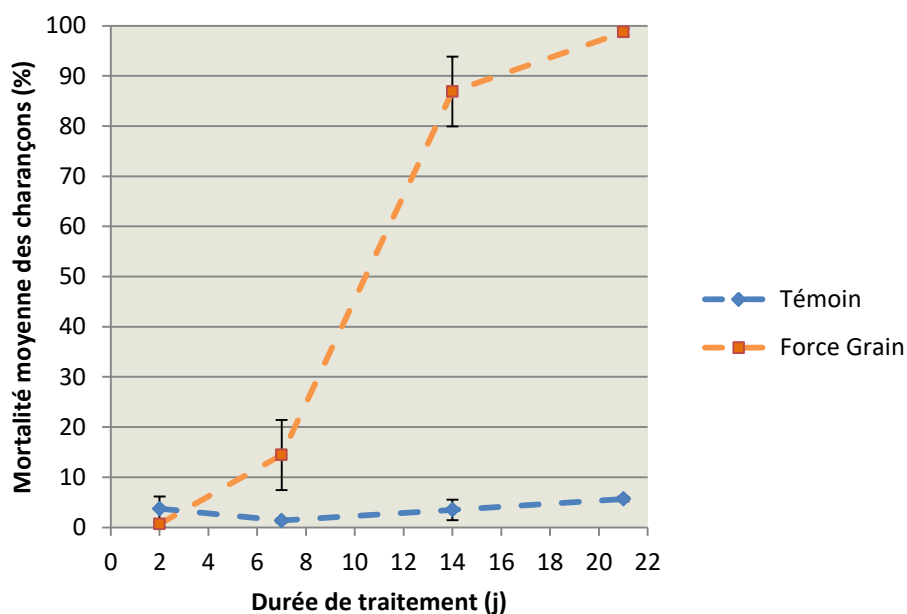


Figure 5 : Mortalité moyenne avec écart-types des charançons adultes introduits dans du blé traité ou non au Forcegrain MN (essai LODI-ARVALIS)

Après retrait des insectes adultes, les lots de blé traités durant 21 jours ont été laissés en incubation 6 semaines supplémentaires afin d'évaluer l'effet sur l'émergence des charançons du riz. Une réduction d'émergence nette de 61% a ainsi été obtenue.

Cet essai a également permis de mesurer l'impact d'un tel traitement sur l'évolution du poids spécifique du blé. Nous avons ainsi constaté une baisse de poids spécifique de 3% (passage de 72.3 à 70.0 kg/hl). Bodroža-Solarov et al. (2012) ont mesuré une baisse de poids spécifique de 5% sur du blé traité avec de la zéolithe. La réduction de poids spécifique serait positivement corrélée avec la diminution de la taille des cristaux de zéolithe appliqués (Rumbos et al., 2016).

Une efficacité du traitement avec de la zéolithe conditionnée par différents facteurs...

Comme pour la terre de diatomées, l'efficacité d'un traitement avec de la zéolithe naturelle dépend de différents facteurs dont l'espèce, le stade de développement de l'insecte visé et la durée d'exposition (Rumbos *et al.*, 2016 ; Andrić *et al.*, 2012 ; Kljajić *et al.*, 2010a). Une augmentation de l'humidité de l'air ou une baisse de température ambiante, en particulier lors de courtes expositions des insectes à la zéolithe, entraîne une baisse d'efficacité significative (Kljajić *et al.*, 2011). Les propriétés des zéolithes varient aussi selon leur origine, qui entraîne des variations de leur composition. D'après Kljajić *et al.* (2011), si la zéolithe est composée majoritairement de particules fines (de 13 à 28µm) plutôt que de plus grosses particules (>53µm), les taux de mortalité obtenus sont alors significativement plus élevés. Cependant, dans l'étude de Rumbos *et al.* (2016), la taille des particules n'a pas eu d'influence significative sur l'efficacité insecticide de la zéolithe sur les trois espèces d'insectes testés.

Conclusion

Ces différentes études révèlent le potentiel de la zéolithe, provenant des pays d'Europe du Sud-Est, afin de

lutter contre les ravageurs des grains stockés. En résumé, on retiendra que :

- C'est une solution d'autant plus intéressante qu'elle peut être positionnée dans un itinéraire de lutte en tant que **traitement préventif ou curatif**, des grains ou des locaux.
- Il faut une durée de traitement d'au moins **3 semaines** pour obtenir une mortalité quasi-totale des adultes chez les principales espèces déprédatrices des céréales stockées.
- Les conditions ambiantes au moment du traitement sont déterminantes pour l'efficacité du traitement : plus l'environnement de l'insecte est **chaud et sec** plus l'action du traitement est rapide.
- Le seul impact sur les grains traités est une **baisse de poids spécifique** de l'ordre de 3 à 5 %.
- La spécialité commerciale à base de chabazite actuellement autorisée en France pour la lutte contre les insectes au stockage est le **Force-grain MN** (LODI GROUP), à noter qu'une protection respiratoire doit être portée par l'opérateur.

Marine CABACOS

m.cabacos@arvalis.fr

Références bibliographiques :

- Andrić G., Marković M., Adamović M., Daković A., Golić M.P., Kljajić P.J., 2012. Insecticidal potential of natural zeolite and diatomaceous earth formulations against rice weevil (Coleoptera : Curculionidae) and red flour beetle (Coleoptera : Tenebrionidae). *Journal of Economic Entomology*, 105, pp. 670-678.
- Bodroža-Solarov M., Kljajić P., Andrić G., Filipčev B., Dokić L., 2012. Quality parameters of wheat grain and flour as influenced by treatments with natural zeolite and diatomaceous earth formulations, grain infestation status and endosperm vitreousness. *Journal of Stored Products Research*, 51, pp. 61-68.
- Bohinc T., Dervić A., Horvat A., Kljajić P., Andrić G., Golić M.P., Trdan S., 2018. Effects of natural and synthetic zeolites against maize weevil (*Sitophilus zeamais* Motschulsky, Coleoptera, Curculionidae) adults under laboratory conditions. *Integrated Protection of Stored Products, IOBC-WPRS Bulletin*, 130, pp. 241-250.
- Kljajić P., Andrić G., Adamović M., Pražić-Golić M., 2011. Possibilities of application of natural zeolites in stored wheat grain protection against pest insects. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 15 (1), pp. 12-16.
- Kljajić P., Andrić G., Adamović M., Bodroža-Solarov M., Marković M., Perić I., 2010a. Laboratory assessment of insecticidal effectiveness of natural zeolite and diatomaceous earth formulations against three stored-product beetle pests. *Journal of Stored Products Research*, 46, pp. 1-6.
- Kljajić P., Andrić G., Adamović M., Pražić Golić M., 2010b. Laboratory evaluation of insecticidal effectiveness of a natural zeolite formulation against *Sitophilus oryzae* (L.), *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Tribolium castaneum* (Herbst) in treated wheat. Dans Carvalho M.O., Fields P.G., Adler C.S., Arthur F.H., Athanassiou C.G., Campbell J.F., Fleurat-Lessard F., Flinn P.W., Hodges R.J., Isikber A.A., Navarro S., Noyes R.T., Riudavets J., Sinha K.K., Thorpe G.R., Timlick B.H., Trematerra, P., White N.D.G. (Eds.), *Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection*, Estoril, Portugal, June 2010. Julius-Kühn-Archiv, pp. 862-867.

Ramesh K., Reddy D.D., 2011. Chapter four – zeolites and their potential uses in agriculture. *Advances in Agronomy*, 113, pp. 219-241.

Reháková M., Čuvanová S., Dzivák M., Rimár J., Gaval'ová Z., 2005. Agricultural and agrochemical uses of natural zeolite of the clinoptilolite type. *Current Opinion in solid state and Materials Science*, 8, pp. 397-404.

Rumbos C.I., Sakka M., Berillis P., Athanassiou C.G., 2016. Insecticidal potential of zeolite formulations against three stored-grain insects, particle size effect, adherence to kernels and influence on test weight of grains. *Journal of Stored Products Research*, 68, pp. 93-101.

Sprynskyy M., Lebedynets M., Terzyk A.P., Kowalczyk P., Namiešnik J., Buszewski B., 2005. Ammonium sorption from aqueous solutions by the natural zeolite Transcarpathian clinoptilolite studied under dynamic conditions. *Journal of colloid and Interface Science*, 284, pp. 408-415.

Subramanyam B., Lu J., Sehgal B., 2015. Laboratory evaluation of a synthetic zeolite against seven stored-grain insect species. 11th International Working Conference on stored Product Protection, pp. 894-902.

Ventilation à l'air ambiant en France : retour sur les conditions météo de la campagne 2018/2019

La ventilation à l'air ambiant est la principale technique mise en œuvre en France pour conserver le grain dans les silos. Dans le dernier numéro de la lettre stockage, nous vous avons présenté un bilan des possibilités de refroidissement de silos en France métropolitaine sur la période 1997/2017. Ce bilan consistait en une cartographie, pour chacun des trois paliers habituellement pratiqués, du nombre de cellules pouvant être refroidies successivement. Dans la continuité de ce bilan, nous vous proposons maintenant un retour sur le déroulement des trois paliers de la dernière campagne de stockage, celle de 2018/2019. Nous analyserons les statistiques nationales de l'offre climatique par palier, et nous présenterons ensuite une cartographie du potentiel de refroidissement en France métropolitaine. Ce paramètre, qui correspond au nombre de cellules qui peuvent être refroidies successivement, dépend des conditions météorologiques.

Comment estimer et cartographier le potentiel de refroidissement ?

Le refroidissement des grains est habituellement réalisé progressivement, par paliers de température. Pour ce bilan de la campagne 2018-2019, les dates de début et de fin de chacun des trois paliers, les doses spécifiques et les objectifs de température ont été définis tels que présentés dans la Figure 1 ci-dessous.

	Date début	Date fin	Dose spécifique (m3/m3)	Objectif de température (°C)
Palier 1	15/07/2018	14/09/2018	1000	20
Palier 2	15/09/2018	14/11/2018	1400	12
Palier 3	15/11/2018	14/01/2019	1800	5

Figure 1 : Caractéristiques des paliers de refroidissement utilisés pour calculer les potentiels de refroidissement en France

Le paramètre qui doit être cartographié, le potentiel de refroidissement, est le nombre de cellules qui peuvent être refroidies successivement (noté NCV pour Nombre de Cellules Ventilables). Il est calculé par la formule ci-dessous :

$$NCV = \frac{\text{Offre climatique} * \text{Debit spécifique}}{\text{Dose spécifique}}$$

- L'offre climatique est le nombre d'heures où la température est inférieure ou égale au seuil de température fixé pour chaque palier. L'offre climatique a été calculée pour 629 stations météorologiques de France métropolitaine, à partir des températures horaires modélisées par ClimV3 (modèle météorologique développé par Arvalis). Les stations météo choisies pour l'étude se trouvent à moins de 800 m d'altitude. Le réchauffage de l'air, engendré par sa compression dans le ventilateur, et qui est spécifique de chaque installation, n'est pas pris en compte dans le calcul.
- Le débit spécifique, exprimé en $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, correspond au débit du ventilateur rapporté au tonnage de grain ventilé. Ce paramètre dépend des installations. Quatre valeurs différentes, représentatives des installations de stockage de France, ont été retenues pour ce bilan : 4, 8, 12 et $16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$.
- La dose spécifique est la quantité d'air permettant de refroidir 1 m^3 de grain (passage d'une température initiale à la température objectif), exprimée en m^3 d'air/ m^3 de grain. Ce paramètre dépend de la nature du grain, de l'hygrométrie de l'air ventilé et des températures initiales et finales du grain. Les va-

leurs de doses spécifiques utilisées pour ce bilan sont présentées dans la figure 1. Elles ont été calculées pour du blé tendre, en utilisant des données d'hygrométrie d'air entrant moyennes mesurées à la station de Boigneville (91) sur la période 2011/2017.

Les résultats de ces calculs du potentiel de refroidissement ont ensuite été cartographiés sur le logiciel QGis (Version 2.14), par interpolation entre les 629 stations.

Une variabilité spatiale importante de l'offre climatique

Palier	1	2	3
Moyenne 2018/2019	765.3	664.1	632.3
Ecart-type 2018/2019	237.104	210.2162	239.7167

Figure 2 : Moyennes et écart-types de l'offre climatique de la campagne 2018/2019

L'offre climatique est un paramètre très variable d'une année sur l'autre (cf. lettre stockage n°9 de décembre 2018). Pour la campagne 2018/2019, les offres climatiques moyennes ont été de 765 h au premier palier, 664 h au deuxième, et 632 h au troisième. A titre d'exemple, les potentiels de refroidissement qui correspondent à ces valeurs moyennes sont, pour un débit spécifique de $8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$, de 6 cellules au premier palier, 3 cellules au second et 2 cellules au troisième. La variabilité spatiale de l'offre climatique a également été importante, avec des écart-types de plus de 200 heures.

Au premier palier, des potentiels satisfaisants malgré la forte chaleur estivale

Refroidissement de silos en France - Campagne 2018/2019 - Palier 1

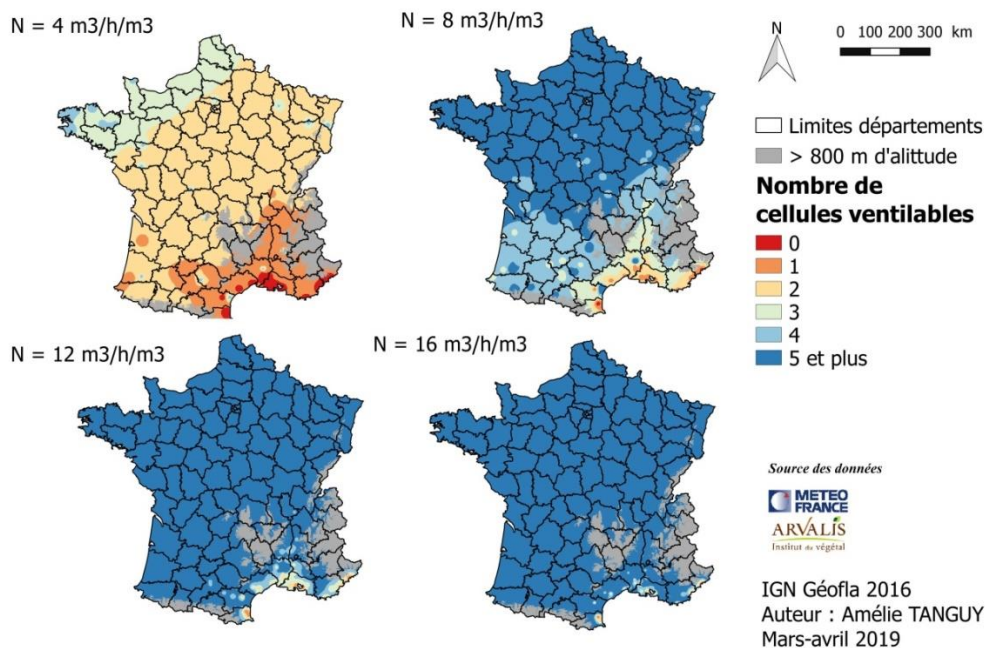


Figure 3 : Cartographie du potentiel de refroidissement en France métropolitaine pour le premier palier (du 15/07 au 14/09)

Avec un débit spécifique de $4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, deux cellules ont pu être refroidies dans une grande partie de la France. Les régions du Nord-Ouest de la France, bordées par la Manche, ont bénéficié d'une fraîcheur estivale qui a permis de refroidir trois cellules, et jusqu'à quatre dans certaines localités de Bretagne et de Normandie. Au contraire, les régions méditerranéennes ont été limitées à une cellule ventilable, voire aucune dans certaines localités.

Avec un débit spécifique de $8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$, le potentiel de refroidissement a atteint cinq cellules dans une grande partie Nord de la France (Globalement au nord du Massif Central). Les débits spécifiques de 12 et $16 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ permettaient de refroidir 5 cellules dans la quasi-totalité de la métropole.

Au palier 2, des conditions météo plus favorables dans la moitié Nord de la France

Refroidissement de silos en France - Campagne 2018/2019 - Palier 2

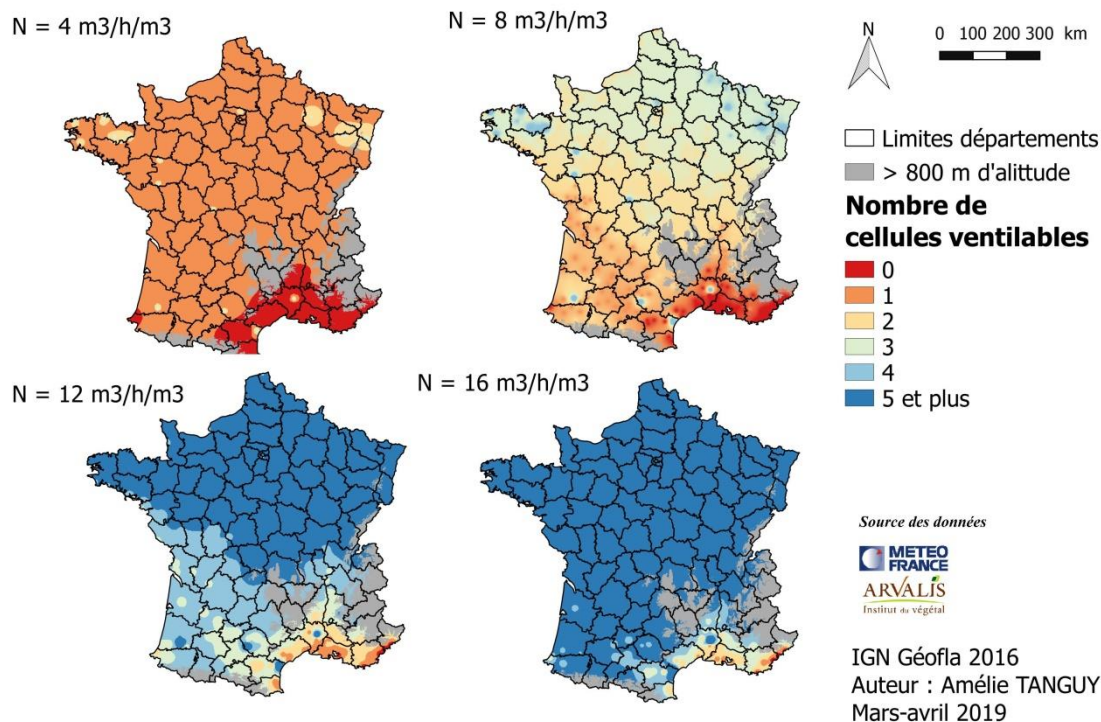


Figure 4 : Cartographie des potentiels de refroidissement en France métropolitaine pour le deuxième palier (du 15/09 au 14/11)

Au second palier, le débit spécifique de $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ était déjà fortement limitant : globalement, une seule cellule a pu être refroidie. Certaines localités, notamment en Bretagne et en Alsace-Lorraine, affichent un potentiel de refroidissement de deux cellules. Les régions méditerranéennes ont été pénalisées par une offre climatique insuffisante.

Avec un débit spécifique de $8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$, le potentiel de refroidissement oscille entre 1 et 4 cellules. A l'échelle de la France, il est difficile de découper de grandes régions en fonction du potentiel de refroidissement : il varie d'une localité à l'autre. D'une manière générale, les régions du Sud-Est ne bénéficient pas d'une offre climatique suffisante, tandis que les régions du Sud-ouest (Aquitaine, Poitou-Charentes, Midi-Pyrénées,

Limousin...) ont des potentiels de refroidissement de 1 à 2 cellules. Dans les autres régions, le potentiel variait entre 2 et 3 cellules ventilables, et jusqu'à quatre dans certaines stations de Bretagne, des Ardennes et d'Alsace-Lorraine.

Les débits spécifiques élevés (12 et $16 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$) conservent un bon potentiel de refroidissement sur la quasi-totalité du territoire.

Pour la période 1997/2017, le gradient du potentiel de refroidissement était orienté Nord-ouest/Sud-est. L'orientation de ce gradient était plutôt Nord-Sud pour la campagne 2018/2019.

Au troisième palier, les débits spécifiques élevés ont gardé de bons potentiels de refroidissement

Refroidissement de silos en France - Campagne 2018/2019 - Palier 3

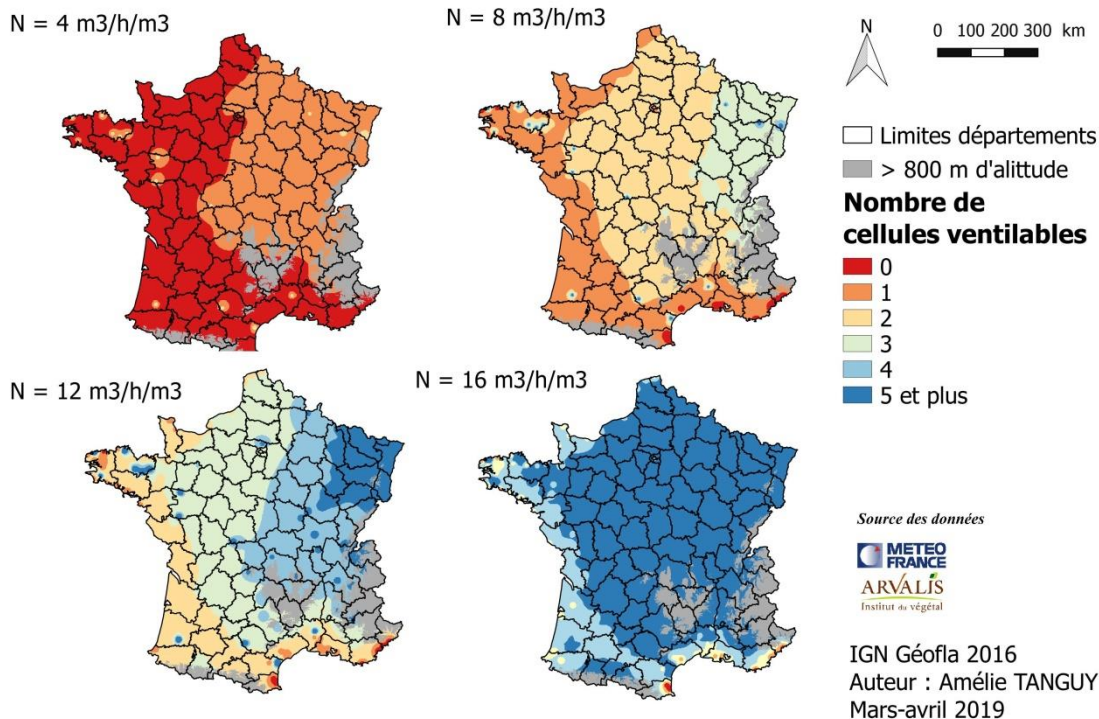


Figure 5 : Cartographie des potentiels de refroidissement en France métropolitaine pour le troisième palier (du 15/11 au 14/01)

Le palier 3 reste le palier le plus difficile à atteindre. Les cartes obtenues pour la campagne 2018/2019 sont très semblables à celles de la période 1997/2017, elles présentent les mêmes gradients Est/Ouest.

Avec un débit spécifique de $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$, les silos situés dans la moitié Ouest de la France et à proximité de la Méditerranée se sont retrouvés dans l'incapacité de refroidir entièrement leurs cellules. Dans le reste de la France, une cellule a pu être refroidie.

Avec un débit spécifique de $8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$, le potentiel de refroidissement varie selon un gradient est/ouest entre 1 cellule le long des côtes de l'Atlantique, de la Manche et de la Méditerranée et 3 cellules dans le Nord-est de la France.

Le même gradient est observé avec un débit spécifique de $12 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$. Les potentiels sont cette fois compris entre deux et cinq cellules.

Pour les sites dont les débits spécifiques sont de $16 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$, au moins 4 cellules peuvent être refroidies dans toute la France, à l'exception de quelques localités proches de la Méditerranée.

Les trois paliers ont pu être atteints sur une grande partie du territoire, pour les débits supérieurs à $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$.

Lors de la campagne 2018/2019, atteindre le palier 1 a été possible pour la plupart des sites, exception faite de ceux dont les débits spécifiques faibles limitent le nombre de cellules ventilables ($4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$). Ces sites sont également fortement limités pour réaliser le palier 2, et s'ils sont situés dans la moitié Ouest de la France ou à proximité de la Méditerranée, ils se sont retrouvés dans l'impossibilité de réaliser le palier 3. D'autant que ces sites présentent parfois des réchauffages importants, ce qui peut réduire significativement l'offre climatique.

Pour les débits spécifiques intermédiaires, 8 et $12 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$, il est possible de réaliser le premier palier pour au moins 4 cellules, mais au second et troisième palier, des gradients apparaissent. Le quart Nord-Est de la France conserve de bons potentiels de refroidissement aux paliers 2 et 3, alors que les régions de la façade Atlantique ont vu leur potentiel se réduire drastiquement par rapport au premier palier. Avec un débit spécifique de $16 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$, il est possible de refroidir au moins 5 cellules dans la majeure partie de la

France, et ce pour les trois paliers. Les régions bordées par l'Océan Atlantique, la Manche ou la Méditerranée ont une offre climatique moins importante, notamment aux paliers 2 et 3, ce qui permet tout de même le refroidissement de 4 cellules.

La comparaison avec les offres climatiques moyennes montre que la campagne 2018/2019 a présenté un déficit d'offre surtout pour la réalisation du 1^{er} palier (sur 254 stations météo pour lesquelles on dispose des données pour toute la période 1997/2019, le déficit d'offre climatique au premier palier de la campagne 2018/2019 est en moyenne de 159 h), et dans une moindre mesure pour les 2^{ème} et 3^{ème} paliers (Les déficits de la campagne 2018/2019 sont en moyenne de 46 et 64 heures respectivement, sur 254 stations météo). L'incidence de ces déficits sur le potentiel de

refroidissement est sensible uniquement pour les débits spécifiques inférieurs ou égaux à 8. En termes de risques de prolifération d'insectes, la bonne réalisation du deuxième palier est particulièrement importante, car cela permet d'amener la température du grain à une température à laquelle les insectes ne se reproduisent plus. Le risque insectes sur cette campagne a donc été plus élevé qu'en moyenne pour les débits faibles (≤ 8), notamment dans les régions au sud de la Loire. Le potentiel de refroidissement au 3^{ème} palier était quant à lui proche de la normale.

Amélie TANGUY

a.tanguy@arvalis.fr

Exploiter tout le potentiel de refroidissement à l'aide d'un thermostat

Dans tous les cas, pour optimiser la conduite du refroidissement, il est intéressant de s'équiper d'un thermostat, et d'asservir le déclenchement de la ventilation à ce thermostat. De tels dispositifs permettent de profiter de toutes les heures de froid disponibles, et évitent de ventiler inutilement lorsque la température devient supérieure à l'objectif du palier.



Figure 6 : Boîtier de commande Sec-LIS