

GESTION DU GIVRE PENDANT LES PROCÉDÉS DE SURGÉLATION PUIS DE STOCKAGE DE PRODUITS ALIMENTAIRES

Projet FOODEFREEZE

Livrable L.6.2

Enseignements du projet FOODEFREEZE

Guide pratique à destination des industriels

Version du 06/04/2022



Sommaire

1. Introduction.....	4
2. Les constats terrain sur les enjeux du givre	5
3. Bilan thermique d'un surgélateur.....	6
4. Formation et impacts du givre lors des opérations de surgélation	8
4.1. Origine du givre	8
4.1.1. Eau résiduelle présente à la mise en route :	8
4.1.2. Apport d'air humide par les entrées et sorties du surgélateur	8
4.1.3. Apport d'eau par le produit.....	8
4.2. Mécanismes de formation du givre.....	9
4.3. Les risques d'un fonctionnement en excès de givre	9
4.3.1. Perte de puissance froid.....	9
4.3.2. Impact mécanique sur les éléments en mouvements	10
4.3.3. Risque pour les produits.....	10
4.3.4. Risque sur la structure des équipements.....	10
5. Recommandations et bonnes pratiques à retenir	10
5.1. Limiter la création de givre et ses impacts lors des opérations de surgélation	10
5.1.1. Température des produits entrants	10
5.1.2. Équilibrage de l'air.....	11
5.1.3. Les dispositifs retardateurs de givre par tir d'air comprimé	14
5.1.4. Le dégivrage séquentiel.....	16
5.2. Optimiser la conduite des équipements	17
5.2.1. Suivi de la prise en givre	17
5.2.2. Pilotage de la ventilation.....	18
5.2.3. Autres indicateurs de pilotage d'un surgélateur.....	20
6. Conclusions.....	21

Table des figures

Figure 1 :Bilan thermique d'un surgélateur spirale sur des produits élaborés cuits	6
Figure 2: Bilan thermique d'un surgélateur tunnel sur végétaux crus.....	7
Figure 3 : Surgélateur spirale : flux d'air horizontal	Figure 4 : Surgélateur spirale : flux d'air vertical
11	
Figure 5 : Flux d'air horizontal : faible différence de pression entre amont et aval de l'évaporateur .	12
Figure 6 :Flux d'air vertical : forte différence de pression entre amont et aval de l'évaporateur.....	12
Figure 7 : Cheminée d'équilibrage d'air pour une configuration flux d'air vertical	13
Figure 8 : SPCS, Static Pressure Control system sur un surgélateur spirale GEA.	14
Figure 11 : Accumulation de givre devant un ventilateur en aval des batteries soufflées par des tirs d'air comprimé	15
Figure 13: illustration de l'écroulement du débit d'air	17
Figure 14 : corrélation masse d'eau / temps de production de la batterie	20

1. Introduction

La surgélation et le stockage de produits à des températures négatives sont très largement répandus dans le secteur agroalimentaire car ils permettent de maintenir la qualité des produits sur de longues périodes. Les niveaux de température et d'hygrométrie rencontrés dans ces unités entraînent la formation de givre dont l'accumulation diminue les performances énergétiques de l'installation de production frigorifique. Pour limiter ce phénomène il est donc essentiel de dégivrer régulièrement les batteries froides. Seulement, ces opérations de dégivrage ont un impact important pour les industriels de l'agroalimentaire puisqu'elles représentent un surcoût énergétique et une perte de productivité.

Peu de travaux se sont intéressés à l'optimisation de ce procédé. Ce projet est né de cette absence de données sur le coût énergétique associé aux opérations de dégivrage et leur impact sur la qualité d'un produit alimentaire surgelé. Ce guide pratique synthétise les principaux enseignements du projet sur la surgélation et donne des clés pour améliorer le fonctionnement de ces équipements.

La première partie de ce guide explique comment les sites pilotes de ce projet ont été retenus.

Afin de bien comprendre les phénomènes en jeu lors de la surgélation, la partie 2 de ce guide est consacrée à un retour d'expérience terrain sur les enjeux du givre. La partie 3 présente les bilans thermiques des surgélateurs étudiés, la partie 4 est dédiée à l'explication du mécanisme de formation du givre pour finalement aboutir aux principales recommandations en partie 5.

Ces recommandations portent sur deux types d'actions :

- Limiter la création de givre lors des opérations de surgélation
 - o Température des produits entrants
 - o Équilibrage de l'air
 - o Les dispositifs retardateurs de givre
 - o Le dégivrage séquentiel
- Optimiser la conduite des équipements
 - o La ventilation : les erreurs à éviter
 - o Pilotage de la ventilation
 - o Autres indicateurs de suivi

2. Les constats terrain sur les enjeux du givre

Pour quantifier les impacts de la création de givre sur les performances aérodynamiques et énergétiques des surgélateurs, des campagnes de mesures ont été réalisées sur des sites industriels. Pour choisir les sites industriels pilotes, une enquête de terrain a été réalisée. Cette enquête a permis d'identifier les critères techniques des sites pilotes afin que ceux-ci soient le plus représentatif des équipements présents chez les industriels. Les principaux enseignements de ces entretiens sont synthétisés ci-dessous.

Premier critère : L'activité des entreprises

Les sites pilotes retenus pour cette étude sont des sites assurant la surgélation de produits nus.

Ce choix a été fait pour deux raisons :

- Afin d'être le plus représentatif : car c'est le cas le plus courant dans les entreprises agroalimentaires.
- Pour avoir les meilleurs exemples : en effet l'absence d'emballage contribue aussi à augmenter la perte en eau des produits lors de la phase de surgélation et est donc susceptible d'augmenter les problématiques de givrage.

Deuxième critère : La typologie des équipements froid

Il existe une grande variété de solutions technologiques pour la production de froid (froid direct ou indirect, type et fonctionnement des compresseurs, en cascade ou non, etc.) différents types de fluides (naturels ou de synthèse). Il ne semble pas y avoir de lien entre ces solutions et la problématique de givrage. Ce critère n'a donc pas été retenu pour le choix des sites pilotes.

Troisième critère : Les technologies de surgélation

Les surgélateurs spirales et tunnels représentaient les trois-quarts des équipements de surgélation des entreprises interrogées. Les campagnes de mesure ont donc été faites sur ces équipements afin de pouvoir faire des comparaisons, et aussi extrapoler les résultats plus facilement.

Quatrième critère : La conduite des surgélateurs

En fonction des produits, les durées de surgélation sont très variables, mais cela ne semble pas avoir de liens avec les questions de givrage. En revanche, il est reconnu que la température des produits en

entrée de la surgélation a un fort impact sur la production de givre. Ainsi il nous paraissait intéressant de sélectionner un site pour lequel la température d'entrée surgélateur était relativement élevée. Nous avons donc sélectionné un site pilote, qui surgèle des produits cuits.

Cinquième critère : La formation de givre dans les surgélateurs

Un certain nombre d'entreprises utilise des techniques pour retarder la prise en givre (par exemple des jets d'air comprimé). Un des sites est équipé de ce type de dispositifs. Aussi, compte tenu du nombre croissant d'installations qui sont équipées de dégivrages séquentiels, un des sites retenus dispose de cette solution.

Sixième critère : Le dégivrage

Deux des trois sites pilotes retenus sont des entreprises pour lesquelles le dégivrage est l'unique responsable de l'arrêt des installations de surgélation (le 3^{ème} dispose d'un système de dégivrage séquentiel). Cela a permis de réaliser des mesures sur des installations qui peuvent être amenées à fonctionner dans des situations de givrage avancé et donc de bien comprendre les impacts du givre.

Septième critère : La sécurité des personnes

Le recours à des interventions humaines en phase de surgélation, compte tenu des risques qu'il engendre, traduit un enjeu important sur le dégivrage. Deux des trois sites pilotes retenus ont recours à ce type d'interventions.

3. Bilan thermique d'un surgélateur

Ces bilans thermiques établis lors des campagnes de mesure du projet FOODEEFREEZE permettent de visualiser comment la charge frigorifique appliquée dans le surgélateur est utilisée et quelle est son efficacité, c'est à dire la puissance utile qui sert au refroidissement du produit.

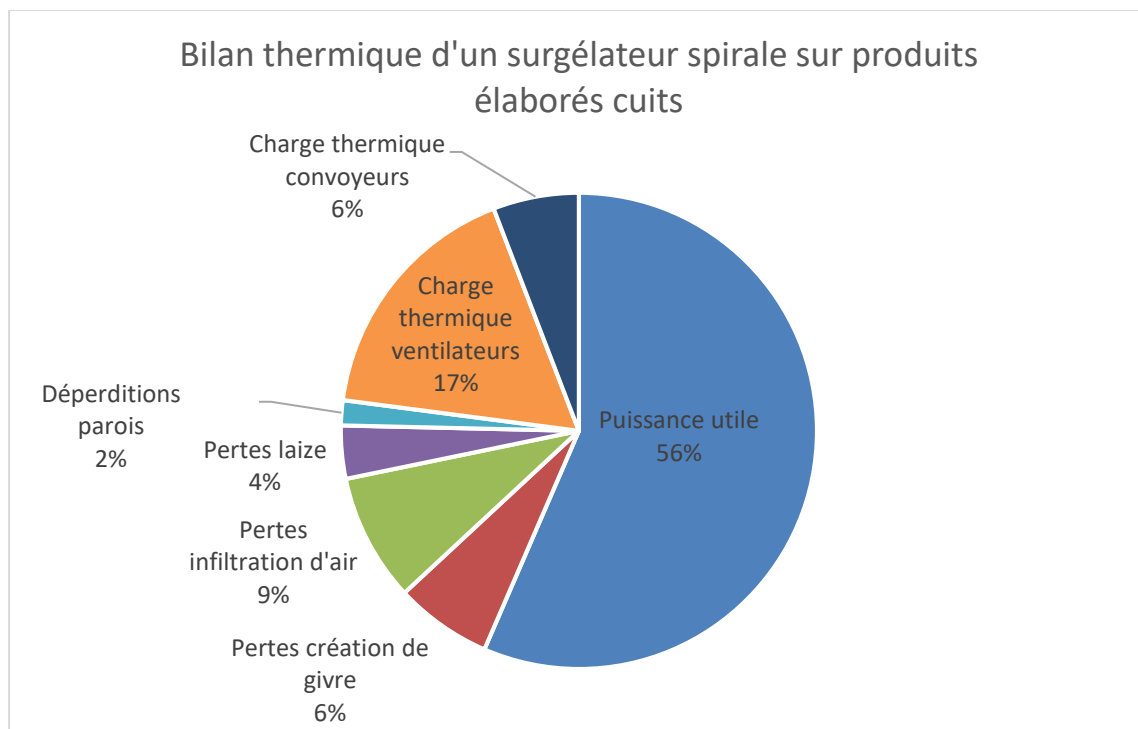


Figure 1 : Bilan thermique d'un surgélateur spirale sur des produits élaborés cuits

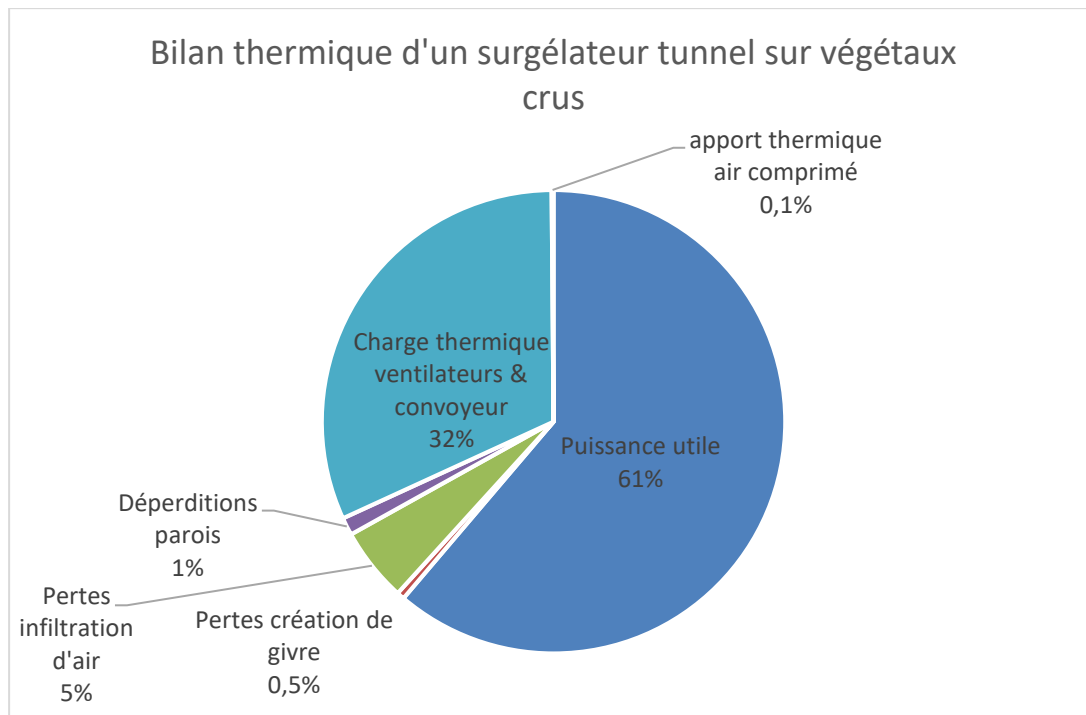


Figure 2: Bilan thermique d'un surgélateur tunnel sur végétaux crus

Exploitation des bilans thermiques :

Le premier poste du bilan est la puissance utile qui représente 56% et 61% selon les cas. Les ordres de grandeurs sont très proches et si l'on tient compte de la création de givre (qui peut être considérée comme faisant partie de la puissance utile) la puissance utile globale est similaire dans les deux cas : environ **62%** (61% +0,5% et 56% +6%).

Le deuxième poste du bilan est la compensation de la **charge thermique de la motorisation** dans le surgélateur (qui dans un cas monte à un tiers des besoins en froid). Cela montre que la modulation de la puissance de la ventilation est aussi un axe important de l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un surgélateur (voir partie 5.2.2)

Les **pertes par infiltration d'air** sont le troisième poste avec 5 à 9% du bilan. Bien maîtrisées, ces infiltrations ont peu d'impact, mais des dérives peuvent être observées (voir partie 5.1.2).

Il est intéressant de noter que la **création de givre** est un poste minoritaire du bilan thermique du surgélateur (6% au maximum). En revanche, l'action mécanique du givre par obstruction des batteries froides peut entraîner d'importants dysfonctionnements en cas d'accumulation trop importante. Ainsi le surgélateur dont la création de givre représente 0,5% du bilan est limité à quelques dizaine d'heures de fonctionnement, car après, l'accumulation de givre entraîne des dysfonctionnements (partie 5.1.2).

La principale différence entre ces deux bilans thermiques porte sur la part des pertes par création de givre : 6% lors de la surgélation de produits cuits élaborés, contre moins de 1% dans pour les végétaux crus. Cette différence notable s'explique par la température d'entrée des produits dans l'enceinte de surgélation des produits cuits qui se situe autour de 40°C, sans pré-refroidissement et les végétaux qui

entrent à la température ambiante (12°C). Une température plus élevée favorise la vaporisation de l'eau et donc la création de givre dans l'enceinte du surgélateur.

4. Formation et impacts du givre lors des opérations de surgélation

4.1. Origine du givre

Lors des opérations de surgélation le givre peut venir de trois sources différentes :

- L'eau résiduelle présente à la mise en route
- L'apport d'air humide par les entrées et sorties du surgélateur
- L'apport d'eau par le produit

4.1.1. Eau résiduelle présente à la mise en route :

Cette eau vient d'un séchage et d'une aération insuffisants des équipements. L'humidité résiduelle de l'air va venir se fixer sur la batterie au démarrage. En revanche, l'eau liquide présente dans des zones de rétention, va se transformer en glace et ne contribuera que très minoritairement à la prise en givre de la batterie froide.

Les calculs montrent que même si avant sa mise en route un surgélateur est chargé en air chaud et humide, il ne présente qu'une quantité très limitée de givre. Ainsi par exemple, un surgélateur dont l'air avant mise en route serait saturé en humidité à 30°C (température possible dans le cas d'une ventilation maintenue portes fermées) contient 31,3 g/m³, soit 6,3 kg d'eau, pour une installation de 200 m³. À une température de 10°C à saturation, la quantité d'eau est divisé par 3 : 9.4 g/m³.

En revanche d'un point de vue sanitaire la présence d'eau liquide à l'issue des opérations de nettoyage peut entraîner des développements microbiens néfastes à la sécurité sanitaire des produits.

4.1.2. Apport d'air humide par les entrées et sorties du surgélateur

Ces entrées d'air humide sont très variables et dépendent à la fois de la conception du surgélateur, (positionnement des entrée et sortie par rapport aux ventilateurs) et s'il est équipé ou non d'un système d'équilibrage qu'il soit statique ou dynamique.

Sauf dysfonctionnement majeur, ces apports sont en principe relativement réduits. Pour s'en assurer il suffit d'observer l'entrée et la sortie du surgélateur, si l'une de ces zones présentent un givrage important c'est que le surgélateur n'est pas bien équilibré. Cet apport peut alors être significatif. La partie 5.1.2 « Equilibrage de l'air » est dédiée aux solutions permettant de traiter ce problème.

4.1.3. Apport d'eau par le produit

Cet apport correspond à la part d'eau perdue par le produit dans l'enceinte du surgélateur. Il s'agit, normalement, du principal apport de givre et constituera la principale source d'impact sur le fonctionnement du surgélateur.

La masse de givre créée peut-être assez facilement déterminée à partir de la perte en eau du produit au cours de la surgélation qui est elle-même mesurée par une pesée en entrée et en sortie du produit.

C'est donc un premier facteur clé sur lequel on peut agir pour limiter la formation de givre (voir partie 5.1.1 Température des produits entrants).

4.2. Mécanismes de formation du givre

L'intérêt de comprendre les mécanismes de formation de givre est de savoir quelles sont les conditions qui favorisent son apparition pour pouvoir ensuite les maîtriser. L'humidité, la température et la vitesse de l'air sont les principaux facteurs responsables de la formation et de la croissance du givre sur les parois des échangeurs. La formation de givre sur une plaque froide s'opère selon deux types de transformations :

- 1- Soit la vapeur se condense au contact de la paroi froide si la température de surface est inférieure au point de rosée mais supérieure au point triple de l'eau. Les gouttelettes ainsi formées peuvent geler si la température de la surface descend sous 0 °C.
- 2- Soit la vapeur se transforme directement en cristaux de glace (condensation solide) dans le cas où la température de la surface et le point de rosée sont tous deux inférieurs au point triple de l'eau.

Un autre mécanisme de formation de givre est possible : la vapeur d'eau gèle directement dans l'air sans rentrer en contact avec une paroi froide. Il se forme ainsi un brouillard constitué notamment de cristaux de glace en suspension qui viennent ensuite se déposer sur les différentes parois froides. Ce phénomène s'expliquerait par une grande différence de température entre l'air et les parois de l'évaporateur. Les propriétés du givre qui se fixe aux parois sont différentes de celles du givre formé par les deux mécanismes décrits précédemment.

4.3. Les risques d'un fonctionnement en excès de givre

Le fonctionnement en excès de givre dans un surgélateur va entraîner différents impacts en fonction de sa configuration et des zones où le givre s'accumule. Les impacts identifiés sont les suivants :

4.3.1. Perte de puissance froid

C'est souvent le facteur limitant. L'accumulation de givre au niveau de la batterie froide va entraîner au fil du temps une augmentation du différentiel de pression de part et d'autre de la batterie. À terme, cela conduit à une baisse progressive du débit d'air à travers les ventilateurs. Or la corrélation, réduction de section / perte de charge n'est pas linéaire, mais tend vers une exponentiel. Cela explique qu'à l'atteinte d'une certaine pression le débit des ventilateurs va s'écrouler soudainement. La vitesse d'air chute alors, entraînant une baisse de la puissance froid. Si le débit des produits n'est pas réduit, ils sortent plus chauds.

4.3.2. Impact mécanique sur les éléments en mouvements

L'accumulation de givre en différents endroits des éléments en mouvement, et en particulier du tapis de convoyage peut, avec le temps, entraîner des dysfonctionnements, voire une détérioration des équipements par l'accumulation d'un poids excessif ou la formation de glace. De plus, les ventilateurs peuvent aussi être touchés par des dépôts de givre.

4.3.3. Risque pour les produits

Une accumulation excessive de givre est parfois susceptible d'entraîner des dépôts de celui-ci sur les produits, dans le surgélateur, et donc des non conformités produits. Ceci représente donc un manque à gagner pour l'entreprise.

4.3.4. Risque sur la structure des équipements

Comme indiqué plus haut l'action conjuguée de la ventilation et de l'accumulation de givre dans la batterie entraîne une augmentation de pression de part et d'autre de la batterie avec une zone en surpression en amont de la batterie et une zone en dépression en aval de la batterie. Dans le cas de surgélateurs tunnels qui présentent de grandes longueurs de parois ce différentiel de pression peut aller jusqu'à déformer la structure du tunnel (en particulier les panneaux sandwich). Cela a été observé par l'une des entreprises participantes de l'enquête du projet.

5. Recommandations et bonnes pratiques à retenir

5.1. Limiter la création de givre et ses impacts lors des opérations de surgélation

5.1.1. Température des produits entrants

Cela semble évident, plus le produit est froid à son entrée dans le surgélateur plus il sera facile de le surgeler.

Au-delà d'une simple réduction de la quantité de chaleur à extraire, la température d'entrée d'un produit va aussi avoir des conséquences importantes sur la création de givre. En effet les produits alimentaires contiennent pour la plupart des proportions significatives en eau, or plus la température d'un produit est élevée, plus l'évaporation de l'eau sera élevée car la pression partielle de la vapeur d'eau y est importante. Or le transfert d'eau par évaporation est directement proportionnel au gradient de pressions partielles de l'eau entre la surface du produit et l'air dans le surgélateur. Dans l'enceinte du surgélateur cette évaporation conduit à la création de givre.

Une température élevée des produits entrants a donc un double impact :

- Augmentation du besoin en froid pour le refroidissement du produit
- Augmentation de la création de givre

Pour réduire ces problèmes, il est donc très bénéfique de refroidir les produits cuits avant leur surgélation. Le bénéfice sera double :

- Réduction de la production du givre dans le surgélateur
- Diminution de la consommation d'énergie.

En effet pour un pré-refroidissement avec un air à température positive, (ex : entre 0 et 5°C) le coefficient de performance de la production de froid, sera élevé, supérieur à 2, voire 3 alors que dans un surgélateur autour de -30°C ce coefficient se situe autour de 1.

Pour résumer la descente en température du pré-refroidissement coûte 2 à 3 fois moins cher que celle en phase de surgélation. L'investissement dans un équipement de pré-refroidissement est donc rentabilisé par une diminution de la consommation d'énergie et l'allongement de la durée de fonctionnement du surgélateur. Il est justifié dans le cas de la surgélation de produits préalablement cuits.

5.1.2. Équilibrage de l'air

Le cas des surgélateurs à spirales :

Il existe deux configurations principales de circulation de flux d'air dans un surgélateur à spirales : flux d'air horizontal ou vertical. Le flux d'air horizontal traverse l'espace entre chaque étage de spire (figure 3 ci-dessous). Le flux d'air vertical passe au travers de la bande (figure 4 ci-dessous).

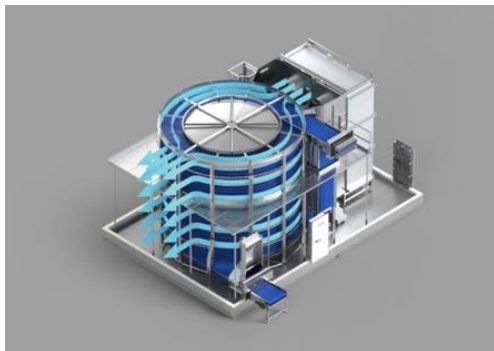


Figure 3 : Surgélateur spirale : flux d'air horizontal

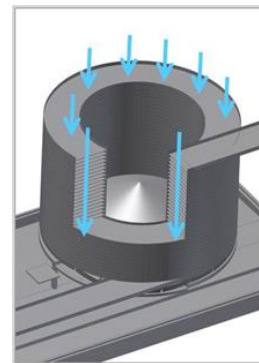


Figure 4 : Surgélateur spirale : flux d'air vertical

L'air extérieur au surgélateur spirale aura tendance à entrer par l'ouverture située proche de l'aspiration d'air des ventilateurs. Dans les cas présentés ci-dessous (figures 5 et 6), l'entrée d'air est liée à la différence de pression entre amont et aval des ventilateurs, illustrée par les signes (-) basse pression et (+) haute pression. Cette différence de pression est plus élevée dans le cas d'un flux d'air vertical car l'air refroidi doit vaincre la perte de charge générée par le passage au travers du maillage de la bande à chaque étage de spire. Cette contrainte engendre un risque de givre plus important pour un surgélateur à flux d'air vertical.

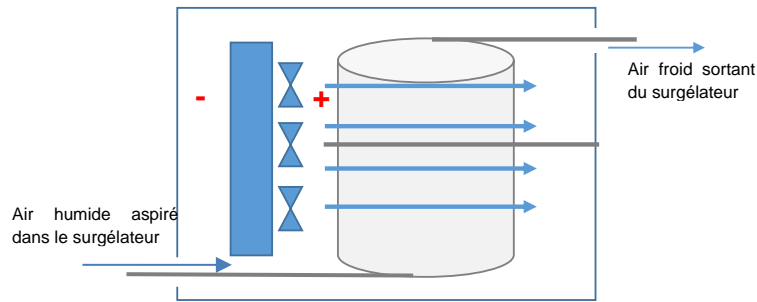


Figure 5 : Flux d'air horizontal : faible différence de pression entre amont et aval de l'évaporateur

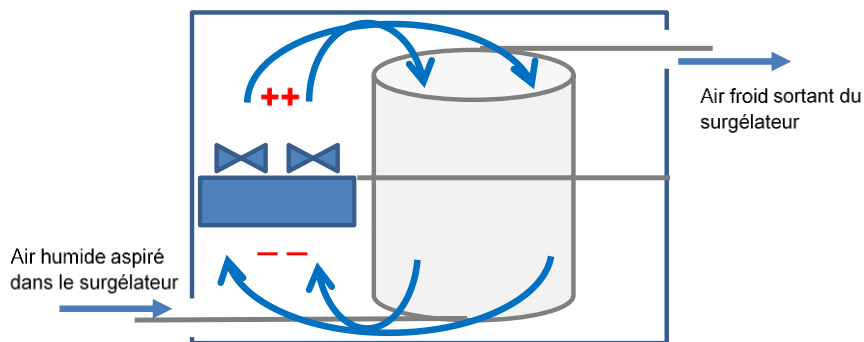


Figure 6 : Flux d'air vertical : forte différence de pression entre amont et aval de l'évaporateur

Règles de base

La première bonne pratique de conception concernant la problématique d'équilibrage d'air est de **limiter la section des ouvertures** d'entrée et sortie du surgélateur. Il est également important de considérer les équipements implantés à proximité du surgélateur et d'éviter de placer une ventilation d'air, une aspersion d'eau ou de vapeur ou une source chaude près de l'entrée ou de la sortie du surgélateur.

Des solutions d'équilibrage d'air sont présentées dans cette section et illustrées pour des surgélateurs spirales. Les surgélateurs linéaires, moins compacts, sont généralement moins exposés à ces problèmes. Il faut néanmoins être vigilant dans les cas où l'entrée et la sortie ne sont pas dans le même atelier, en effet un écart de pression peut entraîner une circulation d'air parasite à travers le surgélateur.

Cheminée d'équilibrage statique

Il est possible de limiter les entrées d'air en diminuant la différence de pression entre entrée et sortie du surgélateur par l'intermédiaire d'un conduit reliant ces deux zones de pression différentes. Ce conduit est appelé « cheminée d'équilibrage ». Un caisson intérieur permet de créer un flux d'air de direction opposée à l'entrée d'air extérieur. Le débit d'air est piloté par un volet à réglage manuel placé dans la cheminée afin de réduire au minimum l'entrée d'air dans le surgélateur.

Remarque : Le traitement de la section d'entrée assure automatiquement la réduction de sortie d'air par l'unique autre ouverture en sortie surgélateur.

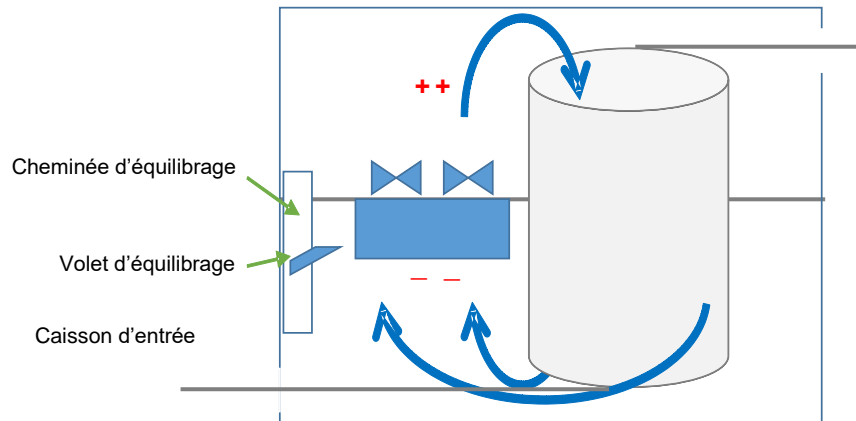


Figure 7 : Cheminée d'équilibrage d'air pour une configuration flux d'air vertical

Limites de la solution

La différence de pression entre amont et aval de l'ensemble évaporateurs/ventilateurs varie au cours de la production. Trois phénomènes participent à ces variations :

- L'accumulation de givre sur les ailettes de l'évaporateur crée une perte de charge additionnelle croissante sur l'air.
- La configuration des évaporateurs en dégivrage séquentiel génère des changements de pression à chaque arrêt/redémarrage de section d'évaporateur et ventilateurs associés.
- Le chargement de produit sur la bande crée une perte de charge sur l'air et influence cette différence de pression.

Le réglage du volet d'équilibrage effectué avant le démarrage en production n'est donc plus forcément adapté en cours de production.

Équilibrage dynamique et automatique

Afin de pallier les variations de pression statique internes au surgélateur et assurer un équilibrage d'air optimum entre entrée et sortie du surgélateur sur la durée de production, il est nécessaire de contrôler et compenser automatiquement les variations d'entrée d'air.

La solution consiste à éliminer la cheminée d'équilibrage et installer sur le caisson de section d'entrée surgélateur un ventilateur piloté par un variateur de fréquence. Un capteur de présence de déséquilibre d'air en entrée du surgélateur pilote le variateur du ventilateur pour compenser en permanence et automatiquement toute entrée d'air perturbatrice.

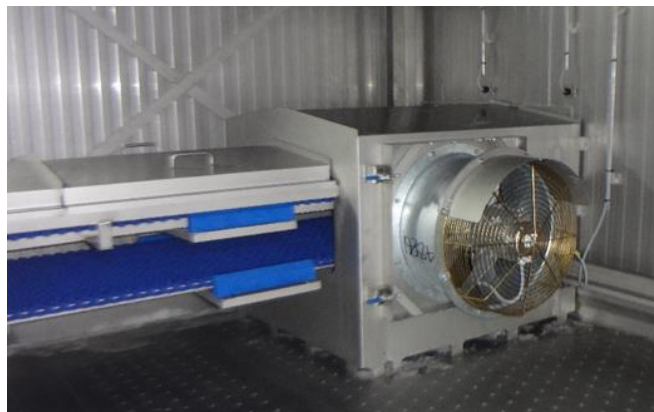


Figure 8 : SPCS, Static Pressure Control system sur un surgélateur spirale GEA.

Vérifier l'équilibrage d'un surgélateur

Un surgélateur bien équilibré ne doit avoir au niveau de son entrée ou de sa sortie qu'un givrage fin. Il ne doit pas présenter d'accumulation massive de givre comme sur les photos ci-dessous.



Figure 9: accumulation excessive de givre



Figure 10 : Léger givrage en sortie surgélateur qui montre une bonne maîtrise

Accumulation excessive de givre

Il est aussi facile de visualiser le flux d'air à l'aide d'un simple fil de laine pendu au-dessus de l'entrée ou de la sortie du surgélateur.

Remarque : S'il y a des opérateurs à l'entrée du surgélateur pour améliorer leur confort, parfois une aspiration d'air est créée au niveau de l'entrée des produits, cela entraîne un soufflage en sortie.

A noter : plus l'air aspiré par le surgélateur sera froid et sec, moins les aspirations d'air parasite auront un impact sur la prise en grive de l'équipement. Une zone tampon refroidie autour du surgélateur limitera fortement ce problème.

5.1.3. Les dispositifs retardateurs de givre par tir d'air comprimé

Ils n'ont pas été pleinement étudiés dans le cadre du projet, cependant l'un des sites de la campagne de mesure dispose d'un dispositif de tir d'air comprimé sur lequel des mesures ont été réalisées. De plus les enquêtes de terrain ont aussi permis d'avoir un retour d'expérience sur ce dispositif en particulier.

Le principe

Un tir d'air comprimé séquentiel permet par son énergie cinétique de décrocher le givre en formation sur la batterie froide.

Inconvénient

Le givre reste dans le surgélateur. Après soufflage le givre va donc se déposer et s'accumuler en aval des batteries froides ; selon la configuration du surgélateur qui peut avoir des volumes morts plus ou moins grands. Si l'accumulation est importante, le givre peut venir obturer d'autres éléments du surgélateur, comme la ventilation, ou être remis en suspension et se déposer sur les produits.



Figure 9 : Accumulation de givre devant un ventilateur en aval des batteries soufflées par des tirs d'air comprimé

Constat terrain

Le constat global est que ce type de solution permet d'accroître très significativement la durée de fonctionnement des surgélateurs. Il est très facile de le vérifier en faisant fonctionner le surgélateur sans activer ce système. Les mesures réalisées sur une installation ont aussi montré que d'un point de vue énergétique ce système est très performant. Dans le cas étudié, l'air comprimé représente 0.1% de la charge thermique du surgélateur.

La zone d'accumulation givre est déterminante dans la durée de fonctionnement de l'équipement. En revanche ces systèmes ne permettent pas de faire du fonctionnement continu. Il est possible de calculer la quantité de givre qui sera produite sur une installation à partir de la perte en eau des produits (principal contributeur à la formation du givre).

Dans le cas d'une installation neuve, le choix entre ce type de système et du dégivrage séquentiel dépend de la durée de fonctionnement continue souhaitée pour l'installation :

- Quelques heures de production à quelques jours → un dispositif air comprimé peut suffire
- Fonctionnement permanent sur plusieurs semaines → dégivrage séquentiel

5.1.4. Le dégivrage séquentiel

Le principe

Le dégivrage séquentiel consiste à dégivrer une batterie froid d'un surgélateur pendant sa phase de fonctionnement. Pour cela, la production de froid est répartie sur plusieurs batteries ce qui permet d'avoir une batterie en phase de dégivrage pendant que les autres sont en production de froid.

Cette solution permet d'avoir des durées de fonctionnement des équipements continues sur plusieurs semaines.

Inconvénient

Le dégivrage séquentiel nécessite l'installation d'une batterie supplémentaire pour pouvoir assurer le dégivrage sans perte de puissance froid. L'investissement est donc plus conséquent. Même si la batterie est isolée par des volets, le dégivrage entraîne un apport de chaleur dans le surgélateur et donc une surconsommation d'énergie.

Constat terrain

Dans l'entreprise étudiée, l'installation était récente et la campagne de mesures a montré qu'une réduction des consommations d'énergie de ce poste était possible en affinant le pilotage des séquences de dégivrage. L'objectif est de mieux maîtriser la chaleur émise lors du dégivrage d'une batterie afin de limiter la diffusion de chaleur dans le surgélateur.

Recommandations de pilotage

Pour maîtriser la chaleur émise par la batterie en dégivrage, deux niveaux d'instrumentation peuvent être réalisés :

Au niveau de l'alimentation des batteries, le suivi des températures permet de caler plus précisément les séquences de dégivrage (arrêt ventilateur / apport de chaleur) et aussi de maîtriser cet apport de chaleur. Lors d'un dégivrage l'apport de chaleur doit être dans un premier temps important pour assurer un bon dégivrage de la batterie. Celle-ci doit ensuite rester à température positive pour assurer le bon écoulement de l'eau liquide sur la hauteur de la batterie. Mais il faut éviter une remontée en température excessive (jusqu'à 35°C mesuré en conditions réelles) qui pénalise le fonctionnement du surgélateur.

Le suivi de la température de retour est une source d'information pour évaluer l'avancement du dégivrage. Lorsque la température devient positive ou se rapproche de la température retour, le givre est fondu, l'eau doit s'écouler. Il ne s'agit plus d'envoyer un maximum de puissance mais juste de maintenir la batterie à température positive.

Au niveau des batteries (dans le surgélateur) : une mesure de température en amont et en aval de chaque batterie peut être une source d'information sur le fonctionnement de celle-ci, ainsi que sur l'air qu'elle doit traiter.

5.2. Optimiser la conduite des équipements

5.2.1. Suivi de la prise en givre

Suivi de la pression statique

L'accumulation de givre d'une batterie froid peut être suivie par la pression statique aux bornes de la batterie. Ces mesures ont été réalisées sur les sites pilotes et elles ont confirmé que l'évolution de la ΔP aux bornes des batteries froides est un indicateur pertinent de l'état des batteries qui permet de quantifier l'impact du givre tout au long de la production.

L'observation de la courbe d'évolution des pertes de charge permet de constater l'état initial (perte de charge de la batterie sans givre) et son évolution qui augmente d'abord progressivement puis de façon soudaine, provoquant un écroulement du débit des ventilateurs.

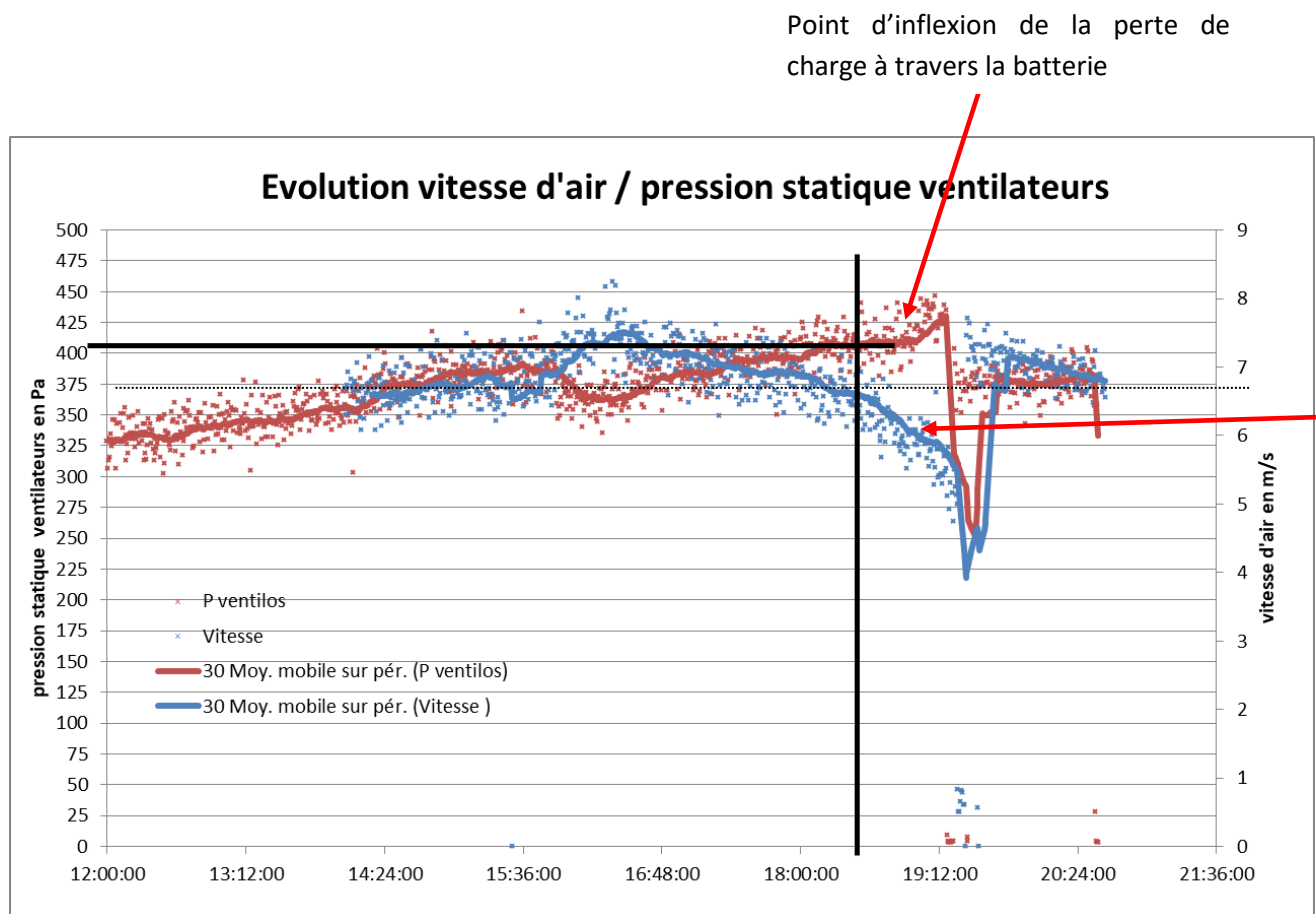


Figure 10: illustration de l'écroulement du débit d'air

Sur la figure 10 ci-dessus on constate qu'après la chute de débit à 19h12, il y a une reprise de celui-ci avec une pression qui a baissée. Cela est due à une intervention manuelle dans le surgélateur qui a permis de dégager partiellement la batterie de son givre.

Les mesures de terrain dans différentes entreprises ont montré des états initiaux de 100 à 200 Pa et des vitesses d'évolution très variables, de 1 Pa/h à 17 Pa/h en moyenne (augmentation de la pression aux bornes de la batterie au cours de la surgélation).

Sur un équipement déjà bien encrassé l'évolution de ΔP est même montée à 22 Pa/h contre 17 Pa/h au démarrage de cet équipement.

Le suivi des pressions statiques aux bornes des batteries et ventilateurs est donc un très bon indicateur de la prise en givre. Cependant des équipements compacts comme les surgélateurs à spirale, présentent des vitesses d'écoulement d'air élevée qui peuvent perturber les mesures.

Pour limiter l'impact de ces écoulements une solution consiste à protéger les mesures de pression statique par des "pléniums" qui permettent de réduire les vitesses d'air et de se rapprocher de la pression statique.

5.2.2. Pilotage de la ventilation

Constat terrain

La variation de fréquence est en train de se démocratiser sur la ventilation des surgélateurs neufs, mais il existe encore de très nombreux équipements qui n'en sont pas équipés. De ce fait, dans certains cas, pour adapter le débit d'air ou la puissance froid appliquée au produit, les exploitants arrêtent un ou plusieurs ventilateurs d'un équipement.

Comme l'ont montré les campagnes de mesure, cela est très néfaste pour les performances du surgélateur et entraîne un court-circuit aéraulique. Pour éviter ce phénomène si un ventilateur est déconnecté, il faut l'obstruer pour éviter ce court-circuit.

Recommandation de pilotage

La meilleure solution pour adapter le débit d'air est de généraliser la variation de vitesse. En effet, la réduction de la ventilation réduit le besoin énergétique au cube (lois de similitude), ainsi une réduction de 10 % de la ventilation entraînera un gain énergétique de 27 % sur le moteur du ventilateur.

Suivi de la puissance électrique absorbée

La puissance électrique absorbée par la ventilation est aussi un indicateur de la prise en givre de la batterie. En effet pour « lutter » contre l'augmentation de la pression statique induite par la prise en givre, la puissance électrique absorbée par les ventilateurs augmente*.

Cela est possible tant que les ventilateurs ont la capacité à produire la pression statique : la puissance aéraulique augmente. En revanche cette augmentation est assez ténue. Ainsi lors d'une campagne de mesure, il a été

constaté une augmentation de 4% de la puissance électrique absorbée entre le démarrage et l'écroulement de la ventilation.

Quelques rappels :

$$\text{Puissance Aéraulique} = \text{Pression statique} \times \text{débit}$$

$$\text{Puissance Aéraulique} = \text{Puissance électrique} \times \text{rendement ventilateur}$$

À noter : la température de l'air a aussi un impact sur la puissance absorbée par la ventilation : un air plus froid est plus dense, il entraîne donc une augmentation de la puissance absorbée.

La puissance électrique peut être suivie par les variateurs de vitesses (déjà présents) si leur précision est suffisante. Des compteurs électriques peuvent être ajoutés. Ces mesures ont l'avantage de ne pas ajouter de sondes dans le surgélateur avec les contraintes associées de température et de nettoyage.

Néanmoins ces mesures sont indirectes c'est-à-dire quelles sont la résultante de l'augmentation de pertes de charges liées au givre qui va impacter le débit circulant et par conséquent le transfert thermique sur le produit. Pour compenser ce lien indirect il faut accumuler un historique de données pour sécuriser les régulations qui en découleront. De plus ces régulations doivent être adaptées non seulement à chaque équipement mais aussi à chaque produit qui en fonction de sa perte en eau ou de la perte de charge induite sur l'air (surface de produit disposée sur le tapis) entrainera une réponse spécifique.

Piste exploratoire : le fonctionnement à débit constant

Dans le cas où un industriel souhaiterait maximiser ses temps de production, une solution pour allonger la durée d'exploitation d'un surgélateur serait de réguler la ventilation sur un débit d'air constant. Pour cela un variateur de vitesse va progressivement augmenter la vitesse de ventilation au cours de la prise en givre de la batterie afin de compenser l'augmentation des pertes de charges de celle-ci.

Cette solution permettrait de maintenir le transfert de froid vers le produit constant, mais entrainerait une surconsommation d'énergie par la ventilation. Sa mise en œuvre exige aussi la mise en place de capteurs de pression aux bornes de la batterie froide pour adapter la ventilation à la perte de charge réelle.

D'une façon plus globale le suivi du débit ventilatoire serait un indicateur intéressant de l'état de fonctionnement du surgélateur, car il permet de suivre directement l'état de fonctionnement du ventilateur. Cependant, en pratique, ce type de mesure est difficilement applicable car elle nécessiterait une qualification de ventilateurs et des mesures de pression au niveau des ventilateurs.

5.2.3. Autres indicateurs de pilotage d'un surgélateur

Des mesures réalisées dans le cadre du projet ont montré que la quantité d'eau accumulée sur les batteries est très bien corrélée au temps d'exposition des batteries en phase de production (voir figure 14 ci-dessous). Cette corrélation est plus forte que celle avec la quantité de produit surgelé.

Les périodes d'arrêts de production sont négligeables car les batteries sont alors peu exposées à la présence d'eau.

Une fois que le fonctionnement d'un surgélateur est bien maîtrisé, il est possible de déterminer son temps de fonctionnement maximum. Ce temps dépendra aussi sans doute de la nature du produit surgelé et de sa perte en eau.

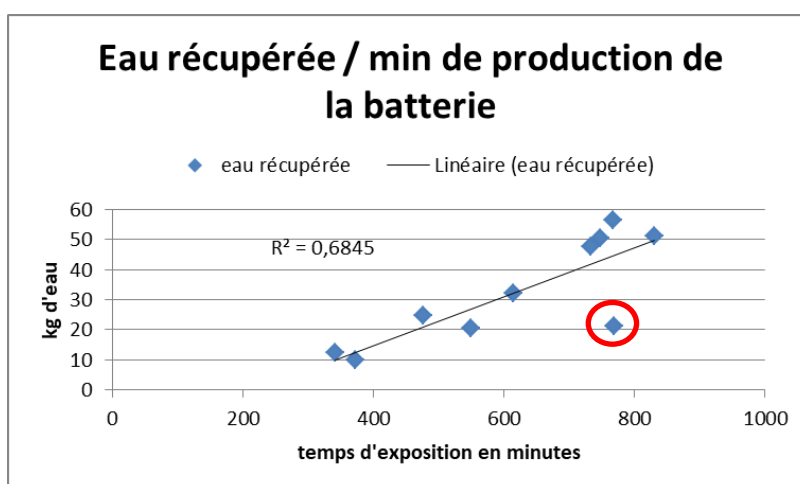


Figure 11 : corrélation masse d'eau / temps de production de la batterie

Si le point entouré en rouge est exclu la relation est bien plus nette, le R^2 monte à 0,93.

Ces mesures n'ont pas pu être répétées, mais en théorie, la corrélation devrait être plus forte avec la quantité de produits traités, puisque que c'est le produit qui constitue le principal apport d'eau.

Il semble donc aussi pertinent de suivre ce paramètre, volume de production, qui devrait être relativement constant (pour un produit donné) avant la prise en glace d'un équipement.

Si c'est le temps global de fonctionnement (y compris les périodes de marche à vide) qui détermine la prise en glace d'un surgélateur, c'est sans doute que les entrées d'air parasites ne sont pas bien maîtrisées.

Vérification de l'état de sortie du produit

Le suivi du (bon) taux de surgélation via l'outil Qualifreeze ou équivalent (mesure en continu du taux de glace des produits en sortie d'un surgélateur), est un rétrocontrôle qui peut permettre d'ajuster plus finement les dégivrages pour un meilleur pilotage des temps de dégivrages.

6. Conclusions

Les travaux menés dans le cadre du projet FOODEEFREEZE ont permis de cerner les cas de figures dans lesquels le givrage des batteries froide est le plus problématique. Ils ont aussi permis de mettre en avant la diversité des impacts du givre, tant sur les produits, que les risques pour les personnes ou les équipements.

Les connaissances acquises par les mesures sur site et par les travaux de modélisation ont permis de dégager des pistes de progrès qui par un meilleur suivi et une meilleure compréhension des phénomènes en jeu permettent d'abord de réduire la formation de givre et ensuite de mieux suivre celle-ci pour ajuster les temps de production. Cela évite soit de dégivrer trop tôt et donc de réduire sa capacité de production voire de dégrader ses performances énergétiques, soit de dégivrer trop tard avec des risques sur la qualité des produits.