

LIVRE BLANC

Améliorer l'efficacité de la ventilation des silos grâce au pilotage digital



© nordroden

Réalisé par



Table des matières

| | |
|--|------|
| Introduction | p.3 |
| 1 Les éléments d'un système de ventilation | p.4 |
| 1.1 Les infrastructures de stockage | p.4 |
| 1.2 Les équipements de ventilation | p.5 |
| 1.3 Capteurs, sondes et boîtiers | p.6 |
| 2 Comment dimensionner un système de ventilation connecté ? | p.9 |
| 2.1 Débit spécifique : calcul de base pour la ventilation | p.9 |
| 2.2 Ventilateurs et conduites : des pièges à éviter | p.10 |
| 2.3 Combien de sondes, combien de capteurs ? | p.12 |
| 3 Pour une professionnalisation de la gestion des silos | p.15 |
| 3.1 Des solutions technologiques performantes | p.15 |
| 3.2 Solutions d'aide au pilotage | p.18 |
| 3.3 Une optimisation opportune | p.21 |
| 3.4 Performances des différents modes de pilotage de la ventilation | p.22 |
| Conclusion | p.26 |

Introduction

Chaque kWh compte car, au niveau du stockage, la ventilation figure parmi les postes les plus énergivores. Dans un contexte marqué par la hausse des coûts de l'énergie, la raréfaction des périodes climatiques favorables et la nécessité de réduire l'empreinte carbone, optimiser cette opération devient essentiel.

Les solutions numériques offrent aujourd'hui de nouvelles perspectives. Elles permettent de piloter plus finement la ventilation des silos, et ainsi de réduire les dépenses énergétiques tout en préservant la qualité des grains.

Grâce aux capteurs connectés, interfaces de suivi et outils d'aide à la décision, les responsables de sites gagnent en précision, en réactivité et en sérénité. Comment raisonner et dimensionner un système de ventilation connecté ?

Quels avantages offre-t-il ? Comment se dessine l'avenir de la ventilation des grains ? Trouvez les réponses dans ce livre blanc.



Les éléments d'un système de ventilation

Les éléments constitutifs d'un système de ventilation de silo sont bien identifiés des professionnels du stockage. Le panel est large et ouvre à de nombreuses possibilités quand il s'agit de concevoir un nouveau site.



1.1 Les infrastructures de stockage

La bonne connaissance de chaque silo et la prise en compte de ses spécificités est le préalable au succès de toute opération de ventilation. Un passage en revue des systèmes existants rappelle combien les réalités peuvent différer d'un site à l'autre.

- Stockage vertical traditionnel

Les silos cathédrales ou palplanches sont encore présents dans de nombreuses installations. Ces structures, souvent massives, reposent sur des gaines d'air ou des galeries de ventilation avec trappes.

- Cellules métalliques modernes

De plus en plus répandues, ces grandes cellules cylindriques à fond perforé intègrent les dernières normes en matière d'aération. Elles offrent une meilleure homogénéité

○ Stockage à plat

Une solution complémentaire, appréciée pour sa modularité. Elle permet des adaptations rapides et flexibles selon les volumes et la nature des grains.



© Aerial Drone Master

Ce large éventail d'infrastructures impose une adaptation fine des systèmes de ventilation, afin de garantir une bonne répartition de l'air et une gestion thermique efficace.

Chaque infrastructure impose ses propres contraintes de ventilation. Bien connaître son site est la clé pour dimensionner efficacement son système.

1.2 Les équipements de ventilation

Ventiler efficacement, c'est d'abord assurer une circulation d'air homogène et ciblée au sein de la masse de grain. Pour cela, les professionnels disposent d'une palette de solutions techniques, fixes ou amovibles, qui doivent être adaptées à chaque configuration de silo.

Dans le cas du stockage à plat, la souplesse est de mise. Les exploitants privilégient les systèmes amovibles : drains perforés, demi-lunes ou colonnes de ventilation. Ces éléments sont disposés directement sur ou sous la masse de grain et retirés à la fin de la campagne. Leur simplicité d'installation permet une adaptation rapide à la géométrie du stockage et aux types de grains stockés.

Pour les silos verticaux ou les sites à plat équipés de structures permanentes, on retrouve des installations fixes plus robustes. Les caniveaux de ventilation équipés de caillebotis à fentes ou les planchers perforés intégrés directement dans le fond des cellules permettent une diffusion plus fine et répartie de l'air. Ces solutions, plus techniques, favorisent une gestion à long terme et une meilleure efficience dans le temps.

L'enjeu commun reste le même : minimiser les pertes énergétiques en ciblant précisément les besoins de ventilation. Cela suppose un bon dimensionnement des ventilateurs, une régulation dynamique et une bonne connaissance de la masse de grain à ventiler.



NEU-JKF

1.3 Capteurs, sondes et boîtiers

Le cœur du pilotage digital repose sur une collecte de données fiable, précise et régulière. Cela passe par un maillage adapté de capteurs, connectés à des boîtiers de régulation de la ventilation eux-mêmes reliés à une interface de pilotage. La performance du système dépend donc autant de la qualité des équipements que de leur disposition dans le silo.



○ Sondes de température : multipoints ou monopoints

Les silos verticaux sont le plus souvent équipés de sondes filaires multicapteurs, installées à la verticale, permettant de suivre l'évolution thermique à différents niveaux de profondeur. La densification de ce maillage, notamment dans les structures récentes, renforce la capacité de détection des échauffements localisés.

Dans les stockages à plat, plus modulaires, on utilise davantage de sondes mobiles monopoint. Enfoncées depuis le sommet du tas, elles permettent une surveillance ciblée des couches supérieures. Elles peuvent être déployées ou retirées facilement, selon la configuration du tas et la durée de stockage.

○ Boîtiers de régulation de la ventilation et sondes extérieures

Les capteurs de température sont reliés à des boîtiers de régulation de la ventilation, qui centralisent les données, pilotent les ventilateurs et assurent la transmission des informations à l'interface. Certains boîtiers sont également équipés de sondes extérieures, essentielles pour le déclenchement automatique basé sur l'écart de température entre l'air ambiant et la température interne du grain.

Ces deux types de sondes sont complémentaires et peuvent être combinés sur certains sites de stockage à plat, pour un suivi plus précis. L'ensemble des capteurs est relié à au boîtier de régulation de la ventilation, lui-même connecté à une interface de pilotage accessible aux responsables de silos ou aux agriculteurs stockeurs, qui peuvent ainsi piloter les installations à distance et en temps réel.

TÉMOIGNAGE

David Meder,

directeur terrain chez EMC2 :

« La coopérative engage une démarche d'optimisation silo par silo, avec un objectif clair : renforcer la performance énergétique. »



LinkedIn

EMC2, groupe coopératif du grand-est, compte 58 sites de stockage équipés de ventilation pour 770 000 tonnes collectées. 513 000 t de grains sont ventilés grâce à un système connecté à une interface de gestion. La coopérative compte trois sites de

stockage principaux. Parmi ceux-ci, celui de Villiers-Le-Sec (Haute-Marne) est un stockage vertical d'une capacité de 71 000 t qui accueille blé, orge, colza, tournesol, maïs et, dans une moindre mesure, avoine et pois.

Les infrastructures et les systèmes de ventilation

Les infrastructures et les systèmes de ventilation des cellules de stockage de grains repose sur des **sondes verticales multi-capteurs et des ventilateurs, chaque ventilateur étant associé à un boîtier de régulation de la ventilation** :

- Pour 6 grandes cellules béton (4 000 t, fond conique), trois sondes par cellule surveillent la température. La ventilation est assurée par trois ventilateurs, un pour deux cellules, l'air étant réparti grâce à des conduites de ventilation.
- Pour 14 cellules, en silo palplanche (3 000 t, fond plat), chacune équipée d'une sonde, un ventilateur unique alimente une galerie qui dessert plusieurs trappes de ventilation par cellule.
- Enfin, 5 cellules béton (1 000 t, fond conique), chacune également équipée d'une sonde, sont desservies par des conduites à travers lesquelles circule l'air en provenance d'un ventilateur.

Modernisation progressive des équipements

À l'origine, chaque boîtier de régulation de la ventilation était équipé d'une sonde de température

extérieure, soit cinq sondes au total, positionnées au même endroit. Le système a depuis été optimisé : deux sondes suffisent désormais, chacune pilotant un groupe de ventilateurs via l'interface.

Les boîtiers de régulation de la ventilation ont commencé à être installés en 2023. EMC2 en a profité pour déployer progressivement l'ensemble des équipements nécessaires sur ses sites.

Accompagnement et formation

Afin de garantir une bonne appropriation de l'outil, chaque utilisateurs a bénéficié d'un accompagnement personnalisé. Des formations ciblées ont été menées auprès des équipes pour la prise en main de l'interface de pilotage. Cette montée en compétence des utilisateurs a été déterminante pour sécuriser le fonctionnement global du système.

Optimisation énergétique

Aujourd'hui, la coopérative engage une démarche d'optimisation silo par silo, avec un objectif clair : renforcer la performance énergétique en assurant que chaque kWh consommé pour la ventilation serve réellement à améliorer la conservation des grains.

Comment dimensionner un système de ventilation connecté ?

Le bon dimensionnement de l'installation de stockage est la condition première à l'efficacité de la ventilation connectée. Débit spécifique, circuits de ventilation, nombre et positionnement des sondes... Tous les choix techniques ont leur importance.

2.1 Débit spécifique : calcul de base pour la ventilation

Le dimensionnement d'une installation implique d'anticiper un débit spécifique d'air pulsé, selon le système de ventilation choisi et selon le volume de grains à ventiler et leur nature.

Le débit spécifique d'air pulsé est la notion de base la plus importante, dont dépend en premier lieu la qualité d'une installation. Il s'agit d'estimer, pour chaque cellule, le débit d'air nécessaire pour ventiler 1 m³ de grain puis d'établir, selon la capacité de la cellule, le débit spécifique, en m³/h. Cette donnée permet d'évaluer le nombre d'heures de ventilation (appelé temps de refroidissement) dont chaque cellule a besoin. Ces temps de refroidissement sont ensuite mis en parallèle de « *l'offre climatique* » du territoire d'implantation, caractérisée par les modèles météorologiques à variabilité régionale, interannuelle et pluriannuelle. Il s'agit là d'une étape cruciale au dimensionnement d'une installation car un débit mal calibré entraîne une surconsommation énergétique du fait d'une ventilation moins efficace.

POURQUOI EST-IL CRUCIAL DE BIEN CALCULER LE DÉBIT D'AIR SPÉCIFIQUE ?

Bon calibrage = ventilation efficace, économies d'énergie
Mauvais calibrage = surconsommation, refroidissement incomplet



1.Cellule de stockage avec la capacité connue

2.Volume de grains à ventiler (m³ de grain par cellule)

3.Débit spécifique requis (m³ d'air / heure / m³ de grain)

4.Temps de refroidissement estimé (nombre d'heures de ventilation nécessaires pour atteindre la température cible)

5.Comparaison avec l'offre climatique (disponibilité de plages fraîches pour la ventilation)

2.2 Ventilateurs et conduites : des pièges à éviter

Le principe de la ventilation ne semble pas compliqué au premier abord. Mais l'air est un élément capricieux et paresseux. L'aéraulique est une science complexe. De mauvaises conceptions du réseau de distribution de l'air et de raccordement du ventilateur affectent les performances de ventilation.

Porteurs de projets et gestionnaires de sites de stockage doivent accorder à la sélection des ventilateurs un soin particulier. Gaël Reich, responsable technique et R&D chez NEU-JKF Fevi, fabricant français de ventilateurs industriels, invite à voir au-delà du ventilateur, notamment à s'intéresser à la section entre celui-ci et le système de diffusion de l'air en cellule, pour s'assurer de la régularité du flux d'air.

Le principe du ventilateur est simple à première vue : aspirer l'air extérieur pour l'envoyer en pression dans un circuit de gaines. Pourtant, l'aéraulique (étude de l'écoulement de l'air) est une science physique très pointue.

AVIS D'EXPERT

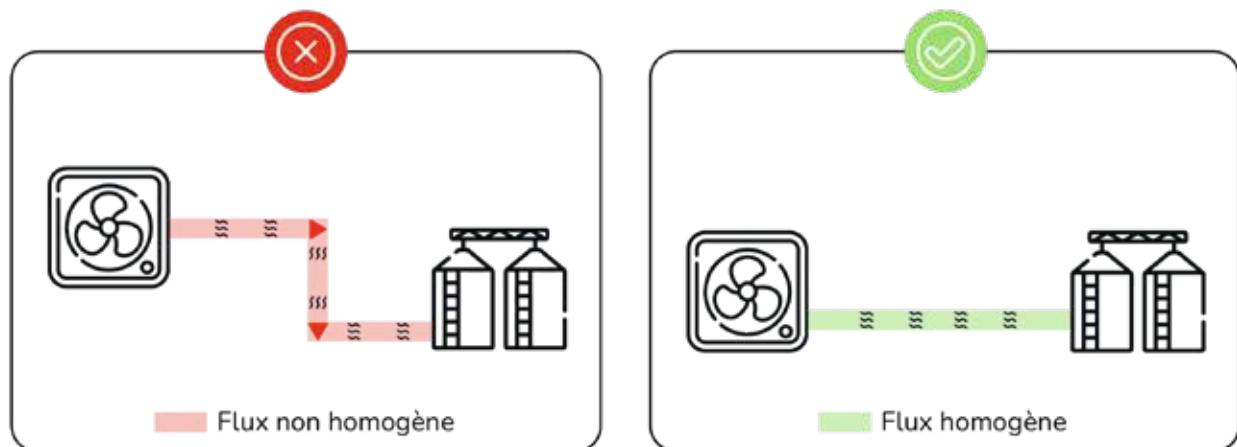
Gaël Reich, responsable technique et R&D chez NEU-JKF Fevi :
« *L'air est paresseux et le moindre frottement ou obstacle a des effets indésirables. Chaque site est unique et une étude minutieuse du réseau est indispensable.* »

En premier lieu, le choix d'un ventilateur dépend de :

- La taille du stockage ;
- Le type de stockage ;
- La famille de graines stockées ;
- Le débit spécifique calculé.

À ces critères viennent s'ajouter :

- Le système de diffusion de l'air ;
- La localisation précise du ventilateur par rapport au système de diffusion (longueur de gaine) ;
- Le type de gaine et la section ;
- La présence de coudes, d'embranchements ou de tout autre obstacle.



- Schématisation du passage de l'air
- Source : Javelot

L'objectif de cette sélection multicritères est d'anticiper les pertes de charge sur chaque linéaire et de dimensionner la ventilation en conséquence. « *C'est d'autant plus décisif que l'étude aéraulique et le bon dimensionnement des conduites d'air est le parent pauvre du travail de conception et de construction des sites de stockage*, reprend le responsable technique et R&D chez NEU-JKF. C'est un domaine dans lequel il faut progresser. On constate souvent la présence de gaines inadaptées (tuyau de drainage), avec des piquages à 90°, des embranchements... Très souvent nous constatons que les ventilateurs installés ne sont pas les bons »

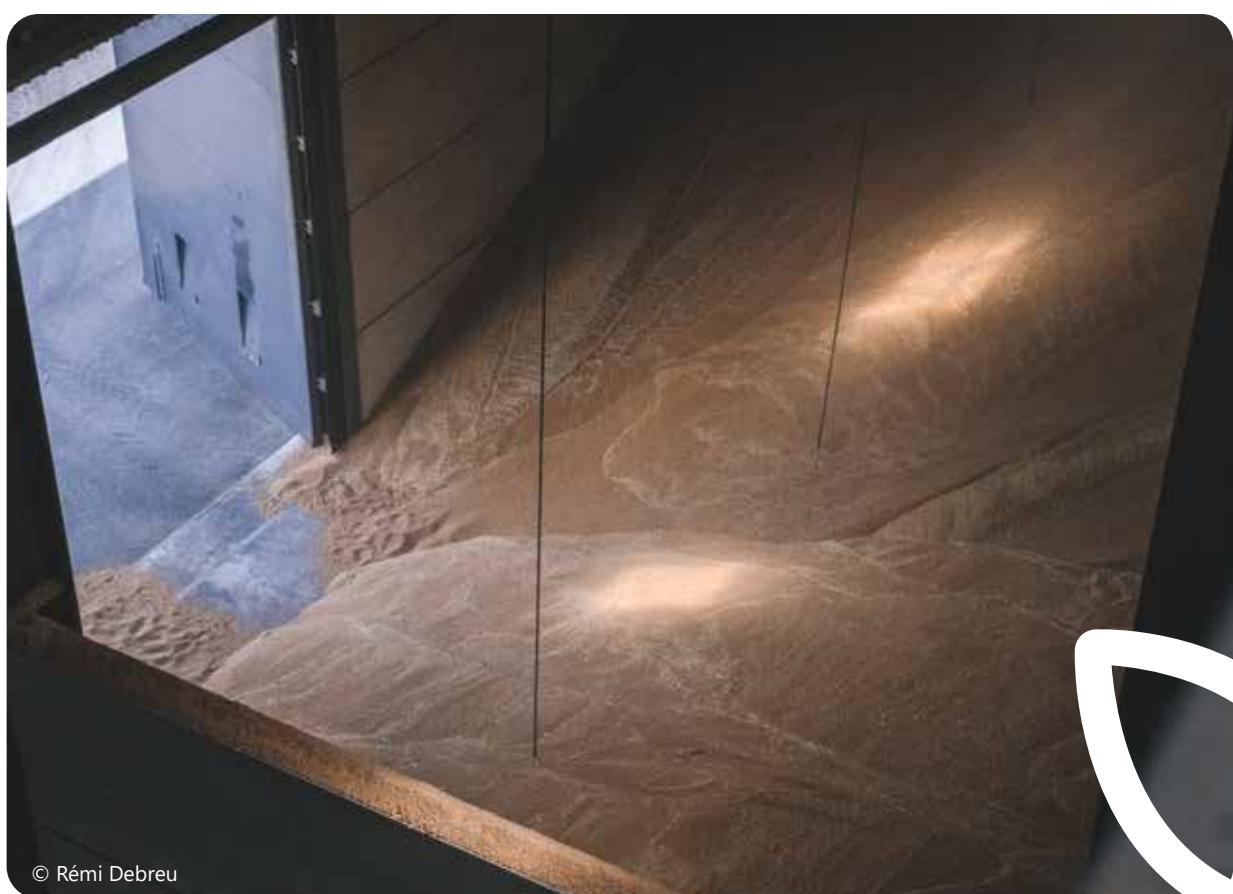
alors qu'ils sont confectionnés justement pour mettre l'air en mouvement, avec la pression suffisante pour éviter les pertes de charges d'un réseau et parvenir au grain avec le bon débit.

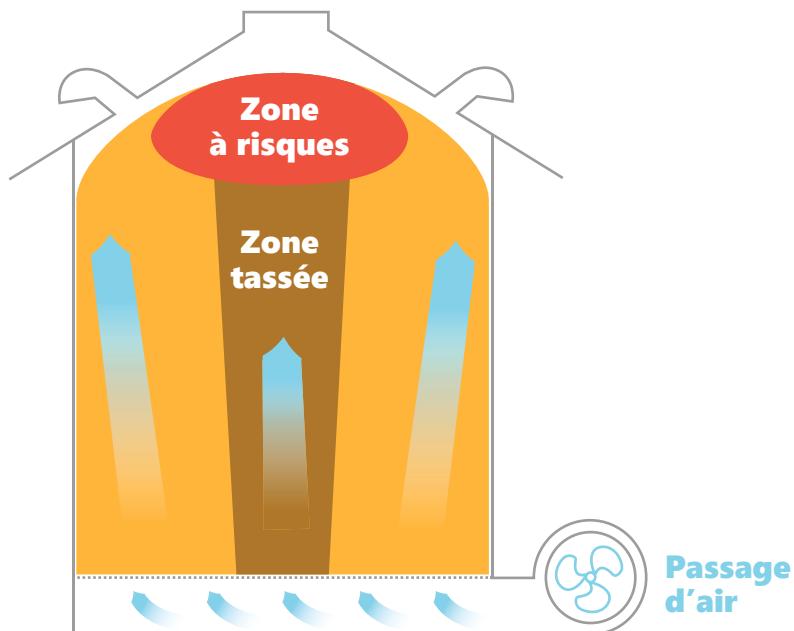
Il faut aussi résister à la tentation de réduire le nombre de ventilateurs. Un gros ventilateur pour plusieurs embranchements qui débouchent sur des systèmes de diffusions différents s'avère contreproductif. Cette configuration favorise en effet les pertes de pression et l'irrégularité des flux d'air. « *Les lois de la physique sont implacables* », conclut Gaël Reich.

2.3 Combien de sondes, combien de capteurs ?

Pour une ventilation efficace, les relevés de température sont cruciaux. Le type de sondes et leur disposition dans les tas ne s'improvisent pas.

Pour décider du nombre de sondes et de leur disposition, il faut déterminer le nombre de points de mesure (capteurs) nécessaires, en fonction du tonnage et de la hauteur totale du stockage. De ces données dépend le juste écart entre les capteurs, à la verticale comme à l'horizontal. L'objectif de ce maillage est de procurer une bonne visibilité sur les différentes hauteurs du silo et de pouvoir détecter les points d'échauffement, où qu'ils surviennent.





Circulation de l'air dans une cellule métallique et zone à risque d'échauffement.
Source : Arvalis

○ Le cas des dispositifs verticaux

Dans le cas des stockages verticaux, la distance entre les capteurs varie entre deux et cinq mètres selon la taille des silos. Mais sur le plan horizontal, tout dépend de la structure, qui n'est pas forcément récente, ni conçue pour supporter la pression exercée par les câbles de plusieurs sondes filaires multipoints. C'est souvent le cas des stockages cathédrales, plus anciens.

Les cellules métalliques (palplanches et cylindres) conviennent mieux à ce maillage en deux dimensions. Même si la surveillance des extrémités doit souvent être accrue. Un cône a tendance à se former en partie haute, synonyme d'un circuit plus long que l'air va chercher à éviter. L'air choisit, en effet, le chemin offrant le moins de résistance. Il va donc contourner ces zones. Des points chauds vont se créer, non détectés ou mal refroidis. Il est conseillé d'observer ici une plus grande vigilance et, si possible, d'araser le sommet du tas.

○ Le cas des stockages à plat

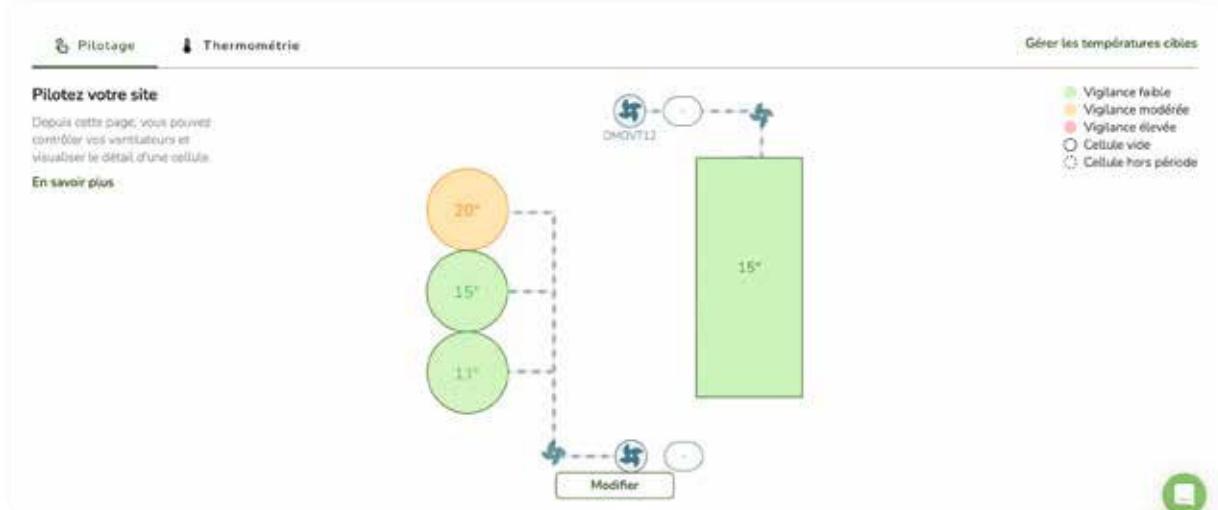
Les stockages à plat, généralement ventilés par de l'air pulsé, sont soumis à un risque d'échauffement en haut du tas. Pour ceux-là, l'entreprise Javelot formule des recommandations précises : « *Pour les tas de moins de 6 m de hauteur, les sondes mobiles monopoint doivent être enfoncées depuis le sommet à 1,5 - 2 m de profondeur. Elles forment alors un maillage efficace, avec 150 à 300 tonnes de grains couverts par capteur. Le haut du stock est sous surveillance, tandis que la partie inférieure bénéficie toujours de l'air le plus froid pendant les plages de ventilation.* »

Les stockages à plat de plus grande dimension peuvent être équipés en sondes filaires multi-capteurs sur la partie centrale, où s'est formé le sommet du tas. Elles sont complétées en périphérie par des sondes monopoint, suffisantes étant donné la hauteur plus réduite.

○ Consulter le plan de ventilation

Dans tous les cas, la prise en compte du plan de ventilation est déterminante pour définir la position des sondes, qu'elles soient monopoints ou multi-capteurs. Les premières sont toujours disposées de manière à obtenir un maillage entre les gaines ou entre les caniveaux. Pour les sondes verticales multi-capteurs, c'est aussi la configuration idéale. Mais la structure du bâtiment impose ses contraintes, car la pression exercée par le câble doit être prise en compte.

Site | Vue d'ensemble



- Plan de ventilation d'un site
- Source : Javelot



Pour une professionnalisation de la gestion des silos

Une fois le dimensionnement du dispositif de ventilation correctement opéré, une nouvelle ère de la gestion du stockage peut s'ouvrir. Il s'agit de dépoussiérer les habitudes, de reprendre en main le pilotage, à l'aide des données fournies en temps réel par les capteurs et par les logiciels pour une ventilation efficace, car adaptée précisément au contexte de chaque site.

3.1 Des solutions technologiques performantes

Les mesures précises et continues de températures à l'intérieur du stockage et en dehors, consultables sur une interface numérique, permettent de paramétrier le déclenchement des ventilateurs au moment le plus opportun.

La surveillance numérique des températures aide à prendre les bonnes décisions, pour ventiler par paliers de l'été à l'hiver, ou permet de sélectionner un mode automatique réglé sur une température cible. Plus précisément, elle permet de programmer le déclenchement du système quand l'écart de température, entre la température extérieure et celle du tas, est favorable à la ventilation refroidissante.

Une attention particulière est portée aux températures négatives, à manipuler avec précaution. Si elles peuvent accélérer un refroidissement, elles peuvent aussi entraîner des effets indésirables, comme de la condensation, des ponts thermiques ou une sous-efficacité ponctuelle de la ventilation.

AVIS D'EXPERT

Thibault Rigolle,
ingénieur commercial Javelot :

« Ce qui est important n'est pas tellement la valeur absolue de la température extérieure mais l'écart de température avec la température dans le silo. L'avantage des interfaces de pilotage digital est de permettre aux chefs de silo de tester différents paramètres pour trouver les écarts de déclenchement optimums et adapter ainsi l'automatisation aux spécificités de chaque site, en fonction des caractéristiques du grain, du bâtiment et des objectifs de conservation. »



Javelot

○ Qu'en est-il de l'humidité relative ?

L'effort de ventilation d'un tas de grain est la recherche d'un échange thermique entre l'air et le grain. L'air se charge des calories du grain. Mais, il se produit aussi un échange hydrique. Quand l'écart entre l'humidité relative de l'air et celle du grain est favorable, le tas se décharge au profit de l'air. Ce phénomène concourt au refroidissement.

À l'inverse, si l'humidité relative de l'air est trop élevée, de la condensation se forme, aux dépens du potentiel de refroidissement. Ce phénomène explique que certains suivis thermométriques affichent un réchauffement alors que l'air envoyé dans la cellule est bien froid.

En cas de précipitations ou de brouillard, la prudence est de mise. Cependant, la décision de ventiler ne peut pas se réduire à une simple lecture des conditions météo : elle dépend étroitement de la méthode de ventilation utilisée et de la configuration du bâtiment de stockage. Certaines structures offrent une meilleure protection contre l'humidité extérieure, tandis que d'autres, plus exposées, risquent de favoriser la condensation interne.

Cependant, en cas de détection de point chaud, il vaut toujours mieux intervenir, quelles que soient les conditions ! Une réaction rapide, même dans un contexte humide, reste préférable à une attente risquée. Sur la base de ces données, le chef de silo peut adapter finement les réglages de la ventilation ; qu'il s'agisse de la durée, du moment de déclenchement ou du choix des cellules concernées ; afin de tenir compte des spécificités réelles de son site et des conditions du moment.



© Rémi Debreu

○ Ventilation et initiation à l'aéraulique

Chaque ventilateur agit comme une pompe, qui capte l'air extérieur pour le pulser à l'intérieur du stockage. Là, il rencontre une résistance, au contact avec la masse de grains. Cette résistance est plus ou moins importante selon le niveau de chargement de la cellule. Elle varie aussi en fonction de la marchandise stockée. Par exemple, autant la féverole est facile à ventiler, autant les lentilles ou le lin offrent plus de résistance. Les céréales, comme le blé, se situent entre les deux. Ce phénomène de résistance est appelé « *perte de charge* ». Il se traduit par une hausse de la pression de l'air et donc de sa température.

Pour qu'une ventilation soit efficace, il faut trouver le bon équilibre entre deux éléments : la pression de l'air et le débit envoyé dans le tas. Ce réglage dépend directement du type de grain stocké. Par exemple, le colza est plus dense que le blé ou le maïs, et demande donc plus d'effort pour faire circuler l'air. La figure 1

aide à visualiser si un ventilateur est bien adapté au produit stocké.

Le stockeur peut alors constater un sous-refroidissement de son tas et une surconsommation énergétique. La tentation est alors d'augmenter la puissance de ventilation. Mais ce geste peut conduire à une nouvelle hausse de la contre pression et de la température de l'air. Le réflexe le plus sensé est de revoir l'écart de températures qui déclenche la ventilation.

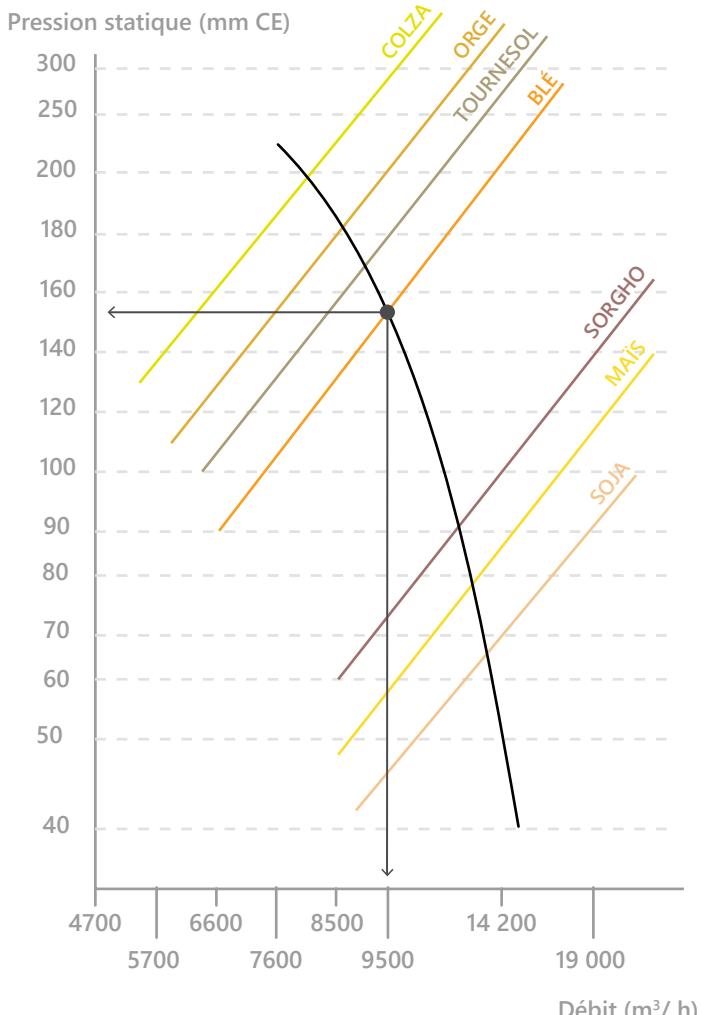
Il peut être utile de mesurer l'élévation de la température de l'air au niveau de la sortie du ventilateur pour les différents types de graines et niveaux de chargements, notamment lorsque certaines sessions de ventilation se révèlent peu efficaces ou ne refroidissent pas correctement le grain. Ces relevés, qui peuvent se faire lors d'un audit du système, serviront de guide pour définir l'écart de température propice au déclenchement du ventilateur selon les situations et affiner le pilotage de la ventilation depuis l'interface numérique.

Point d'équilibre entre pression de l'air et débit de ventilation selon le type de grain.

Là où la courbe du ventilateur croise celle du type de grain est le point de fonctionnement optimal.

Pour du blé, le point A renseigne sur les réglages optimaux : un débit de 9 500 m³/h et une pression de 140 mm CE. Pour du colza, la pression doit être plus élevée, donc le ventilateur plus puissant. Pour du maïs ou du soja, la résistance est plus faible, donc, avec le même ventilateur, le débit sera plus élevé.

Source : Arvalis



3.2 Solutions d'aide au pilotage

Un système de ventilation connecté constitue en premier lieu un précieux outil d'aide à la décision.

Les solutions actuelles de ventilation des silos s'appuient sur des outils numériques de pilotage et de suivi. Ces interfaces digitales révolutionnent le suivi de la ventilation des tas de grain. Les responsables de silos prennent de la hauteur avec la vue compartimentée des cellules de stockage, distinguables en fonction du type de grain et de la date de démarrage du stockage.

Les relevés de températures s'actualisent toutes les deux heures. L'interface offre une vue d'ensemble de la thermométrie avec une estimation du tonnage et l'indication de la température la plus élevée par niveau. La détection d'un échauffement par le système génère une alerte envoyée au gestionnaire du silo qui peut alors réagir dans les meilleurs délais.

Le paramétrage initial permet de consulter facilement toutes les données de température en temps réel, mais aussi d'en suivre l'évolution.

○ Plusieurs configurations possibles

Plusieurs modes de pilotage sont proposés par l'interface digitale, dans le but d'atteindre les températures cibles au cours de l'hiver :

- Une option manuelle très classique, à distance (commande On-Off), avec possibilité de consultation de toutes les informations disponibles ;
- Une option semi-automatique, avec programmation de la date, d'une heure de début et de fin ;
- Une option automatique avec paramétrage d'un écart minimal de température qui déclenche la ventilation (conseillé à 7°C entre la température extérieure et le capteur le plus élevé).

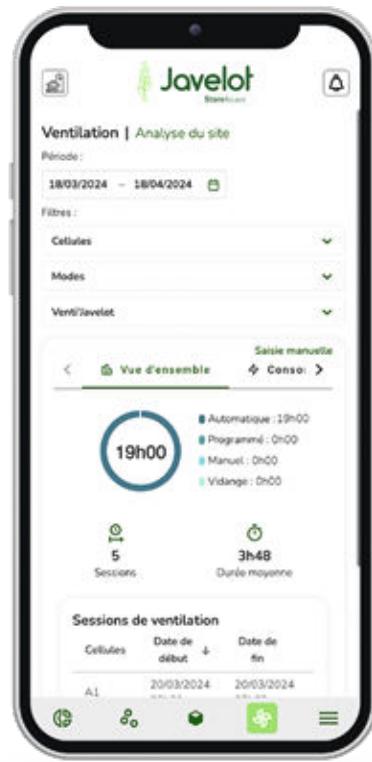
Le mode automatique propose plusieurs paramétrages additionnels, pour gagner en précision et éviter certains effets indésirables. Le gestionnaire des silos peut ainsi définir :

- Des périodes de non-automatisation, pour éviter les tarifs « *heures pleines* » ou s'adapter aux temps de travail des collaborateurs ;
- Une durée minimale de ventilation, afin d'éviter les déclenchements trop courts ou répétés, souvent inefficaces ;
- Un écart de températures maximum entre la sonde la plus haute et la température extérieure, pour éviter les problèmes de condensation.

○ Tout le potentiel de la data pour une vision globale au service de la performance

La conservation des données offre la possibilité de générer des courbes d'analyse avec une vision sur des périodes de 1 à 90 jours. Le responsable conserve également l'historique des actions de configuration des seuils, des problèmes d'échauffement et des alertes émises, des actions mises en place et des validations de températures régulières. Il peut justifier de ce suivi à l'occasion des audits de contrôle et transmettre facilement les informations.

Le système permet aussi de suivre les coûts des opérations de ventilation en heures pleines et en heures creuses. Car, chaque session de ventilation compte. Grâce à la data, il devient possible de tendre vers 100 %



■ Vision de l'efficacité de la ventilation

■ Source : Javelot

d'efficience : pas de déclenchement inutile, pas de session inefficace, pour un retour sur investissement énergétique optimisé.

Au-delà de l'exploitation des données quotidiennes, cette « *hypervision* » du stockage constitue un important levier de performance. L'outil de visualisation donne, en effet, accès, en temps réel, à l'ensemble des silos. Les responsables de sites de stockage peuvent surveiller à distance les installations, localiser rapidement les points de chauffe et piloter les actions à mener avec réactivité. Les données contribuent aussi à affiner le diagnostic des sites, en mettant en lumière des problématiques structurelles comme un défaut d'étanchéité ou une ventilation mal dirigée.

Cette capacité à centraliser, structurer et exploiter l'information améliore la gestion des silos en passant d'une logique locale à une vision globale, à l'échelle d'un site ou de l'organisme stockeur, et personnalisée selon que l'utilisateur soit opérateur de terrain ou responsable multisites.

AVIS D'EXPERT

Benoît Confuron,

responsable des opérations du négoce Groupe Carré :

« Disposer d'une interface d'hypervision nous permet d'être beaucoup plus efficaces dans le pilotage et l'aide à la décision, notamment sur la priorisation des investissements à faire sur nos différents sites de stockages. En effet, après deux ans d'utilisation et d'analyse d'efficience de la ventilation sur nos différents silos, nous avons pu identifier les silos qui nécessitent des changements structurels pour aller chercher la performance en liens avec l'évolution des conditions climatiques. L'analyse des data nous permet de prendre les décisions adéquates pour obtenir une réel efficience du matériel de ventilation (dimensionnement des moteurs et des gaines).»

3.3 Une optimisation opportune

Limiter le recours au groupe froid, souffler dans les meilleures plages et de manière efficace... Ces exigences s'imposent à tous les organismes stockeurs, tant pour maîtriser les dépenses que pour contribuer à la maîtrise des émissions de GES.

La ventilation est le premier poste de consommation énergétique d'un organisme stockeur. Les systèmes de ventilation connectés améliorent l'efficience des opérations de refroidissement des grains en termes de kWh consommés. Ils participent ainsi au pilotage de la performance opérationnelle et à l'optimisation énergétique de l'activité de stockage.

○ Changement climatique et réactivité

Le dérèglement climatique entraîne des conséquences très concrètes pour les gestionnaires de silos. La raréfaction des plages de températures refroidissantes est constatée partout, même si particulièrement sur la moitié sud du pays, et il est aujourd'hui compliqué d'atteindre les températures définies pour les trois paliers de ventilation du grain. Il devient alors stratégique de valoriser toutes les plages de températures propices à la ventilation des silos. C'est le premier intérêt du pilotage automatique qui déclenche la ventilation quand la température se prête au refroidissement sans qu'il soit nécessaire d'être présent sur site.

Cet aspect météorologique des pratiques de ventilation fait l'objet d'une attention accrue de la profession.

L'institut Arvalis, très mobilisé sur ce sujet, a communiqué sur l'évolution de l'offre climatique, dans sa **lettre technique de juin 2025 >>>**

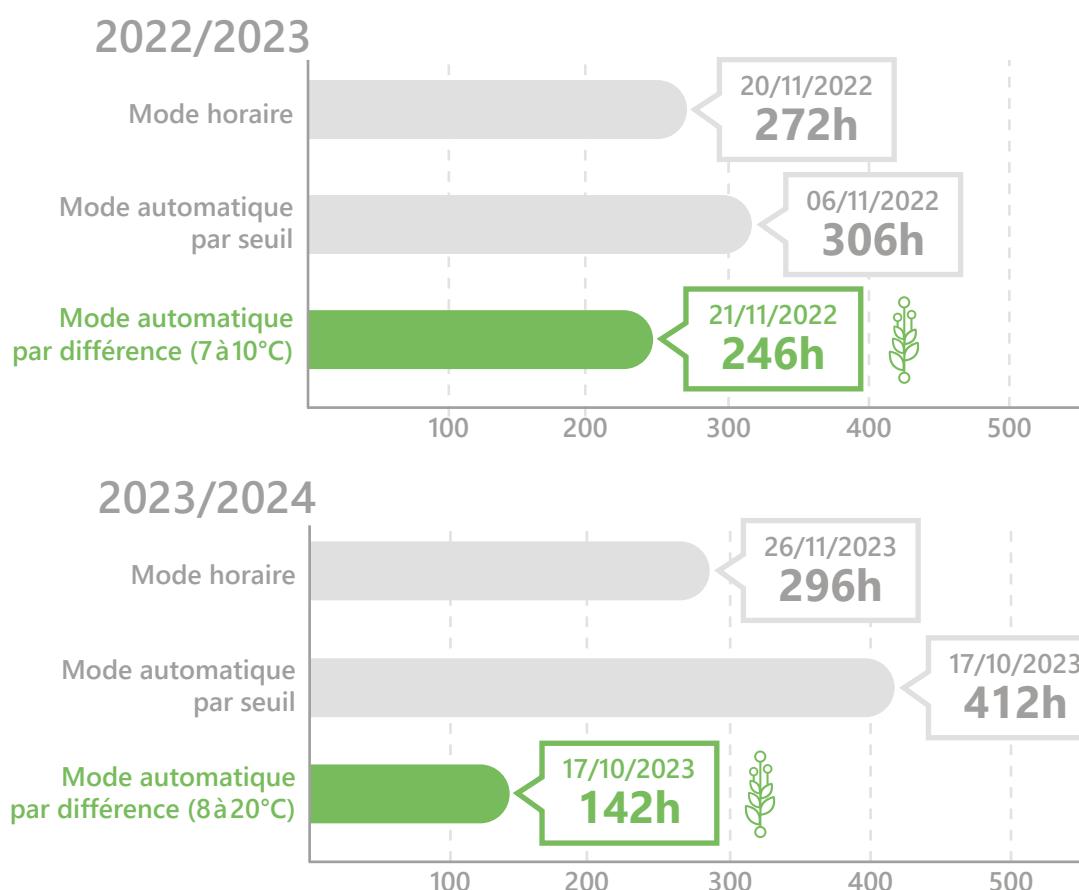


3.4 Performances des différents modes de pilotage de la ventilation

Quel est l'impact des différents modes de pilotage de la ventilation sur les performances de stockage ? La première synthèse d'une étude, menée par Arvalis, a été dévoilée mi-octobre 2024. Avec deux années d'expérimentation, les conclusions présentées ne sont pas définitives. Mais les premières tendances donnent l'avantage au pilotage automatique, déclenché selon un différentiel de températures.

Sur sa plateforme pilote de Boigneville (91), Arvalis a comparé différentes pratiques de stockage appliquées à des cellules de 40-45 tonnes de blé tendre. L'objectif est de comprendre l'effet de ces itinéraires sur la qualité des grains, les niveaux d'infestations et les performances de refroidissement.

Arvalis a retenu deux indicateurs de performance : le quota d'heures ventilées pour parvenir à la température cible et la date à laquelle cette cible a été atteinte.



Comparatif des modes de ventilation sur deux campagnes de stockage
Source : Arvalis

Trois modes de pilotage de la ventilation sont comparés, à matériel identique (ventilateur, lignes verticales de thermométrie avec capteurs espacés de 80 cm) :

- Un pilotage « *horaire* », qui consiste à ne mettre en route la ventilation que si les températures prévues restent inférieures à une température « *seuil* » sur toute la plage 22 h-6 h. La décision est prise tous les jours à 17 h en se basant sur les prévisions météo horaires.
- Un pilotage automatique sur des plages horaires variables, en paramétrant un seuil de température extérieure déclencheur (déclenchement si température inférieure au seuil et arrêt quand elle remonte). Ce pilotage est conduit par paliers cibles, 20°C puis 12°C.
- Un pilotage automatique, déclenché selon un différentiel de température (- 8 à - 20°C) entre l'air extérieur et le tas de grain (au point le plus chaud). C'est un mode de gestion en continu. La consigne de déclenchement de la ventilation évolue en permanence, jusqu'à atteindre 12°C au cœur du tas.

Quelle est l'incidence des modes de ventilation sur la performance ?

Résultat en trois questions à Jean-Yves Moreau, Ingénieur Arvalis

Quelles sont les premières leçons issues de cette étude ?

En dehors des effets liés aux particularités des campagnes, nous avons noté que le mode de pilotage automatique en continu « *par différence* » (mode 3) est le moins gourmand en temps de ventilation.

+ 60 à + 90 % d'heures en plus sont nécessaires pour le pilotage automatique par seuil (mode 2). Ce dernier atteint cependant plus vite l'objectif de refroidissement mais, avec une faible avance, qui ne justifie pas forcément la quantité d'énergie consommée. Car, c'est aussi le mode le plus énergivore.

Que dire du mode manuel ?

Ce pilotage dit "horaire" est moins énergivore que le mode thermostat, paramétré sur la seule température extérieure. Mais il permet d'atteindre les seuils fixés plus tardivement, certaines années avec près d'un mois de retard.

Comment résumer ces premiers essais ?

Il semble que le déclenchement de la ventilation lorsque la température de l'air est inférieure de 7°C au point le plus chaud du grain est le pilotage le plus efficient. En n'oubliant pas de prendre en compte le phénomène de réchauffage de l'air en sortie de ventilateur. Il nécessite d'avoir cette double mesure thermométrique, qui adapte le seuil de déclenchement en continu. On note que l'air pulsé est ainsi toujours plus froid qu'avec un seuil unique par palier.

PARTAGE D'EXPÉRIENCE

David Meder, directeur terrain EMC2,

« Grâce aux données collectées, nous sommes passés d'une gestion empirique à une vraie phase de diagnostic technique. (...) Le pilotage digital devient ainsi un levier d'amélioration permanente, au service de la performance énergétique et qualitative. »



« La surveillance et le déclenchement à distance présentent un intérêt majeur, reconnu par les chefs de silos, en particulier pour les sites sans présence humaine constante. L'interface numérique nous offre une vision d'ensemble du contenu des cellules, des températures et des stratégies de ventilation. Nous savons qui ventile et quand. Nous pouvons dissocier les heures liées à la ventilation de vidange de celles liées à la ventilation de refroidissement. C'est déterminant pour trier la data et disposer d'indicateurs de pilotage. Toutes les données de suivi simplifient la préparation des audits de contrôle. De plus, le support client de notre prestataire est réactif. C'est lui qui assure la maintenance des boîtiers de ventilation et des sondes. Tous ces dispositifs ouvrent la perspective d'un pilotage optimisé.

Mais le pilotage digital ne se limite plus à des fonctionnalités pratiques : il devient un outil d'audit en continu. Grâce aux données collectées, nous sommes passés d'une gestion empirique à une vraie phase de diagnostic technique. Les écarts de refroidissement entre silos

ne relèvent pas uniquement du paramétrage ; ils révèlent souvent des déficits structurels. Ces constats nous ont conduits à engager une étude d'optimisation, menée silo par silo, afin de perfectionner notre fonctionnement et d'améliorer durablement la performance de notre infrastructure de ventilation. Le pilotage digital devient ainsi un levier d'amélioration permanente, au service de la performance énergétique et qualitative. »

Des points d'optimisation

« Par exemple, les retours actuels sur les périodes de marche des ventilateurs ne sont pas corrélés à leur mise sous tension effective. Nous avons encore trop de sessions de ventilation à supprimer, ce qui est chronophage. La prise en compte des phénomènes d'échauffement de l'air dans les conduites et galeries n'est pas encore paramétrée. Nous les avons répertoriés grâce à nos audits, mais le système ne les prend pas encore en compte. Ce sera un point crucial pour l'avenir de la ventilation automatisée sur nos sites. Enfin, pour un dispositif de grande capacité,

le déclenchement sur la base de la mesure de température la plus élevée peut réchauffer des strates plus

basses et s'avérer contre-productif. Cette approche pourra être affinée dans les années à venir. »

LE TERRAIN AU CŒUR DES ÉVOLUTIONS

Lucas Quivron,
directeur BU Store & Save Javelot :

« Aujourd'hui, l'évolution de nos outils techniques repose sur une dynamique de co-construction avec nos clients »



Javelot

« Les retours d'expérience issus du terrain, comme ceux d'EMC2, sont essentiels : ils nous permettent de faire évoluer concrètement les fonctionnalités, en réponse à des besoins précis. C'est ainsi que nous avons, par exemple, intégré la visualisation des périodes de marche réelles des ventilateurs, un sujet régulièrement remonté par les opérateurs.

Par ailleurs, nous affinons nos audits de ventilation en nous appuyant davantage sur l'analyse post-installation. Il ne s'agit pas de systématiser un audit spécifique de ventilation en amont, mais plutôt d'observer, grâce à la donnée, les éventuels phénomènes d'échauffement ou de sous-performance. Si ces signaux sont mis en évidence, alors un audit ciblé peut

être enclenché pour accompagner le client dans le réajustement des paramètres de ventilation. Ce recours raisonné à l'audit, déclenché par des indicateurs concrets, permet un accompagnement plus pertinent et plus agile.

Enfin, au-delà de ces aspects techniques, le véritable enjeu est humain. Digitaliser le pilotage de la ventilation, c'est aussi faire évoluer des gestes métiers, repenser la relation à la donnée, et bâtir une confiance partagée autour de ces outils. Cette transition ne peut réussir que si elle est accompagnée. C'est pourquoi nous consacrons autant d'efforts à l'adoption et à la formation qu'au développement technique. C'est dans cette dynamique de co-construction que nous progressons. »

Conclusion

L'avenir est largement ouvert, pour les systèmes de ventilation connectés, dans le cadre des activités de stockage de grains. Lisibilité, réactivité, qualité, traçabilité, adaptation au changement climatique, maîtrise énergétique... cette voie de progrès est riche de promesses.

Grâce à l'exploitation intelligente des données, il sera, en effet, bientôt possible d'aller encore plus loin : détecter des signaux faibles, anticiper les pannes, ou encore déployer des approches de maintenance prédictive, site par site. Le pilotage s'affinera, l'automatisation se contextualisera, la performance se généralisera.

Ces avancées technologiques, aussi puissantes soient-elles, ne remplacent cependant pas l'expérience des responsables de silos. Elles s'y adosseront. Elles valorisent leur connaissance des bâtiments, leur capacité d'observation, leur lecture des situations concrètes. C'est dans cette complémentarité entre l'humain et la technologie, entre l'intuition de terrain et l'analyse par la donnée, que se construit la ventilation de demain.



Notes

LIVRE BLANC

**Améliorer l'efficacité
de la ventilation des silos
grâce au pilotage digital**

