



Les prouesses du froid : choisir la technologie de surgélation adéquate pour votre chaîne de production

Dr. Chris Kennedy

Consultant indépendant pour l'industrie agroalimentaire
Membre de: « The Institute of Refrigeration »,
« The Institute of Food Science and Technology »,
« The Institute of Physics »

1. Introduction

Le refroidissement et la surgélation constituent un aspect essentiel de nombreux processus de production et de distribution de denrées alimentaires. Des tendances claires dans l'industrie alimentaire indiquent que la demande accrue d'aliments surgelés et réfrigérés va se poursuivre, c'est pourquoi de plus en plus de fabricants améliorent ou étendent leurs chaînes de refroidissement et de surgélation.

Mais ce n'est pas aussi simple qu'auparavant. La technologie de surgélation a évolué et la surgélation mécanique traditionnelle, qui fait toujours partie des solutions les plus largement utilisées, côtoie aujourd'hui des technologies plus récentes qui prétendent posséder un certain nombre d'avantages sur leurs prédécesseurs.

Par conséquent, de quels systèmes de surgélation les industries alimentaires disposent-elles aujourd'hui? Quels sont leurs avantages et leurs

inconvénients et comment les fabricants peuvent-ils choisir le meilleur système pour leur entreprise?

2. Comparaison des technologies de surgélation

Il existe aujourd'hui trois solutions de surgélation.

- Les systèmes de surgélation mécanique utilisent un réfrigérant circulant pour réduire la température des aliments par transfert thermique de l'air
- Les systèmes de surgélation cryogénique réduisent la température par application directe d'azote liquide (-196°C) ou de dioxyde de carbone sur les denrées alimentaires
- Les systèmes de surgélation par contact dirigent des jets d'air à une haute vitesse sur le produit alimentaire.

A l'intérieur de ces catégories, on trouve divers modèles dont le tunnel de surgélation, à bande spirale, IQF et les systèmes à lit fluidisé. Le sys-

tème optimal dépendra d'un certain nombre de facteurs tels que le type de produit et la taille, le débit requis et la configuration de l'usine.

Les trois technologies présentent différents avantages, inconvénients et limites. Dans cet article, nous comparerons les technologies de surgélation mécanique, cryogénique et mécanique par contact. La meilleure technologie ne peut être sélectionnée qu'en tenant compte des conditions et exigences propres à chaque industrie.

Surgélation mécanique

Les systèmes mécaniques ont été les premiers à être utilisés dans l'industrie alimentaire et sont utilisés dans la grande majorité des chaînes de surgélation/de refroidissement. Les systèmes sont normalement des systèmes dédiés, appartenant au fabricant et gérés par celui-ci.

Ils fonctionnent en faisant circuler un réfrigérant, normalement de l'ammoniac, autour du système, ce qui élimine la chaleur du produit alimentaire. Cette chaleur est ensuite transférée à un condenseur et dispersée dans l'air ou dans l'eau. Le réfrigérant même, à présent un liquide chaud à haute pression, est dirigé dans un évaporateur. Lorsqu'il passe à travers une vanne de détente, il est refroidi et puis s'évapore. Redevenu un gaz à basse température et à basse pression, il peut être réintroduit dans le système.

Surgélation cryogénique

Les systèmes cryogéniques sont plus récents, mais sont utilisés avec succès par de grands fabricants de denrées alimentaires dans le monde entier. Ces systèmes sont généralement loués et n'appartiennent pas au fabricant.

Les équipements cryogéniques utilisent des gaz à très basse température – habituellement de l'azote liquide ou du dioxyde de carbone solide – qui sont directement appliqués sur le produit alimentaire.

Caractéristique	Surgélation mécanique	Surgélation cryogénique	Surgélation par contact
Propriété des équipements	Sont normalement la propriété des producteurs	Normalement loués/ pris en leasing auprès d'un fournisseur (qui fournit aussi le liquide de refroidissement)	Sont normalement la propriété des producteurs
Structure de prix	Investissement initial élevé, charges d'exploitation moins élevées	Faible investissement initial, coûts variables ultérieurs plus élevés	Investissement initial élevé, charges d'exploitation en cours moins élevées que les systèmes cryogéniques, mais plus élevées que les systèmes mécaniques traditionnels
Emplacement de l'équipement dans l'usine	Fixe, car habituellement placé sur un soubassement en béton. Emplacement limité par l'espace disponible	Flexible, emplacement plus simple car encombrement plus petit que pour les systèmes mécaniques	Plus flexible que les systèmes mécaniques traditionnels
Liquide de refroidissement	Généralement utilisés: ammoniaque, R22...	Azote liquide (LIN) ou dioxyde de carbone solide (CO ₂)	Généralement utilisés: ammoniaque, R22...
Coefficient de transmission de chaleur/vitesse de surgélation	Plus lent, en raison de la température relativement	Plus rapide, en raison du grand écart de température entre la surface du produit et le réfrigérant	Plus rapide, à condition que le produit soit plat et ne fasse pas plus de 20 mm

Surgélation par contact

Les systèmes mécaniques par contact ont été développés au cours de ces dix dernières années. Le produit est normalement placé sur un tapis, à travers lequel des jets d'air à haute pression peuvent être dirigés. Cet air est accumulé dans un plénum au-dessus (et parfois aussi en dessous) de l'équipement et est dirigé à travers des fentes, des trous ou de petits tubes, vers l'aliment.

Ce processus a pour résultat une surgélation plus rapide qu'avec des systèmes mécaniques traditionnels, parce qu'il rompt la couche limite à la surface et favorise le transfert thermique.

Voici un résumé des principales différences entre les technologies de surgélation.

3. Facteurs influençant le choix de la technologie de surgélation

Les fabricants de denrées alimentaires doivent prendre en considération un certain nombre de facteurs avant de décider quelle technologie ils vont installer sur leurs chaînes de production. Ceux-ci sont généralement répartis en quatre catégories: exigences au niveau de la qualité du produit et du rendement, exigences au niveau de la gestion de l'entreprise, considérations financières et facteurs écologiques.

3.1 Qualité du produit

Perte d'eau/teneur en eau

Toutes les méthodes de surgélation engendrent un certain degré de perte d'eau, pendant le processus de surgélation même (perte de poids par évaporation) et/ou durant la décongélation (perte d'exsudat).

- La perte de poids par évaporation réduit le poids, et par conséquent la valeur du produit, en particulier pour la viande, la volaille et les fruits de mer. En même temps,

la déshydratation superficielle a un impact sur la texture du produit, sa couleur et son temps de cuisson. La perte de poids par évaporation réduit la conductivité thermique de la couche superficielle et allonge par conséquent le temps de cuisson. Ceci est particulièrement important dans les applications où le temps de cuisson est limité, comme les hamburgers destinés aux établissements de restauration rapide. Dans la plupart des applications, la meilleure façon de réduire la perte par évaporation consiste à diminuer la température le plus rapidement possible. Une diminution rapide de la température abaisse la pression de vapeur de l'eau libre à la surface du produit et réduit ainsi la déshydratation.

- La perte d'exsudat se produit pendant la décongélation, si un produit alimentaire subit une détérioration cellulaire, causée par la formation de grands cristaux de glace pendant un processus de surgélation lent. Cette perte d'eau affecte la couleur, le goût et la qualité nutritionnelle du produit décongelé puisque l'eau perdue contenait des nutriments et des pigments. Une détérioration de la structure peut aussi entraîner une dégradation de la texture, ou une diminution de la fermeté, en particulier pour les légumes et les fruits. Ceci a été démontré dans l'étude de 2002 d'Agnelli et Maccscheroni lors de la mesure de la texture de framboises surgelées à l'aide d'un test de compression : les framboises conservaient davantage leur fermeté lorsqu'elles étaient congelées rapidement par surgélation cryogénique.

Couleur

La couleur des produits décongelés est affectée par la surgélation de deux manières. La première, la perte de pigment en raison de la perte d'exsudat, est expliquée ci-dessus. Ensuite, lorsque des cristaux de glace se forment pendant la surgélation, il se produit une concentration des

solutés dans la fraction restante non-surgelée. Cette augmentation de la concentration accélère des processus tels que l'oxydation et le brunissement enzymatique. Plus le produit reste à une température proche du palier de surgélation (c'est-à-dire plus le processus de surgélation est lent), plus ces effets seront importants.

Les recherches d'Agnelli et Maccscheroni ont montré les résultats des mesures de couleur sur des hamburgers surgelés décongelés. Cette étude démontre l'importance de la vitesse de surgélation et les avantages d'une vitesse plus élevée:

- La perte d'exsudat et le drainage de pigment sont tous deux réduits
- Le brunissement de la viande est minimisé: la couleur des hamburgers surgelés de façon cryomécanique ressemble davantage à la couleur originelle de la viande que ceux surgelés à l'aide de méthodes purement mécaniques.

Produits délicats

En raison de la conception de leur système et des caractéristiques du traitement des produits, les systèmes cryogéniques sont jugés comme étant les plus appropriés pour le traitement de produits fragiles et délicats, y compris de nombreux types de fruits mous.

Qualité du produit: conclusions

La recherche et l'expérience montrent que la surgélation rapide réduit la perte d'eau et de rendement et minimise les changements au niveau de la texture, de la couleur et du goût du produit. Alors, quelle technologie donnera la réduction de température la plus rapide?

La vitesse à laquelle les systèmes de surgélation réduisent la température est décrite comme le coefficient moyen de transfert thermique (par surface unitaire), ou $h \Delta T$. Plus le coefficient moyen de transfert ther-

mique est élevé, plus vite la température est abaissée.

Imaginons une température superficielle moyenne durant le processus de surgélation de -10°C . Un système mécanique traditionnel à bande spirale avec une température de l'air de -30°C et un coefficient de transfert thermique de 25 W/km^2 a un coefficient moyen de transfert thermique spécifique de $25 \times 20 = 500\text{ W/Km}^2$.

Un tunnel de surgélation cryogénique conventionnel avec une température moyenne de -80°C et un coefficient de transfert thermique de 60 W/km^2 a un coefficient moyen de transfert thermique de spécifique de $60 \times 70 = 4,200\text{ W/m}^2$.

En raison de leur vitesse de surgélation plus élevée, les systèmes mécaniques par contact ou cryogéniques sont par conséquent les meilleures technologies pour une qualité de produit optimale. Cependant, ce n'est que dans des applications limitées, à savoir des aliments fins aux surfaces perpendiculaires et plates comme les hamburgers, qu'il a été démontré que les systèmes mécaniques par contact atteignaient un transfert thermique similaire aux systèmes cryogéniques. La transmission de chaleur dépend fort du sens de la circulation de l'air, pour des produits plus massifs ou irréguliers, la surgélation par contact peut donc être beaucoup moins enviable.

3.2 Gestion de l'usine

Chaque entreprise de transformation de produits alimentaires est unique et doit être prise en considération lors du choix d'une technologie de surgélation. Parmi les facteurs à examiner, il y a l'espace disponible, le niveau de flexibilité requis ainsi que l'hygiène, le nettoyage et la maintenance.

Encombrement/espace disponible

Dans quasi tous les cas, les équipements cryogéniques ont un encombrement au sol plus faible que celui

de leurs équivalents mécaniques traditionnels, en admettant des niveaux de production similaires. Maintenant, certains systèmes mécaniques par contact sont aussi fournis sous forme modulaire et présentent un faible encombrement. En voici la démonstration lorsqu'on compare les dimensions de deux équipements typiques utilisés pour surgeler des hamburgers.

Débit	Surgélation mécanique	Surgélation cryogénique
2.000 kg/h	9,5 x 6,5 m; d'encombrement, hauteur min. requise: 3,7m. Encombrement total 62m ²	12 x 1,6 m; d'encombrement, hauteur max. 1,75 m. Encombrement 19m ²
500 kg/h	6,5 x 3m (total 19,5m ²)	4 x 1,6m (total 6,4m ²)

Activité

La demande fluctuante du consommateur peut provoquer des augmentations ou des diminutions soudaines et souvent inattendues de l'activité. Les directeurs d'usine sont dépendants de nombreuses variables incontrôlables comme l'acceptation par le consommateur du produit et de son cycle de vie.

Il est par conséquent impératif de prévoir, avec la plus grande précision possible, une activité maximale probable pendant la période d'amortissement du dispositif de surgélation. Dans le cas de systèmes mécaniques, ce délai peut être de plusieurs années. Les prévisions trop optimistes réduiront l'efficacité tandis que la planification pessimiste pourrait avoir comme résultat une capacité de surgélation insuffisante.

Tandis que les systèmes mécaniques ont un débit maximum fixe, les systèmes cryogéniques et mécaniques par contact modulables peuvent être adaptés (en allongeant le tunnel, par exemple) afin de répondre rapidement à des changements d'activité. Un point important, comme les tunnels cryogéniques sont généralement loués, de tels changements ne nécessitent pas d'importantes

dépenses d'investissement de la part du fabricant.

Il faut noter que la technologie de surgélation mécanique par contact a résolu bon nombre des problèmes de flexibilité des systèmes mécaniques traditionnels, surtout en termes de poids et d'encombrement. Cependant, la surgélation mécanique par contact est moins flexible que les processus mécaniques traditionnels en raison de sa valeur ajoutée, uniquement pour les produits plats ne dépassant pas 20 mm. Les deux systèmes, cryogénique et mécanique traditionnel conviennent mieux aux chaînes de production qui traitent parfois, ou toujours, des produits de plus grande taille ou de forme irrégulière.

Configuration de la chaîne de production

Aujourd'hui, dans l'industrie alimentaire en pleine mutation, les fabricants doivent souvent modifier la disposition de leurs installations. Ceci est particulièrement vrai pour les activités de sous-traitance. Les systèmes mécaniques à bande spirale sont de très grandes installations dont le poids doit souvent être soutenu par un soubassement en béton. Il n'est pas toujours simple de reconfigurer l'emplacement d'un équipement cryogénique ou mécanique par contact, mais cela nécessite rarement la modification de la structure du bâtiment.

Changements de produit

Pour les plus petits transformateurs de produits alimentaires en particulier, la possibilité de surgeler un éventail de produits différents est importante. Le temps de solidification et la durée d'indisponibilité influencent la capacité du fabricant à changer de produits. Idéalement, lorsqu'on change de produit, tous les exemplaires du premier produit devraient être retirés du système avant d'y mettre le second. Ceci, parce que les différences dans les temps de solidification déterminent le "temps de séjour" et la vitesse du tapis requise pour un produit donné. Plus le temps de séjour est long, plus le temps d'indisponibilité entre les deux produits sera long.

Si un nettoyage est requis au moment du changement de produit, comme c'est souvent le cas avec les produits enrobés, ou lorsqu'on alterne denrées crues et denrées cuites, les fabricants doivent aussi tenir compte des caractéristiques relatives à l'hygiène et au nettoyage, comme détaillé ci-dessous.

Si un fabricant n'exploite qu'un type de produit, à des vitesses très élevées, chaque jour pendant un long moment, la surgélation mécanique peut être la technologie la plus appropriée. Ceci moyennant, bien sûr, un espace au sol suffisant, la disponibilité des capitaux, le recrutement de personnel qualifié, etc.

Maintenance, hygiène et nettoyage

Ces processus doivent être aussi les plus rapides et les plus simples possible afin de maximiser la durée de disponibilité et optimiser l'efficacité de la chaîne. L'accumulation d'humidité ou de neige dans les évaporateurs des systèmes mécaniques, par exemple, peut allonger les temps de fabrication et diminuer le rendement.

Une hygiène impeccable ainsi qu'un nettoyage complet et régulier sont, bien sûr, essentiels dans l'industrie

alimentaire, mais doivent avoir un impact minimal sur la productivité. Les équipements de plus petite taille et au design simple se nettoient beaucoup plus rapidement et à moindres frais. Moins de pièces intérieures complexes, une hauteur réduite et une accessibilité optimale, tout cela réduit le temps nécessaire pour effectuer les processus de nettoyage et les rendre plus efficaces.

Les systèmes mécaniques par contact se caractérisent souvent par une plus petite taille et un accès plus aisé, semblable aux systèmes cryogéniques. Cependant, leurs structures restent complexes et sont difficiles à drainer. Le nettoyage est donc plus ardu et il y a davantage de problèmes d'hygiène potentiels.

Gestion de l'usine: conclusions

En tenant compte des problèmes auxquels sont confrontés les directeurs d'usine, on peut conclure que les systèmes cryogéniques constituent souvent la technologie préférée de nombreux transformateurs de produits alimentaires, ceci en raison de leur:

- encombrement inférieur
- adaptabilité aux changements d'activité
- flexibilité dans le traitement de différents produits
- design plus simple et plus accessible
- investissement moindre

3.3 Considérations financières

Installer du matériel de surgélation ou en augmenter la capacité engendre des frais dans un certain nombre de domaines tels que les investissements, les frais d'exploitation et les frais de personnel pendant le fonctionnement et la maintenance.

Dépense en immobilisations et frais d'exploitation

Il y a une nette différence entre la surgélation cryogénique et mécanique lorsqu'il s'agit des frais. Tandis que la surgélation mécanique nécessite une dépense en immobilisations

initiale beaucoup plus importante, les frais d'exploitation sont supérieurs avec du matériel cryogénique. L'importance de cette différence dépend d'un grand nombre de facteurs, mais sur n'importe quelle ligne de produits donnée, il y aura un moment où les frais cumulés de la surgélation cryogénique commenceront à dépasser le coût de surgélation mécanique.

Il faut cependant noter que le climat économique actuel rend les financements plus difficiles. Les fabricants n'étant pas en mesure de faire un investissement considérable, ou ne désirant pas en faire, peuvent par conséquent être avantagés par les systèmes de surgélation cryogéniques.

Frais de personnel

En raison de leur taille et de leur complexité, les systèmes mécaniques ont tendance à nécessiter plus de main-d'oeuvre pour le nettoyage. Les demandes de maintenance sont aussi plus importantes pour les systèmes mécaniques, tout comme le niveau de qualification nécessaire des opérateurs. L'importance relative de ces facteurs dépendra de l'équipement et du prix local de la main-d'oeuvre.

Qualité du produit

Comme mentionné précédemment, minimiser la perte d'eau est essentiel pour maximiser la qualité et la valeur du produit, en particulier pour des produits de qualité supérieure. Par conséquent, le choix du système de surgélation a des implications financières, ainsi que qualitatives, pour les fabricants.

Considérations financières: conclusions

Il est impératif que tous les facteurs financiers soient pris en compte lors du choix entre surgélation cryogénique et mécanique. Les fabricants doivent aussi examiner les frais sur une période spécifiée et définir l'ensemble des frais incombant au

propriétaire de chaque technologie. Les fournisseurs d'équipements peuvent les y aider, mais la technologie mécanique par contact est presque toujours plus chère que la surgélation mécanique traditionnelle en raison du coût de la génération de la vitesse élevée de l'air. Les décisions peuvent être fortement influencées par la disponibilité du capital d'investissement.

3.4 Facteurs environnementaux

De plus en plus sensibilisés à la consommation d'énergie et à l'impact de la fabrication sur les émissions de CO2 ainsi qu'à l'évolution de la législation, les producteurs de denrées alimentaires doivent prendre en considération l'impact sur l'environnement de leur technologie de surgélation.

La « Food and Drink Federation » et le « Carbon Trust » estiment que la fabrication de denrées alimentaires ne représente que 10% des émissions liées à l'énergie dans la chaîne alimentaire dont la majorité – environ 60% – est due à la réfrigération et à la surgélation par de grandes entreprises de transformation de produits alimentaires surgelés. Les systèmes mécaniques demandent moins d'énergie que la production d'azote liquide, mais dans l'ensemble du système de production de denrées alimentaires, les deux technologies ne contribuent que pour un faible pourcentage aux émissions.

4. Conclusions

Que retenir de cette analyse? Il est évident que choisir une technologie de surgélation n'est pas simple et qu'une technologie unique ne constitue pas le choix parfait pour tous les fabricants.

Avant de choisir une solution spécifique, les utilisateurs doivent prendre en considération le financement disponible, le ou les produits traités, l'implantation et la gestion de l'usine ainsi que le besoin de flexibilité.

Les systèmes de surgélation cryogéniques offrent de nombreux avantages en termes de vitesse de surgélation pour un large éventail d'aliments, ce qui donne des produits d'une qualité supérieure. Le faible investissement, la flexibilité et la facilité de nettoyage intéressent aussi de nombreux fabricants de denrées alimentaires aujourd'hui. Les systèmes mécaniques se caractérisent par un investissement plus important, mais peuvent apporter des avantages financiers à plus long terme. Les progrès dans la technologie de la surgélation par contact réduisent dans une certaine mesure l'écart entre les systèmes mécaniques et cryogéniques, mais les avantages sont limités à un type spécifique de produit. Il est conseillé aux fabricants de s'adresser à de grands fournisseurs d'équipements afin d'identifier la technologie la mieux adaptée à leurs besoins et le matériel convenant le mieux à leurs chaînes de production.

Pour en savoir plus

Le Dr Chris Kennedy est un consultant indépendant, réputé dans le monde de l'agroalimentaire.

En 2009, il a analysé les principaux éléments à prendre en considération lors du choix d'un nouvel équipement de surgélation. Il a prouvé la justesse des opinions sur les avantages des différentes technologies de surgélation ou les a remises en question, faisant référence à des données publiées lorsque cela était possible. Ce document de présentation technique résume les points essentiels de l'étude.

Le Dr Kennedy est membre des instituts suivants : « Institute of Refrigeration », « Institute of Food Science and Technology » et « Institute of Physics ».

For more information

Afin de discuter de la meilleure technologie de surgélation pour votre unité industrielle, **ou pour une analyse sans engagement de votre procédé actuel de surgélation**, veuillez prendre rendez-vous avec l'un des spécialistes d'Air Products :

Air Products
Tél 0800 480 030
frinfo@airproducts.com



tell me more
airproducts.fr/food