



## Lettre technique d'ARVALIS

Juin 2021 - n° 15

### Sur le stockage des grains

#### SOMMAIRE

- Le remplissage des cellules et la propreté du grain influence la qualité de la ventilation ..... Pages 1-3
- Ventilation à l'air ambiant : la campagne 2020/2021 en 12 cartes ..... Pages 4-6

### LE REMPLISSAGE DES CELLULES ET LA PROPRETÉ DU GRAIN INFLUENCE LA QUALITÉ DE LA VENTILATION

Lors du remplissage gravitaire des cellules, un phénomène de tassement sous la chute du grain engendre une différence de porosité du milieu. La percussion des grains les uns contre les autres augmente le tassement sous la chute alors que sur les bords le grain s'écoule sans surpression. Ce type de remplissage crée donc un milieu poreux hétérogène dans lequel l'air sous pression pulsé par le ventilateur circule lui aussi de manière hétérogène, préférentiellement en périphérie du silo, là où la porosité est plus importante. Ce phénomène est renforcé par la différence de hauteur de grain entre la pointe du tas situé sous la chute et les bords.

Pendant les phases de ventilation, la mesure des vitesses d'air en surface du tas illustre ce phénomène. Elles sont élevées en périphérie et décroissent au fur et à mesure que l'on s'approche de la pointe jusqu'à devenir nulles sur le haut de la pente. Cet état de fait rend quasiment impossible le refroidissement de la partie supérieure de la pointe laissant une zone chaude à cet

endroit, propice au développement des populations d'insectes voire à la création de points chauds.

Remplir la cellule de manière homogène permettrait donc d'améliorer l'efficacité de la ventilation. A la demande de la société Crealyst<sup>1</sup>, nous avons testé ce postulat à l'aide d'un prototype d'éparilleur de grains qui permet un remplissage à plat des cellules tout en augmentant la masse volumique apparente des produits stockés.

Le matériel a été testé sur les cellules de la plate-forme métiers du grain. L'essai a consisté à remplir une cellule soit en chute gravitaire (modalité « Vrac »), soit en utilisant le système de répartition testé (modalité « Dense ») avec un même lot de blé de 45T. Trois répétitions sont effectuées pour chaque type de remplissage. Les critères mesurés sont : la planéité et la masse volumique apparente du grain en place, les vitesses de l'air sur le dessus du tas, le débit d'air en entrée du ventilateur et la pression statique de fonctionnement du ventilateur.

#### ► Le remplissage à plat augmente le PS en place de près de 10 %

La planéité a été mesurée à l'aide d'un télémètre laser. 25 points de mesures ont été relevés par rayon sur trois rayons permettant ainsi de modéliser le profil supérieur du grain après remplissage et donc de mesurer le volume occupé par le grain (figure 1).

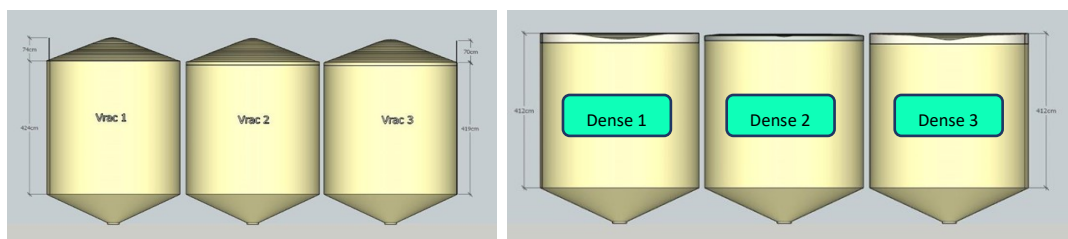


Figure 1 : Profils de remplissages (modalité Vrac à gauche, Dense à droite)

Le poids spécifique en place de la modalité « Dense » est en moyenne de 88,3 kg/hl, alors que celui de la modalité « Vrac » est en moyenne de 80,6 kg/hl. Le remplissage à plat a donc permis d'augmenter la masse volumique apparente d'environ 10 %.

<sup>1</sup> <https://www.crealyst.com/fr/>

## ► L'air circule de manière plus homogène dans le grain

Les vitesses d'air ont été mesurées avec un anémomètre à fil chaud équipé d'un cône Kimo 35 permettant d'accélérer les faibles vitesses. Le boîtier de lecture est un Kimo AMI 310, les mesures sont réalisées en mode moyenne automatique sur une durée de 15 secondes. Quatre rayons sont explorés selon la figure 2.

Au niveau des points de mesures les plus proches du bord (points A à 20 cm du bord), les vitesses d'air sont légèrement plus élevées pour la modalité dense que pour la modalité vrac. Au point B, l'écart se resserre, il n'y a pas vraiment de différence de vitesse entre les deux modalités. Mais à partir du point C, la différence entre les deux modalités s'affirme : les vitesses d'air moyennes de la modalité vrac se trouvent autour de 0.005 m/s, alors que pour la modalité dense, elles se situent entre 0.025 et 0.035 m/s : c'est 5 à 7 fois plus. Entre les points C et D, les courbes de chacune des deux modalités poursuivent leur tendance respective. Dans le cas de la modalité vrac, l'air ne circule pas, ou peu au centre de la cellule, qui correspond au sommet du cône formé par le tas de grain (vitesses d'air nulles ou très proches de 0). Pour la modalité dense, le centre de la cellule correspond au contraire au point le plus bas du tas de grain (la surface du tas est comparable à un cône dont la pointe se trouve en bas, voir figure 1). Le grain situé à cet endroit est probablement moins tassé, ce qui expliquerait l'augmentation de vitesse assez importante entre les points C et D.

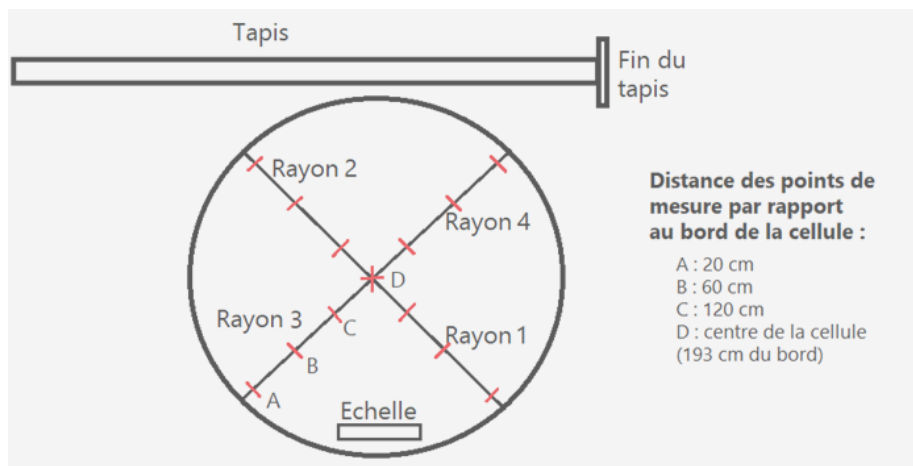


Figure 2 : Points de mesure de la vitesse d'air sur le grain

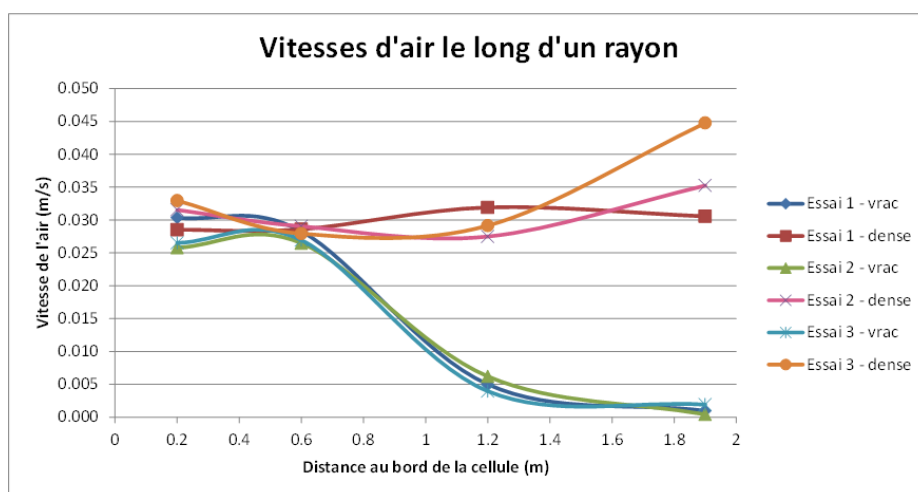


Figure 3 : Vitesse d'air sur les points de mesure le long d'un rayon en fonction des modalités de chargement

## ► La durée de ventilation est identique entre les deux modalités

Les débits d'air fournis par le ventilateur ont été calculés à partir des vitesses de l'air circulant dans la tuyauterie en amont du ventilateur à l'aide d'un anémomètre à fil chaud relié à un boîtier de lecture Kimo AMI 310. Ces mesures ont été réalisées sur deux diamètres d'une même section, avec des points de mesure répartis selon la méthode de Log-Tchebychev, conformément à la norme NF X10-112. La durée de refroidissement a été calculée sur une base de 800 m<sup>3</sup> d'air nécessaires pour refroidir 1 m<sup>3</sup> de grain. Le débit spécifique a été calculé en divisant le débit du ventilateur par le volume de grain ventilé. La pression statique de fonctionnement du ventilateur a été mesurée sous le cône de diffusion de l'air dans la cellule à l'aide d'un tube de Pitot relié à un lecteur Kimo AMI 310 (tableau 1).

Modalité	Vitesse (m/s)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Pression statique (Pa)	Volume grain (m <sup>3</sup> )	Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m <sup>3</sup> )	Durée de refroidissement (h)
Vrac	12,90	1459	532,8	55,9	26,1	30,65
Dense	11,89	1345	724,5	51,3	26,2	30,53
t-test	*		***			

Tableau 1 : Vitesses d'air dans la gaine de ventilation, débits et durée de refroidissement théorique par répétition et par modalité (seuil de significativité \*, 0,01<p<0,05 ; \*\*, 0,001<p<0,01 ; \*\*\* p<0,001)

La vitesse moyenne dans la gaine de ventilation est de 12,9 m/s dans le cas d'un chargement « Vrac » et 11,9 m/s dans le cas d'un chargement « Dense ». Un test de Student montre que ces vitesses sont significativement différentes ( $p=0,01955$ ). Une différence significative ( $p= 0.0001135$ ) de pression est également observée entre les deux modalités : en moyenne, la pression statique au niveau du cône de ventilation est de 533 Pa pour un chargement « Vrac », et de 725 Pa pour un

chargement « Dense ». Les débits spécifiques sont légèrement plus élevés pour le chargement « Dense » que pour le chargement « Vrac » car les volumes ventilés sont plus faibles en cas de chargement « Dense ». Les durées de refroidissement théoriques sont identiques pour les deux modalités (la différence n'est que de 7 minutes, en faveur du chargement « Dense »).



## Propreté du blé et pertes de charges

La propreté des grains modifie également le niveau de pertes de charges du réseau de ventilation et par conséquent la performance de la ventilation. En effet, plus les pertes de charges sont importantes, plus le niveau de pression de fonctionnement du ventilateur sera élevé (la pression sert à compenser les pertes d'énergie de l'air induites par le frottement de l'air en mouvement sur les parois des grains et de la tuyauterie). Or plus la pression de fonctionnement augmente plus le débit d'air fourni par le ventilateur diminue.

Ce phénomène a été mesuré sur la plateforme métiers du grain lors de la ventilation de deux lots de blé tendre possédant chacun un niveau d'impuretés différent. Ces lots ont été ensilés sans nettoyage préalable, les caractéristiques aérauliques de fonctionnement du ventilateur ont été mesurées sur le conduit reliant le ventilateur et la cellule de stockage. Ces lots sont ensuite passés au nettoyeur séparateur puis remis dans la même cellule, et les mesures aérauliques ont été répétées après nettoyage (tableau 2).

Le nettoyage des grains a permis une augmentation du débit d'air pulsé par le ventilateur, et du débit spécifique de l'ordre de 5 à 11 %, l'augmentation étant d'autant plus forte que le lot contenait plus d'impuretés avant nettoyage.

	Lot 1 avant nettoyage	Lot 1 après nettoyage	Lot 2 avant nettoyage	Lot 2 après nettoyage
Grains brisés (%)	0.37	0.45	0.52	0.67
Impuretés constituées par des grains (%)	0.88	1.14	1.73	1.47
Grains germés (%)	0	0	0.09	0.07
Impuretés diverses (%)	0.68	0.21	1.14	0.63
Impuretés totales (%)	1.93	1.8	3.48	2.84
PS (kg/hl)	81,6	82,4	79,3	81,2
Débit (m3/h)	1512	1549	1518	1628
Débit spécifique (m3/h/m3)	26,0	27,2	26,0	29,0

**Tableau 2 : Evolution de la teneur en impuretés, du PS des lots et des grandeurs aérauliques après nettoyage**

Les mêmes observations avaient été faites sur du maïs contenant une proportion variée d'impuretés par Grama et al (1984) qui a pu établir une relation linéaire entre la résistance à l'écoulement de l'air dans le maïs et la proportion de brisures dans ce maïs<sup>2</sup>.

### ► Limiter et homogénéiser les pertes de charges pour bien ventiler

Les deux essais présentés illustrent l'impact de la qualité du grain et du mode de remplissage de la cellule sur la résistance à l'écoulement de l'air et, par conséquent, sur la qualité de la ventilation. Plus le grain contient d'impuretés et plus il présentera une résistance au passage de l'air, faisant mécaniquement baisser le débit du ventilateur, le débit spécifique et donc allongera la durée de ventilation nécessaire pour la réalisation du palier. Quant au remplissage de la cellule, les effets de tassement et les

différences de hauteur de remplissage engendrent une hétérogénéité des vitesses d'air, certaines zones étant moins bien voire pas du tout ventilées. Lorsque l'on souhaite optimiser la ventilation, il est donc recommandé de nettoyer le grain au moment de la réception et d'arraser le haut du tas pour limiter l'hétérogénéité des vitesses d'air en homogénéisant les hauteurs de grains. S'équiper d'un éparpilleur de grains présente en plus l'avantage de limiter les effets de tassement et leur hétérogénéité.

Jean-Yves MOREAU  
[jy.moreau@arvalis.fr](mailto:jy.moreau@arvalis.fr)

<sup>2</sup> Grama, S. N.; Bern, Carl J.; and Hurburgh, Charles R. Jr., "Airflow Resistance of Mixtures of Shelled Corn and Fines" (1984). Agricultural and Biosystems Engineering Publications. 410. [https://lib.dr.iastate.edu/abe\\_eng\\_pubs/410](https://lib.dr.iastate.edu/abe_eng_pubs/410)

La ventilation à l'air ambiant dépend totalement des conditions climatiques. L'offre de froid est parfois insuffisante pour assurer un refroidissement aussi rapide que souhaité. Qu'en a-t-il été lors de la campagne 2020/2021 ? Selon Météo France, l'année 2020 a été la plus chaude depuis 1900. On peut notamment évoquer trois pics de chaleur en été (du 30/07 au 01/08, du 06/08 au 13/08 et du 13/09 au 16/09), pendant lesquels les températures nocturnes ont été particulièrement douces. Ces températures élevées se sont-elles répercutées sur le refroidissement des silos ? Pour le savoir, nous avons calculé les offres climatiques et les nombres de cellules ventilables pour 726 stations météo de France métropolitaine, pour trois paliers de ventilation. Les offres climatiques moyennes et les écart-types sont présentés dans cet article, ainsi que des cartes du potentiel de refroidissement de stockages.

## ► 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 2020-2021, les dates de début et de fin de trois paliers, leurs doses spécifiques et leurs objectifs de température retenus sont présentés dans le tableau 1 ci-dessous.

Palier	Date début	Date fin	Température de consigne (°C)	Dose spécifique (m <sup>3</sup> /h/m <sup>3</sup> )
1	15/07/2020	14/09/2020	20	1000
2	15/09/2020	14/11/2020	12	1400
3	15/11/2020	14/01/2021	5	1800

Tableau 1 : Caractéristiques des paliers de refroidissement tels qu'ils ont été utilisés dans l'étude

Le paramètre cartographié, assimilé au 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 suivante :

$$NCV = \frac{\text{Offre climatique} \times \text{Débit spécifique}}{\text{Dose spécifique}}$$

**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 726 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, qui est spécifique de chaque installation, n'est pas pris en compte dans le calcul car dépendant de chaque installation.

**Le débit spécifique**, exprimé en m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup>, 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 m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup>.

**La dose spécifique** est la quantité d'air permettant de refroidir 1 m<sup>3</sup> de grain (passage d'une température initiale à la température objectif), exprimée en m<sup>3</sup> d'air/m<sup>3</sup> de grain. Ce paramètre dépend de la nature du grain, de la variation d'hygrométrie de l'air en cours de ventilation et des températures initiales et finales du grain. Les valeurs de doses spécifiques utilisées pour ce bilan sont présentées dans le tableau 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 et une teneur en eau du grain de 14 %.

## ► Une offre climatique très inférieure à la normale en été

Palier	Campagne	Nb. Stations météo	Moyenne (h)	Ecart-type (h)
1	2020/2021	726	734	186
	2019/2020	631	835	221
	Période 1997/2017	369	850	105
2	2020/2021	726	649	163
	2019/2020	631	575	209
	Période 1997/2017	369	651	138
3	2020/2021	726	704	191
	2019/2020	631	488	244
	Période 1997/2017	369	649	228

Tableau 2 : Nombre d'heures présentant une T° inférieure au seuil de T° fixé par palier

Cette année, l'offre climatique du premier palier a été particulièrement basse : elle a été de 734 heures, soit 14 % de moins que la moyenne 1997/2017. Cette valeur se situe même en deçà du premier quartile 1997/2017, qui est de 789 heures. Au second palier, l'offre climatique a été très proche de la moyenne 1997/2017, environ 650 heures. Au troisième palier, l'offre climatique a été de 704 heures, c'est-à-dire 8% de plus que la moyenne 1997/2017. Cette valeur de 704 heures se trouve entre la médiane et le troisième quartile 1997/2017. Le troisième palier 2020/2021 a donc été plutôt froid, sans être pour autant exceptionnel. Les écart-types de la campagne 2020/2021 sont plus élevés que les écart-types moyens de la période 1997/2017, sauf pour le troisième palier. Cela signifie que par rapport aux années précédentes, les différences d'offre climatique entre régions ont été plus marquées pour les paliers 1 et 2.



## ► Un premier palier marqué par la canicule, sauf à proximité de la Manche

Cette année, avec un débit spécifique de  $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , deux cellules ont pu être refroidies à  $20^\circ\text{C}$  dans la majeure partie de la France. Alors que pendant la période 1997/2017 il était possible de refroidir 3 cellules dans la moitié Nord de l'Hexagone, et 2 cellules dans la moitié Sud, cette année la zone où l'on ne pouvait refroidir que 2 cellules s'est étendue vers le Nord. Seule une bande de 100 à 200 km le long des côtes de la Manche a conservé un potentiel de 3 cellules ventilables. En Occitanie, dans la vallée du Rhône et dans les Landes, les potentiels ont été de 0 à 1 cellule, ce qui est en deçà de la moyenne 1997/2017. Pour un débit spécifique de  $8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , 5 cellules ou plus ont pu être refroidies dans la moitié Nord de la France, à quelques exceptions près. Dans la moitié sud, les potentiels ont été plus variables, de 1 à 4 cellules, selon la proximité des côtes et le relief. Pour les débits spécifiques les plus élevés, ici 12 et  $16 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , il a été possible de refroidir au moins 5 cellules dans la quasi-totalité de la France.

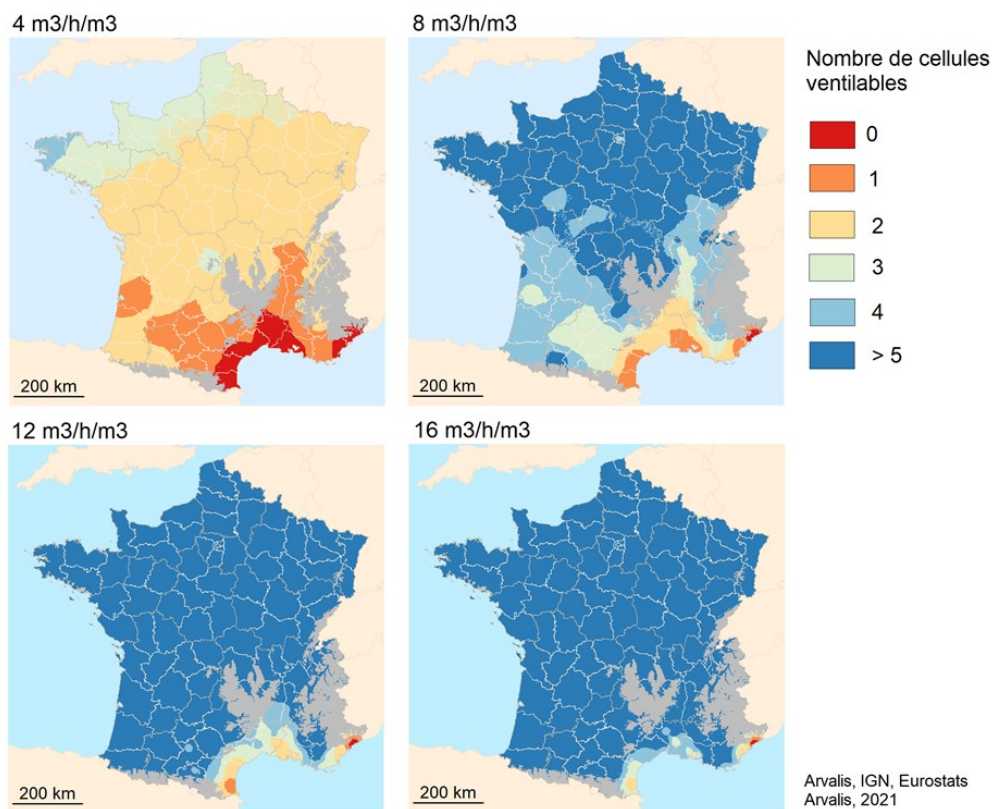
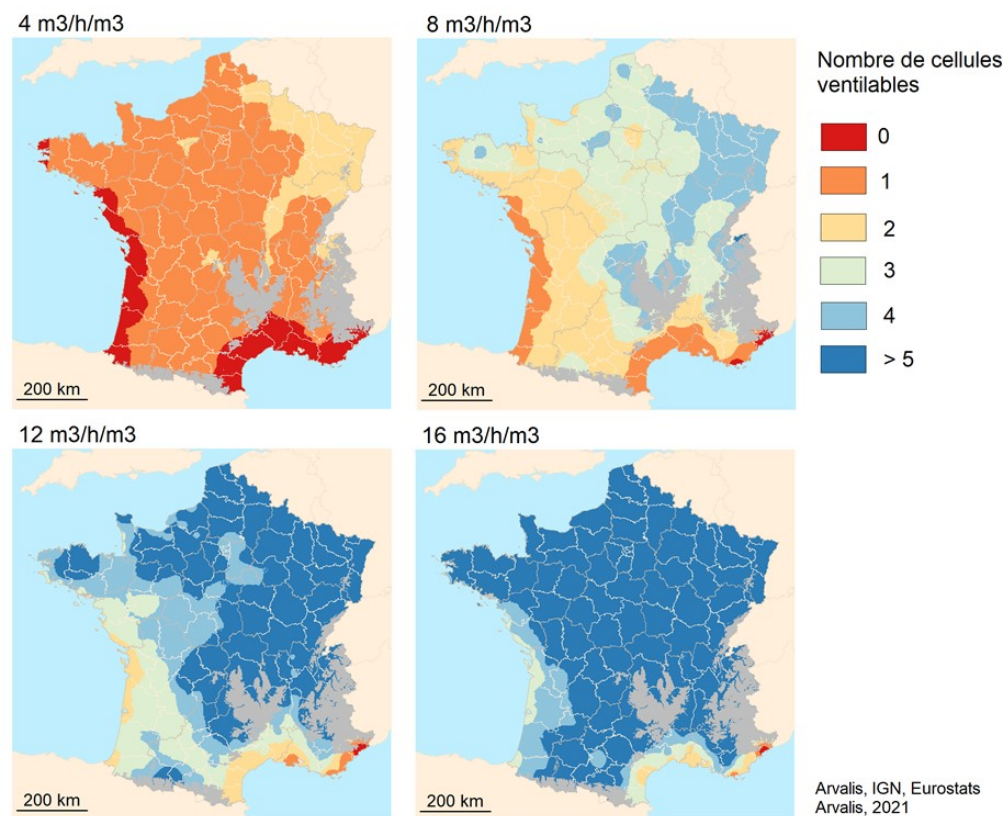


Figure 1 : Nombre de cellules ventilables entre le 15/07/2020 et le 14/09/2020 pour une température objectif de  $20^\circ\text{C}$

## ► Une forte influence océanique lors du second palier



Les cartes du deuxième palier montrent un gradient de potentiel orienté Est-Ouest : plus on s'éloigne de l'Océan Atlantique, meilleurs sont les potentiels de refroidissement. Pendant la période 1997/2017, le gradient de potentiel était orienté Nord-Ouest/Sud-Est. Par rapport à la période 1997/2017, les potentiels de refroidissement ont diminué dans les régions du Nord-Ouest de la France (Pays de la Loire, Normandie, Bretagne) alors qu'ils ont plutôt augmenté dans l'Est et dans le Massif Central. Ils sont restés stables partout ailleurs. Par exemple, pendant la période 1997/2017, avec un débit spécifique de  $8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , il était possible de refroidir 3 cellules en moyenne en Loire-Atlantique et dans le Maine-et-Loire. Ce potentiel était de 2 cellules ventilables lors de l'automne 2020.

Figure 2 : Nombre de cellules ventilables entre le 15/09/2020 et le 14/11/2020 pour un objectif de température de  $12^\circ\text{C}$

## ► Un hiver propice au refroidissement des stockages

Pendant l'hiver, les potentiels de refroidissement étaient orientés selon un gradient Est/Ouest, tout comme pendant la période 1997/2017. Avec un débit spécifique de  $4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , il a été possible de refroidir une cellule jusqu'à  $5^\circ\text{C}$  dans la majeure partie de la France, et jusqu'à 2 cellules dans le Nord-Est. Habituellement, un tel débit spécifique ne permet pas de refroidir le grain à  $5^\circ\text{C}$  dans la moitié Ouest de la France. Avec un débit spécifique de  $8 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , les potentiels de refroidissement ont été compris entre 1 et 4 cellules. Avec un débit spécifique de  $12 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , il a été possible d'atteindre  $5^\circ\text{C}$  dans au moins 2 cellules sur la quasi-totalité du territoire. Les potentiels ont dépassé 5 cellules dans l'Est de la France ainsi que dans la Limagne de l'Allier. Avec un débit spécifique de  $16 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ , il a été possible de refroidir 5 cellules ou plus dans la majeure partie de la France. En Bretagne, en Normandie, en Nouvelle-Aquitaine et sur les bords de la Méditerranée, les potentiels de refroidissement ont généralement été compris entre 2 et 4 cellules ventilables.

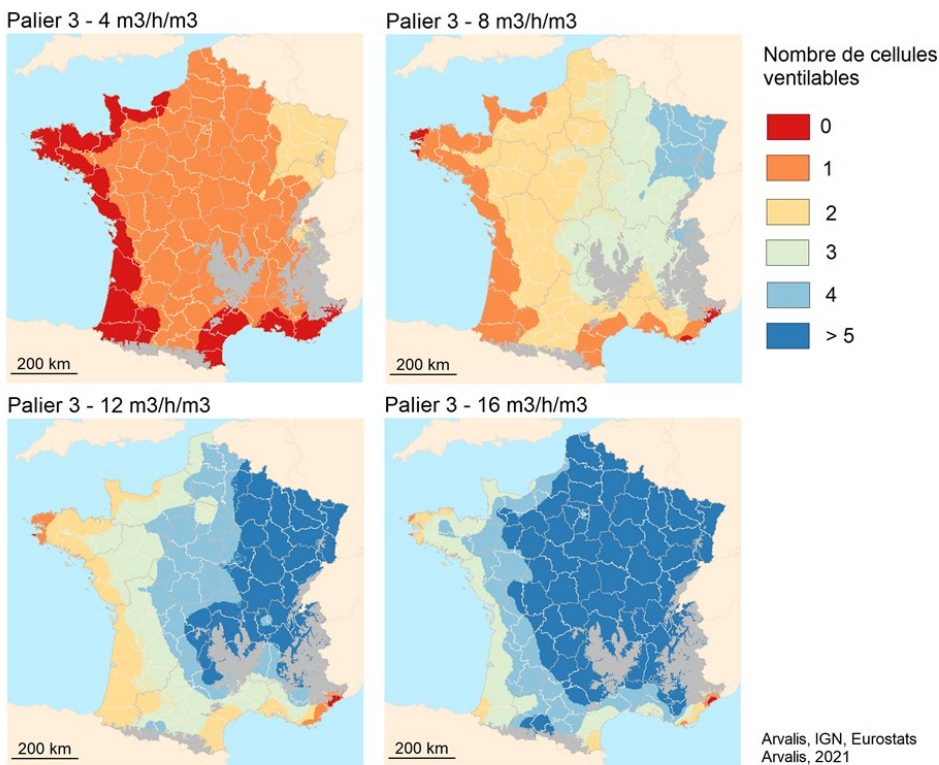


Figure 3 : Nombre de cellules ventilables entre le 15/11/2020 et le 14/01/2021 pour un objectif de température de  $5^\circ\text{C}$

## ➤ Conclusion : que retenir de ce bilan ?

La campagne 2020/2021 a été marquée par un été chaud, où l'offre climatique a été particulièrement restreinte, et au contraire un hiver relativement froid. L'offre climatique du troisième palier se situait au-dessus de la médiane 1997/2017, ce qui s'est traduit par une amélioration du potentiel de refroidissement dans de nombreuses régions. Bien que l'offre climatique moyenne du troisième palier ait été plus élevée que celle du deuxième palier, les potentiels de refroidissement du troisième palier sont restés inférieurs à ceux des paliers 1 et 2. En effet, la quantité d'air nécessaire pour atteindre l'objectif de  $5^\circ\text{C}$  dans le grain est supérieure aux quantités nécessaires pour atteindre les objectifs de  $20^\circ\text{C}$  et  $12^\circ\text{C}$ . Il faut également

souligner que le contraste entre régions a été légèrement plus marqué que lors de la période 1997/2017. En effet, notamment aux paliers 2 et 3, les régions proches du Golfe de Gascogne ont connu des potentiels de refroidissement moindres que la moyenne, alors que dans le Nord-Est, les potentiels de refroidissement ont été plus élevés que la moyenne.

La période du 15/07 au 14/09 est critique pour le risque insectes. Par exemple, si le grain n'est pas refroidi, une population de charançons du riz (*S. oryzae*) peut passer de 1 charançon/tonne en début de stockage à 1 charançon/kg au bout de 2 mois (figure 4). Pour la suite de la campagne, la population d'insectes stagne après le palier 2 (grain à  $12^\circ\text{C}$ ) puis décline après le palier 3 (grain à  $5^\circ\text{C}$ ). Bien que cette année, les possibilités de refroidissement au troisième palier aient été légèrement plus élevées qu'à l'accoutumée, il ne faut pas compter sur cette étape pour éradiquer les insectes. En effet, pour revenir à 1 insecte/tonne, il faudrait maintenir le grain à  $5^\circ\text{C}$  pendant plus de 200 jours.

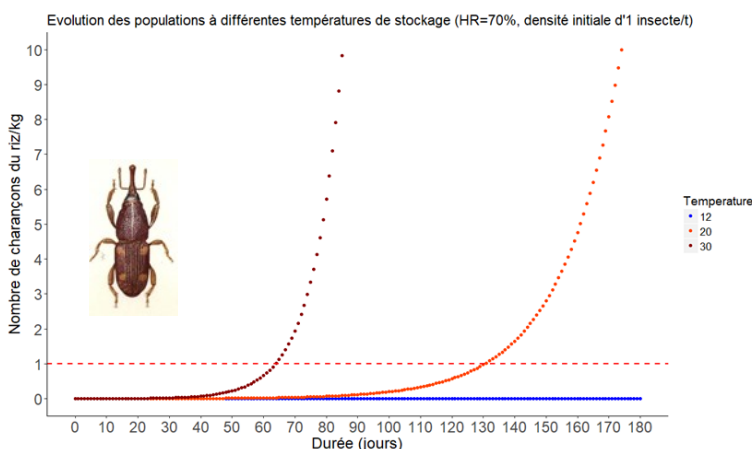


Figure 4 : Evolution d'une population de charançons du riz à  $12^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  et  $30^\circ\text{C}$  (calculs réalisés selon le modèle de Driscoll)

Amélie TANGUY  
[a.tanguy@arvalis.fr](mailto:a.tanguy@arvalis.fr)

### Références bibliographiques

Météo France, bulletins climatiques 2020 : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/843> (Consulté le 11/05/2021).

R. Driscoll, B.C. Longstaff, S. Beckett, Prediction of insect populations in grain storage, Journal of Stored Products Research, 2000.