



### SOMMAIRE

Quelles sont les capacités de ventilation des installations de stockage en ferme ? .....Pages 1 - 4

Quel est l'impact du pilotage sur l'efficacité de la ventilation ? .....Pages 5 - 8



#### INSCRIVEZ-VOUS

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

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

## QUELLES SONT LES CAPACITÉS DE VENTILATION DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE EN FERME ?

Les précédentes enquêtes que nous avons réalisées en collaboration avec BVA illustrent l'importance du stockage des grains par les agriculteurs et le taux élevé d'équipement de ventilation de ces stockages agricoles (83 % des stockages en étaient équipés en 2022)<sup>1</sup>. Mais cette enquête ne donnait aucune information sur les performances des systèmes, ni a fortiori sur leur capacité à refroidir le grain stocké suffisamment rapidement pour mettre les récoltes à l'abri d'une infestation éventuelle par des insectes.

Pour combler cette lacune, nous avons initié un travail d'enquête auprès des agriculteurs afin de décrire plus précisément leur système de ventilation, calculer leurs performances aérauliques et déterminer leur capacité de refroidissement en tenant compte à la fois de l'installation et du climat local.

La méthode mise en œuvre repose sur trois types de données :

1. La description de chaque unité de ventilation d'un stockage, c'est-à-dire la description de chaque cellule ou case de stockage (capacité de stockage, hauteur de grain) rattachée à un ventilateur, lui-même décrit par sa marque et son modèle ;
2. Les performances aérauliques du ventilateur raccordé à chaque cellule ou case décrite (débit spécifique et réchauffage de l'air au point de fonctionnement) ;
3. Le nombre d'heures favorables à la ventilation comptabilisées sur la station météorologique la plus proche de l'exploitation.

### ▶ Près de 400 unités de ventilation décrites

Les descriptions des unités de ventilation ont été obtenues par voie d'enquête. Le questionnaire a été adressé aux 42 000 abonnés à ARVALIS infos en juin 2025. Après nettoyage de la base de données, nous disposons d'une description complète de 386 unités de ventilation installées dans 170 exploitations bien réparties sur l'ensemble du territoire, à l'exception de la région PACA (figure 1).

#### Localisation des unités de ventilation

Base=386 unités de ventilation

170 exploitations

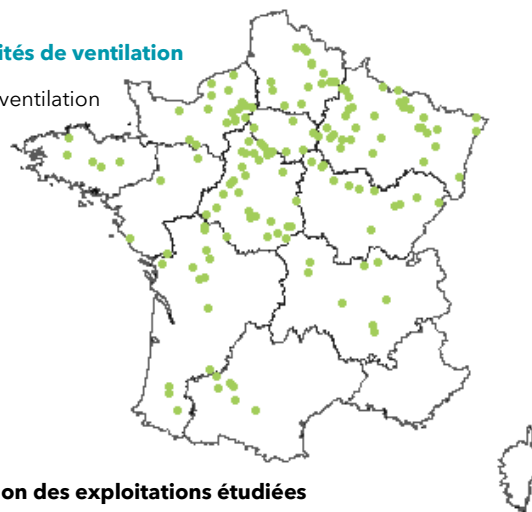


Figure 1 : Localisation des exploitations étudiées

<sup>1</sup> Voir Lettres Stock@ge n° 11 et n° 20

de blé tendre ayant un PS en place de 80 kg/hl. Nous avons ainsi calculé le débit spécifique de chaque couple ventilateur/cellule de notre base de données (équation 1) :

$\text{débit spécifique (m}^3\text{/h/m}^3\text{)} = \frac{\text{débit (m}^3\text{/h)}}{\text{volume stocké (m}^3\text{)}}$	Équation 1
---	------------

Le débit spécifique de l'unité de ventilation (UV) est alors calculé en partant du principe que chaque cellule et/ou case raccordée au ventilateur est ventilée successivement. Ainsi, on peut relier la durée totale de ventilation au débit spécifique de l'unité de ventilation par les équations suivantes :

$\text{durée ventilation cellule } i \text{ (h)} = \frac{\text{dose spécifique (m}^3\text{/m}^3\text{)}}{\text{débit spécifique cellule } i}$	Équation 2
$\text{durée totale ventilation (h)} = \sum_{i=1}^n \text{durée ventilation cellule } i$	Équation 3
$\text{durée totale ventilation (h)} = \frac{\text{dose spécifique (m}^3\text{/m}^3\text{)}}{\text{débit spécifique UV ((m}^3\text{/h)/m}^3\text{)}}$	Équation 4
$\text{débit spécifique UV (m}^3\text{/h/m}^3\text{)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{débit spécifique cellule } i}}$	Équation 5

La dose spécifique est le volume d'air nécessaire pour refroidir un volume de 1 m<sup>3</sup> de grain. Elle est estimée à 1 000 m<sup>3</sup> d'air par m<sup>3</sup> de grain pour faire passer le grain de 30 °C à 20 °C en été. En automne, la dose spécifique est estimée à 1 400 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, pour refroidir le grain de 20 à 12 °C.

Pour chaque unité de ventilation, le réchauffage retenu est le réchauffage le plus élevé obtenu pour les cellules et/ou cases qui composent cette unité de ventilation.

▶ *La performance de l'unité de ventilation s'apprécie en comparant son débit spécifique au débit spécifique minimal requis pour refroidir le grain à 12 °C au 15 novembre*

Enfin, le nombre d'heures favorables à la ventilation (ou offre climatique) est obtenu à partir de données météorologiques (Météo France) en cumulant toutes les heures dont la température est inférieure ou égale à l'objectif de refroidissement du grain (12 °C pour éviter la reproduction des insectes) duquel on soustrait le réchauffage de l'air associé au ventilateur, entre la récolte (fixée au 15/07) et la mi-novembre. Pour chaque unité de ventilation, ce calcul est réalisé à partir des données collectées sur la station météorologique la plus proche. Pour tenir compte de la variabilité observée chaque année, le calcul a été réalisé pour les 20 années entre 2000 et 2019. Nous avons ensuite considéré le 10<sup>ème</sup> percentile de cette offre climatique. Celle-ci, assimilée à la durée maximale disponible pour refroidir, permet de déterminer le débit spécifique minimal requis pour refroidir le grain à 12 °C (Equation 2), 9 années sur 10, sur la période étudiée. Ce débit spécifique minimal requis est ensuite comparé au débit spécifique de l'unité de ventilation. S'il est supérieur, alors l'unité de ventilation ne sera pas en mesure de refroidir le grain à 12 °C avant le 15/11, 9 années sur 10. S'il est inférieur, alors l'installation de ventilation a la capacité théorique de refroidir le grain à 12 °C.

▶ *Les ventilateurs sont majoritairement raccordés à des cellules*

Les unités de ventilation sont constituées en majorité d'un ventilateur rattaché à une ou des cellules (258), moins souvent à une ou des cases (103) et très minoritairement à des cellules et à des cases (25).

Le débit spécifique moyen des 386 unités de ventilation est de 20,5 m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup>, le débit spécifique médian est de 13,4 m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup>, le minimum est de 2,4 m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup> et le maximum de 165,9 m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup>. Il n'existe pas d'effet régional sur le débit spécifique des unités de ventilation, ce qui indique que le climat n'a pas été pris en compte dans le dimensionnement de l'installation de ventilation.

Le débit spécifique médian des UV constituées uniquement de cellules et de 13 m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup>, celui des UV constituées uniquement de cases de 15,7 m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup> et celui des UV constituées à la fois de cases et de cellules est de 10,3 m<sup>3</sup>/h/m<sup>3</sup>. Ces différences entre type d'unités de ventilation ne sont pas significatives (test de Kruskal Wallis, p-value=0.3051). Les unités de ventilation constituées de cases ne sont pas statistiquement moins performantes que celles constituées de cellules.



<sup>2</sup> Venti-LIS agri est un outil gratuit mis à disposition sur le site <https://ventilis.arvalis-infos.fr/ventilis-agri/accueil>. Il a été développé par ARVALIS, en partenariat avec NEU FEVI et le soutien financier de FranceAgriMer.

▶ Dans la moitié des cas, 1 ventilateur alimente 2 cellules ou moins

Le nombre médian de cases ou cellules raccordées au ventilateur est de 2 (moyenne = 2,5). Le minimum est de 0,1 case raccordée (en fait 10 ventilateurs pour une seule grande case), le maximum est de 13 cellules raccordées à un seul ventilateur (figure 3). Ce nombre de cellules et/ou de cases raccordées au ventilateur ne suffit pas à lui seul à expliquer le débit spécifique de l'unité de ventilation. On peut avoir, pour un nombre relativement faible de cellules et/ou cases dans l'unité de ventilation (2 ou moins) des débits spécifiques très faibles ou très élevés. A l'inverse cependant, on n'observe pas de débits spécifiques élevés lorsque le nombre de cellules et/ou cases raccordées est important (figure 4).

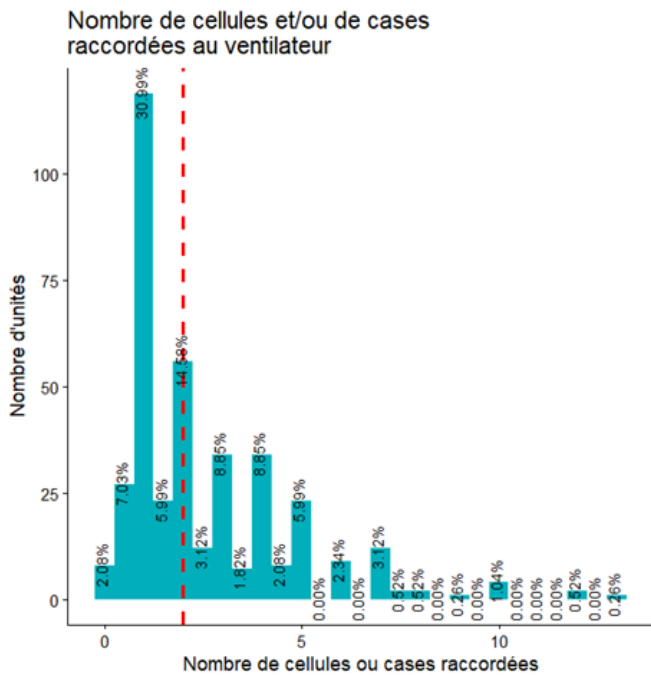


Figure 3 : Proportion d'unités de ventilation selon le nombre de cellules et/ou de cases la constituant

▶ Le réchauffage de l'air est faible

75 % des unités de ventilation présentent un réchauffage inférieur à 2 °C. Il existe un effet significatif du type de stockage sur le réchauffage de l'air maximal de l'unité de ventilation, les UV constituées uniquement de cases ayant un réchauffage nettement plus faible en raison d'une hauteur de grains stockés plus faible qu'en cellule (figure 5). Moins l'air se réchauffe dans le ventilateur et plus on dispose de fenêtres favorables à la ventilation. En effet, lorsque le réchauffage est élevé, la température d'air recherchée pour atteindre l'objectif de refroidissement sera plus faible. Par exemple, avec un réchauffage de 4 °C, pour refroidir à 12 °C, il faudra insuffler de l'air à 8 °C. On comprend que le nombre d'heures disponibles sera plus faible sur une période donnée et que la date d'achèvement du refroidissement sera plus tardive.

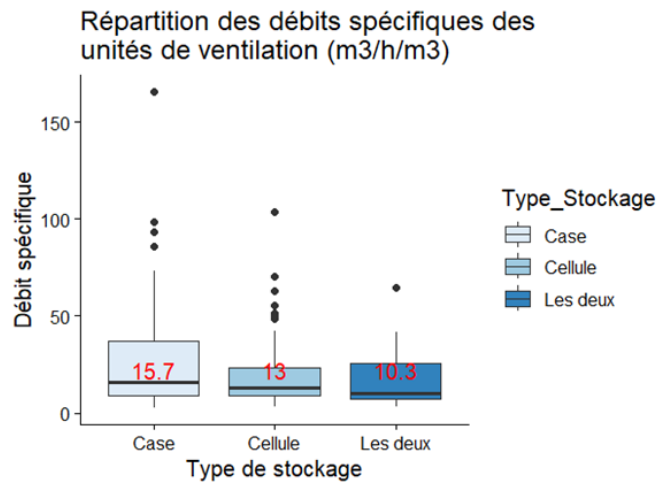


Figure 2 : Débit spécifique (m³/h/m³) des unités de ventilation en fonction du type de stockage raccordé au ventilateur. Les valeurs médianes sont indiquées en rouge

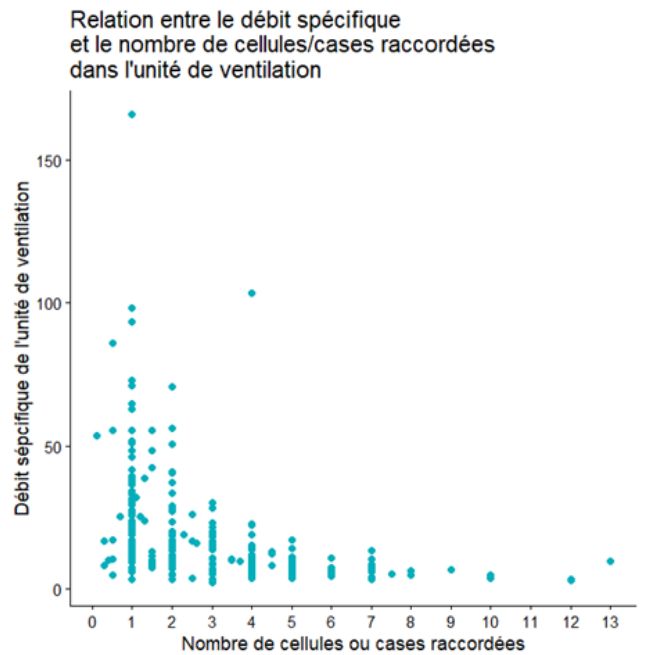


Figure 4 : Relation entre le débit spécifique de l'unité de ventilation et le nombre de cellules et/ou de cases dans l'unité de ventilation

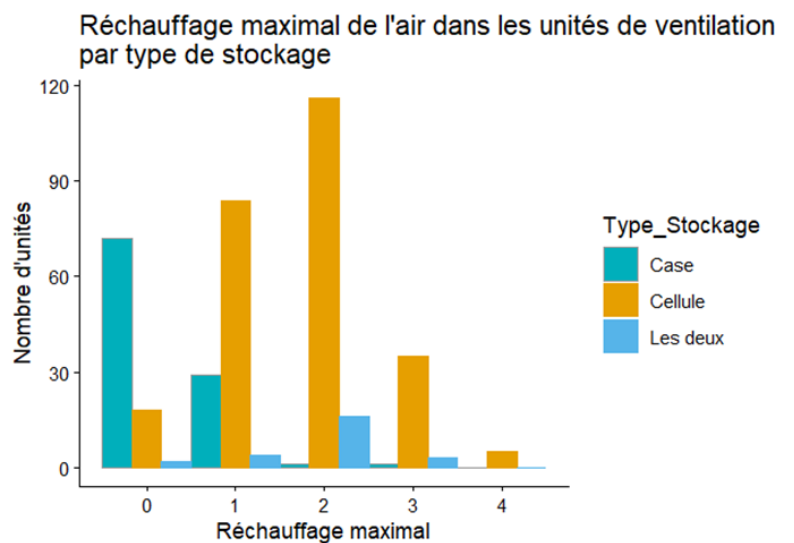


Figure 5 : Répartition des réchauffages de l'air maximaux dans les unités de ventilation selon le type d'unité (cellule ou case)



## QUEL EST L'IMPACT DU PILOTAGE SUR L'EFFICACITÉ DE LA VENTILATION ?

La ventilation de refroidissement des grains permet, dans un premier temps, de limiter la vitesse de reproduction des insectes (palier d'été, objectif 20 °C), puis dans un second temps d'arrêter la prolifération des populations (palier d'automne, objectif 12 °C). Une ventilation est efficace si elle permet de refroidir le grain à l'objectif de température dans un délai suffisamment bref pour maîtriser le développement des populations. Mais un autre critère est intéressant : l'efficacité, c'est-à-dire l'énergie consommée pour atteindre l'objectif. Pour aborder cette question, nous disposons des données d'une expérimentation pluriannuelle conduite sur notre plateforme de Boigneville. Trois modes de pilotage de la ventilation différents ont été appliqués à trois cellules identiques, toutes remplies du même volume de blé tendre. La question posée est : y a-t-il une stratégie plus efficace et/ou plus efficiente ?

### ▶ Trois cellules équipées de capteurs conduites selon trois itinéraires différents

L'essai s'est déroulé entre juillet 2022 et mai 2025 sur trois campagnes de stockage successives. A chaque campagne, le grain était stocké pendant environ 10 mois, de juillet à mai. La figure 1 présente de manière schématique les trois stratégies de pilotage étudiées, ainsi que les équipements de mesure de température et d'hygrométrie utilisés pour le suivi de l'essai. Des échantillons de grain étaient prélevés chaque mois à différentes hauteurs, pour mesurer la teneur en eau. Les stratégies de pilotage étudiées sont les suivantes :

1. **Pilotage automatisé par rapport à un seuil variable.** Dans ce cas de figure, c'est la température du grain la plus élevée mesurée sur la ligne de thermométrie qui sert de référence. L'écart entre cette température et celle de l'air extérieur doit être d'au moins 7 °C, majoré du réchauffage de l'air par le ventilateur (1 °C dans notre cas) pour que le système déclenche la mise en route du ventilateur. Une durée minimale de fonctionnement d'une heure est imposée au système pour limiter les mises en routes et arrêts intempestifs. Dans ce mode de pilotage, la notion de palier d'été et d'automne disparaît, le refroidissement est continu. Ce mode de pilotage n'a pas été testé lors de la campagne 2024/2025.
2. **Pilotage manuel associé à une horloge.** Il consiste à regarder les prévisions météorologiques chaque jour à 17 h, et à déclencher manuellement la ventilation si les conditions sont favorables. On considère qu'une nuit est favorable lorsque le site Météociel ne prévoit, entre 22 h et 6 h, que des températures inférieures à l'objectif moins 1 °C. La plage de ventilation est systématiquement de 8 heures (heures creuses pour le site de Boigneville).
3. **Pilotage automatisé avec un seuil fixe.** Il consiste à asservir le ventilateur à un thermostat qui mesure la température de l'air à l'extérieur du bâtiment. La température de consigne pour le démarrage du ventilateur est l'objectif de température du palier, à laquelle on retranche le réchauffage de l'air au niveau du ventilateur. Une hystérésis de 0,2° C est appliquée afin de limiter le nombre de cycles de démarrages et d'arrêts lorsque la température est proche de la consigne.

L'objectif final de refroidissement (12 °C) est identique pour les trois modes de pilotage. Cependant, pour les deux derniers modes (manuel et seuil fixe), un palier intermédiaire à 20 °C est réalisé. Les indicateurs retenus sont la durée de ventilation et la date de

réalisation de l'objectif. En parallèle de ces indicateurs, la teneur en eau des grains est mesurée aux différents niveaux des points de prélèvement (prélèvements mensuels). Les caractéristiques de l'air, température et hygrométrie, en sortie de ventilateur sont enregistrées. A noter que la cellule C3 disposait d'un suivi plus fin, avec des capteurs d'hygrométrie positionnés sur toute la hauteur de la cellule, permettant de suivre la qualité de l'air interstitiel (température et humidité relative) dans le grain.

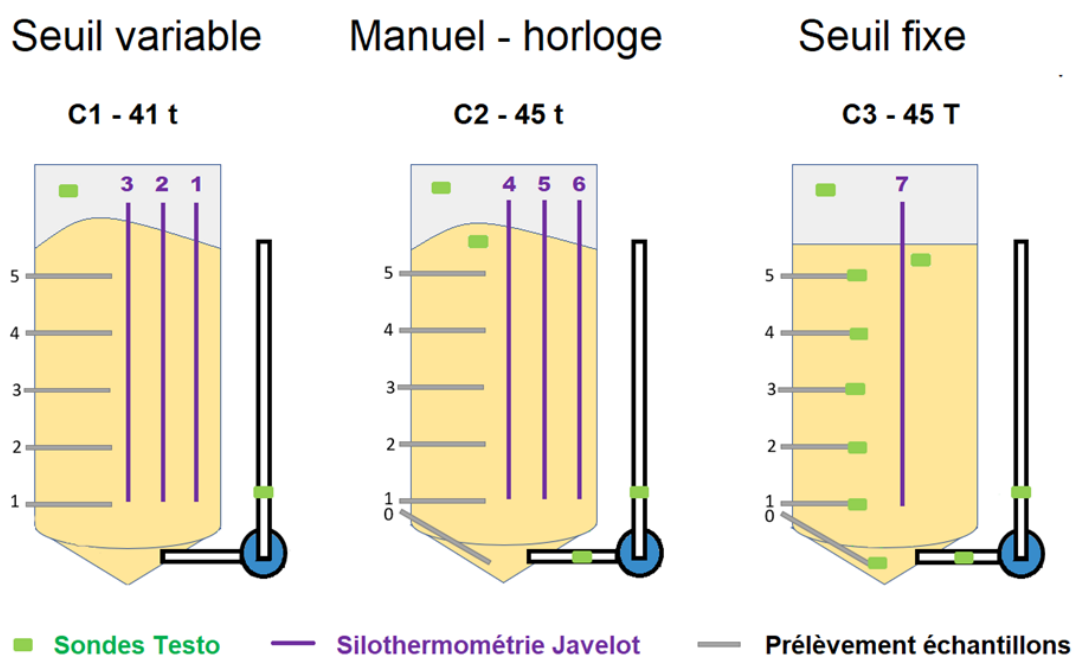


Figure 1: Trois modes de pilotage différents, ayant tous pour objectif de refroidir le grain à 12 °C, ont été suivis pendant deux à trois campagnes successives. Les trois cellules sont chacune raccordées à un ventilateur de même modèle

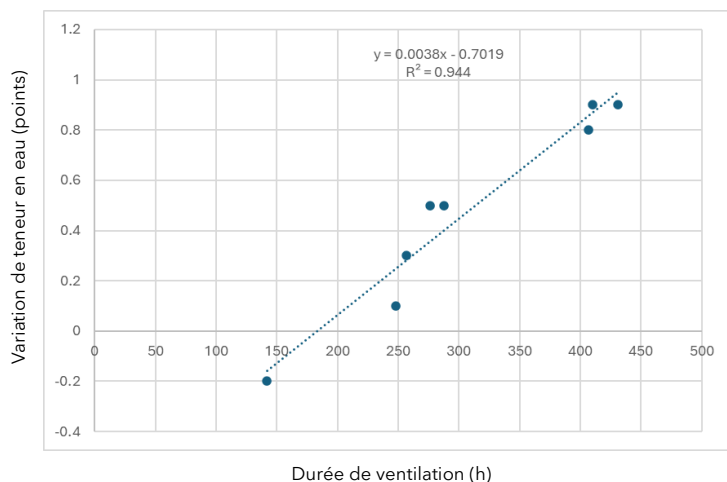
**Tableau 1 : Dates de début de l'essai, Dates auxquelles le grain était refroidi à 12 °C, Durée de ventilation et reprise en eau associée à la ventilation (mesures sur échantillons prélevés peu après la fin de la ventilation)**

Campagne	Stratégie	Début de l'essai	Grain refroidi à 12 °C	Nb. heures de fonctionnement des ventilateurs	Reprise en eau moyenne (en points) TE moy entrée – TE moyenne grain à 12 °C
2022/2023	Seuil variable	08/07/2022	26/11/2022	257	+0.3
	Manuel horloge	08/07/2022	20/11/2022	276	+0.5
	Seuil fixe	08/07/2022	15/11/2022	407	+0.8
2023/2024	Seuil variable	18/07/2023	17/10/2023	142	-0.2
	Manuel horloge	18/07/2023	27/11/2023	288	+0.5
	Seuil fixe	18/07/2023	17/10/2023	410	+0.9
2024/2025	Manuel horloge	1/08/2024	14/11/2024	248	+0.1
	Seuil fixe	1/08/2024	12/11/2024	431	+0.9

Le tableau 1 résume le déroulement des ventilations pour les différentes stratégies de pilotage et les trois campagnes. Quelle que soit la campagne, l'objectif a toujours été atteint plus tôt avec le pilotage par seuil fixe. Le retard du pilotage à seuil variable n'a jamais dépassé 11 jours, alors que celui du pilotage manuel pouvait atteindre 40 jours.

Le mode de pilotage avec seuil variable s'est distingué par un nombre d'heures de fonctionnement bien moindre pour refroidir complètement le grain. En moyenne, il a fallu ventiler presque deux fois moins longtemps qu'avec le pilotage à seuil fixe. La différence par rapport au pilotage manuel est moins nette. Les durées de ventilation pour la campagne 2022 ont été identiques. En revanche, lors de la campagne 2023, il a fallu ventiler 142 heures avec le pilotage automatique à seuil variable, contre 288 heures avec le pilotage manuel, soit le double.

La ventilation s'est accompagnée d'une reprise en eau du grain. Cette reprise en eau était plus marquée pour le pilotage par thermostat à seuil fixe, sans doute en lien avec la durée de ventilation plus importante. En effet, comme on peut le voir sur la figure 2, il existe une relation entre la reprise en eau (en points) et la durée de ventilation (heures). C'est une relation linéaire, selon laquelle plus la durée de ventilation est importante, plus le grain se réhumidifie. La qualité de la relation est très bonne, comme l'indique le coefficient de corrélation de 0.94.



Pour explorer le lien entre échange d'eau et échange de chaleur, nous avons utilisé les données de la cellule C3, où des thermo-hygromètres étaient installés à différentes hauteurs dans le grain. En effet, en connaissant la température et l'hygrométrie, il est possible d'estimer la teneur en eau du grain, en supposant que celui-ci est en état d'équilibre avec l'air, à l'aide du modèle de Chung-Pfost (Equation 1). Dans cette équation, TE est la teneur en eau du grain, exprimée en base sèche. T est la température de l'air interstitiel, en °C, et HR son hygrométrie, en %.

$$TE = \frac{1}{-81.444} \times \ln\left(\frac{(T + 0.17941) \times \ln(HR)}{-715.19}\right)$$

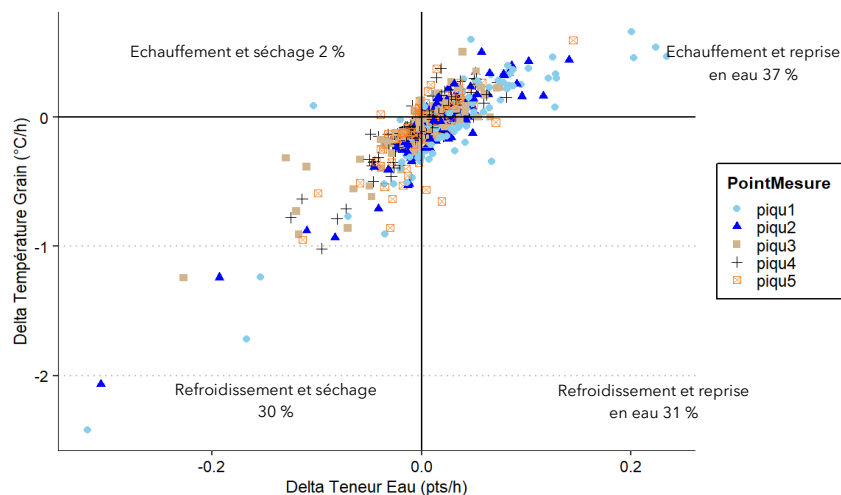
(Equation 1)

**Figure 2 : évolution de la reprise en eau en fonction de la durée de ventilation**

Les données du piquage 0 (cône en bas de la cellule) ont été exclues de l'étude car leur comportement était atypique (probablement en raison de la proximité du capteur avec le fond de la cellule). Les relevés des thermo-hygromètres placés au niveau des piquages 1 à 5 montrent qu'en moyenne, la température baissait de 0.07 °C par heure de ventilation. Les variations de température par heure de ventilation étaient comprises entre -2.42 °C/h et +0.658 °C/h. 39 % des données étaient strictement supérieures à 0, c'est-à-dire que la température s'élevait au lieu de baisser.

La teneur en eau, calculée selon l'équation 1, augmentait en moyenne de 0.0099 point par heure de ventilation. Les données s'étendaient entre -0.32 points/h et +0.24 point/h. La teneur en eau augmentait pendant les plages de ventilation dans 68 % des cas.

La figure 3 représente la variation de température du grain ( $\Delta T/h$ ) en fonction de la variation de teneur en eau ( $\Delta TE/h$ ), par heure de ventilation. Ces deux variables sont corrélées positivement : les baisses de température les plus importantes correspondent aux pertes en eau les plus importantes. Et inversement, les élévations de température les plus importantes correspondent aux réhumidifications les plus importantes. Dans 61 % des observations, la température baissait sous l'effet de la ventilation. Cette baisse de température pouvait aussi bien être associée à une perte d'eau qu'à une réhumidification. Les cas d'échauffement étaient généralement associés à une reprise en eau (37 % des observations).



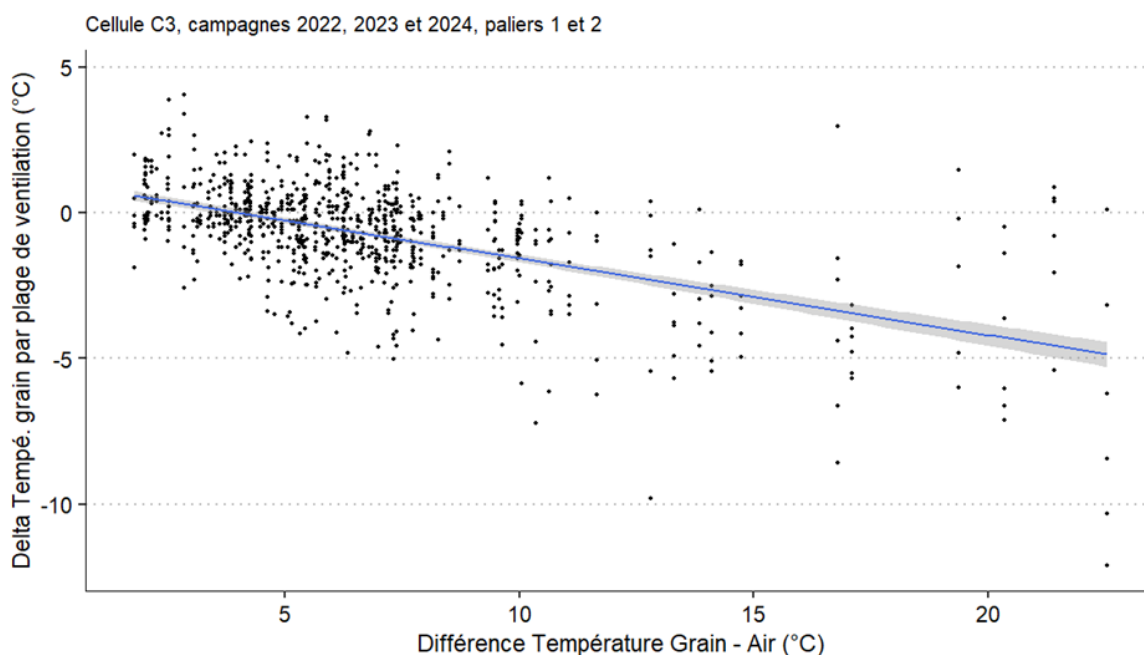
**Figure 3 : Relation entre la variation de température et la variation de teneur en eau par heure de ventilation**

### ► Qu'est-ce qui caractérise une plage de ventilation efficace ?

L'évolution de la teneur en eau ne permet donc pas à elle seule de caractériser l'efficacité d'une plage de ventilation. On recherche toutes les variables associées à une baisse importante de température ( $\Delta T/h$ ). La variable étudiée est ici la différence de température entre le début et la fin de la plage de ventilation, divisée par la durée (en heure) de cette plage. Plus cette variable est négative, et plus la plage a été efficace.

Les variables explicatives potentielles sont nombreuses : durée écoulée depuis le début du stockage, durée de la plage de ventilation, caractéristiques physiques de l'air insufflé, caractéristiques du grain avant la ventilation, ou encore différence de température entre l'air entrant et le grain. Afin d'identifier la ou les variables les mieux corrélées à notre variable d'intérêt, nous avons utilisé la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP)<sup>1</sup>. Selon cette ACP, deux variables sont bien corrélées à  $\Delta T/h$  : l'écart de température entre le grain (point le plus chaud) et l'air de ventilation (corrélation négative), et la différence de teneur en eau avant et après ventilation (corrélation positive). Concernant cette dernière variable, cela corrobore les observations faites précédemment. **Une plage efficace se caractérise donc par un séchage des grains (transfert d'eau du grain vers l'air) et une différence importante de température entre le grain et l'air insufflé par le ventilateur.**

La figure 4 illustre bien ce dernier point. La corrélation entre les deux variables est négative. Ainsi, plus il y a d'écart entre la température de l'air et celle du grain, plus la température du grain baisse durant la ventilation. Le coefficient de corrélation entre ces deux variables est de -0.55. Sur la base du modèle linéaire calculé, **la différence de température entre le grain et l'air insufflé doit être d'au moins 5 °C pour espérer un refroidissement du grain.**



**Figure 4 : Relation entre la variation de température par plage de ventilation et la différence de température entre l'air et le grain (Tmax grain)**

<sup>1</sup> L'ACP est une méthode statistique qui consiste à projeter des données dans un espace géométrique, afin de visualiser des relations entre variables, ou encore de repérer des groupes d'observations ayant des caractéristiques communes.

