

FROID ALIMENTAIRE

Les clés pour optimiser la consommation énergétique



En 2022, nous avons connu une crise énergétique majeure. Les coûts de l'énergie ont explosé, impactés par des paramètres sur lesquels nous n'avons aucune prise. Aujourd'hui, la situation s'est un peu apaisée et beaucoup d'entreprises cherchent à prévenir de telles difficultés à l'avenir.

Les solutions passent premièrement par une optimisation de l'efficacité énergétique des bâtiments et des procédés industriels utilisés. Ensuite, il s'agit d'investir pour produire l'énergie qui sera consommée. Ce cheminement est sans aucun doute la meilleure des préventions énergétiques et financières possible.



Les supermarchés de toutes tailles, les hypermarchés et les commerces de détail font partie des entreprises les plus impactées. Leur besoin de réfrigérer ou de congeler est permanent ce qui induit des consommations électriques colossales.

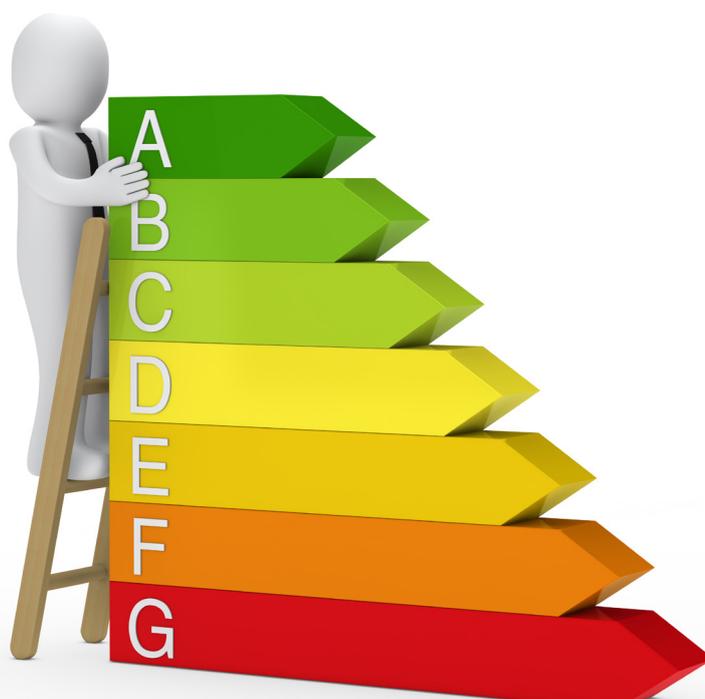
Rares sont les situations où le remplacement complet des installations de froid est obligatoire. Un tel investissement sera évidemment étudié avec grand soin par un expert du froid. Les solutions techniques permettant de limiter la consommation électrique sont maintenant nombreuses, adaptables en fonction des besoins spécifiques. Le retour sur investissement peut être rapide si le projet est bien réfléchi avant placement.

S'il est souvent difficile d'envisager le remplacement des installations existantes, de nombreuses améliorations sont possibles. Mieux connaître le fonctionnement de vos appareils vous permettra des échanges plus fructueux

avec les experts ou techniciens du froid lorsqu'ils interviennent sur vos installations. Certaines adaptations demandent quelques investissements financiers alors que d'autres concernent des actions à prendre sans obligation de déboursier le moindre centime.

Afin de recevoir des conseils adaptés à votre entreprise et à votre situation, n'hésitez pas à faire appel à des professionnels du froid et des auditeurs énergie agréés AMURE par la Région Wallonne.

Celle-ci subsidie à 100% des missions de pré-checks et de guidances énergétiques de toute entreprise wallonne désireuse d'emprunter le chemin de la sobriété énergétique et des performances environnementales. Le service des Facilitateurs Energie, s'occupant des entreprises et commerces, est à votre disposition gratuitement au numéro 0800-97.333.



La situation sur le terrain

Consommations énergétiques globales

Les entreprises consommatrices de froid alimentaire sont les commerces de détail, supermarchés (de 400 à 2500 m²), hypermarchés (supérieur à 2500 m²) mais aussi les entreprises de stockage et logistique alimentaire, les abattoirs, les entreprises de transformation alimentaires, etc...

Nous ne développerons, dans ce guide, que les aspects relatifs à l'usage du froid alimentaire dans les entreprises de distribution alimentaire.

La région wallonne fournit des valeurs moyennes de consommations spécifiques (kWh/m² de surface) en électricité et en combustible pour 2020. Ces valeurs indicatives permettent à chacun de pouvoir positionner sa propre consommation par rapport aux moyennes reprises ici.

Consommation électrique			
Type de bâtiment	Surface (m ²)	Consommation spécifique en électricité (kWh/m ² .an)	Pourcentage en comparaison au supermarché
Supermarché	400 à 2500	452	100%
Commerce non alimentaire	450 à 2500	113	25%
Hypermarché	>2500	361	40%
Commerce non alimentaire	>2500	59	13%
Commerce de détail		83	18%
Hôtel		37	8%
Enseignement		18	4%

Le tableau ci-dessus montre des consommations spécifiques électriques très différentes en fonction des types d'entreprises.

La moyenne des consommations électriques est bien plus importante pour un supermarché ou un hypermarché en comparaison à un magasin non alimentaire de taille similaire. La différence est due en grande partie à la production en

froid alimentaire nécessaires dans les super- et hyper- marchés.

La moyenne des consommations électriques des supermarchés est bien plus importante que celle des hypermarchés. De nouveau, la production de froid occupe une proportion plus grande de la consommation électrique d'un supermarché. En effet, la dimension des installations de froid n'est pas proportion-

nelles à la surface du magasin. Le froid occupe une place presque identique pour un supermarché qu'un hypermarché. Dans ce dernier, surface additionnelle est souvent occupée par du « non alimentaire ».

Le commerce de détail même s'il nécessite du froid possède des installations bien moins puissantes que les super et hyper – marchés.

Hôtellerie et enseignement sont présentés à titre indicatif.

Consommation de combustible			
Type de bâtiment	Surface (m ²)	Consommation spécifique en combustible (kWh/m ² .an)	Pourcentage en comparaison au supermarché
Supermarché	400 à 2500	233	100%
Commerce non alimentaire	450 à 2500	124	53%
Hypermarché	>2500	100	43%
Commerce non alimentaire	>2500	105	45%
Commerce de détail		70	30%
Hôtel		119	51%
Enseignement		62	27%

Le tableau ci-dessus montre les moyennes des consommations de combustible. Ces moyennes révèlent généralement la manière de chauffer le magasin. En plus de l'entrée, les zones réfrigérées impliquent une perte de chaleur à combler. Ces zones occupent une place plus importante dans un supermarché que dans un hypermarché, proportionnellement à la surface totale du magasin.

La consommation plus élevées d'un hôtel s'explique notamment par le fait qu'il doit être ventilé en permanence et donc cet air renouvelé doit y être réchauffé en hiver. De plus, il doit être chauffé 24h sur 24 en hiver.

L'école a des horaires de chauffe assez restreints ce qui permet de limiter

la consommation pendant les périodes d'inoccupation comme les week-ends et les congés scolaires.

Utilisation du froid alimentaire

Le respect des températures de conservation est obligatoire :

- * **Froid positif** : permet de conserver une alimentation à une température comprise entre 0 et 18°C (on considère souvent une température de 4°C comme référence),
- * **Froid négatif** : permet la conservation d'aliments à une température comprise entre 0 et -18°C (température de référence = -18°C).

- * **Surgélation – congélation** : de -18 à -50°C

Ce froid distribué dans des halls de stockage, chambres froides, ateliers, comptoirs et meubles de vente, ... est produit par des unités centralisées ou localement dans les meubles de vente.

Les aliments sont stockés, transformés, vendus dans ces enceintes refroidies subissant l'influence d'apports thermiques internes et externes au magasin.

Outre ces considérations techniques, d'autres impératifs existent :

- * favoriser un maximum le contact visuel et tactile des denrées par le client en imposant de laisser une interface ouverte entre les deux ambiances.
- * apporter un confort suffisant aux clients et au personnel, été comme hiver, dans les locaux de vente et de travail à une température adéquate et une humidité relative de +/- 50%.
- * utiliser de manière rationnelle l'énergie nécessaire à atteindre ces objectifs

Ainsi, dans les commerces où le froid alimentaire est très présent, les consommations qui lui sont liées sont :

- * **directes** pour maintenir les denrées alimentaires à température adéquate en fonction d'une série de facteurs,
- * **indirectes**, dues aux effets secondaires à l'utilisation du froid.

Par exemple, nécessité de chauffer l'air des allées entre les meubles réfrigérés ouverts (pour un confort des clients). Cet air chauffé réchauffe et humidifie

lui-même l'air intérieur des meubles réfrigérés devant produire plus de froid encore, ...

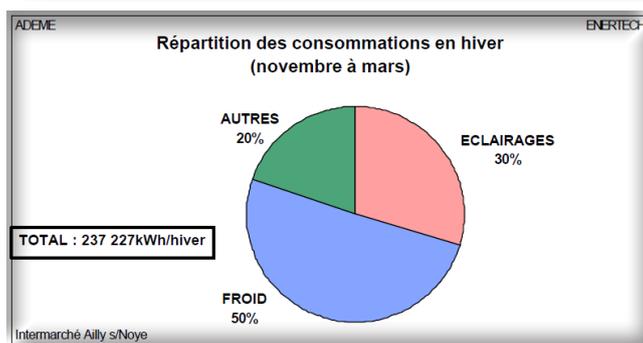
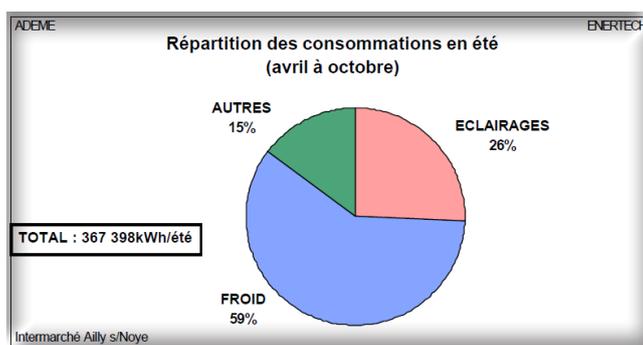
En conséquence, les consommations énergétiques nécessaires pour atteindre ces conditions sont parfois antagonistes et importantes.

Il faut donc organiser les besoins, concevoir adéquatement et utiliser le froid de manière rationnelle.

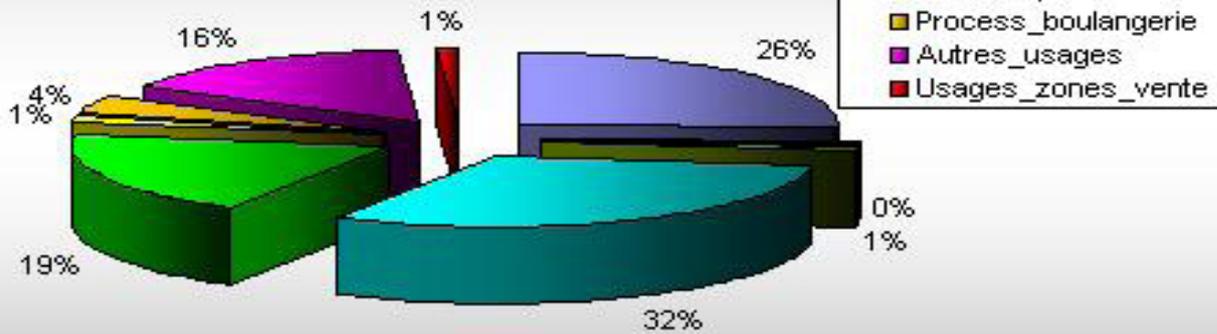
Répartition des consommations électriques des magasins

Supermarchés et hypermarchés

En moyenne, dans un supermarché moyen de 1.200 m², les consommations électriques du poste froid oscillent entre 50 % (en hiver) et 60% (en été) des consommations électriques du magasin, l'éclairage étant le second poste le plus consommateur.



Supermarché de 1200 m² [255 kWh/m².an]



Dans un supermarché de 1200m², sur la base d'une consommation globale de 255 kWh/m².an, la répartition des consommations électriques est représentée dans le graphique ci-dessus. Si l'ensemble du froid alimentaire représente 51% de la consommation électrique totale, le froid positif prend une part nettement supérieure à celle du froid négatif.

En France , seulement 23% environ du volume de froid des hyper- et supermarchés correspond au froid négatif.

**Petits commerces
(boucheries, poissonneries,
commerces de produits
surgelés, supérettes,
crèmeries et épicerie
fines,...)**

Dans les petits commerces, les consommations électriques du poste froid représentent jusqu'à

70% des consommations électriques globales.

En France , ces commerces totalisent un aussi grand volume de froid négatif que positif.



Quelles sont les obligations légales en matière de froid?

Réglementations

Deux réglementations européennes décrivent principalement les dispositions à prendre pour les conservations des denrées alimentaires classiques (CE 852/2004) et d'origine animale (CE 853/2004) (PDF).

Depuis le stade de la production jusqu'à celui de la consommation, la limitation

de la dégradation des denrées alimentaires passe par le maintien de la "chaîne du froid".

Deux techniques de conservation prédominent, à savoir :

- * la réfrigération ou froid positif ($>0^{\circ}\text{C}$, 4 à 8 $^{\circ}\text{C}$, $>8^{\circ}\text{C}$);
- * la congélation ou froid négatif (-24°C , -18°C , -12°C).

Les équipements frigorifiques doivent donc assurer l'hygiène dès l'arrivée des denrées dans les magasins de distribution et durant tout leur cycle de vie depuis les zones de stockage jusqu'à leur distribution.

Type de matériel frigorifique	Température à garantir
Chambre froide fruits et légumes	4 à 6°C
Chambre froide viande	2 à 4°C
Chambre froide poisson	2 à 4°C
Chambre froide pâtisserie	2 à 4°C
Chambre froide de jour	2 à 4°C
Congélateur	-12 à -24°C
Local de stockage des déchets	10°C
Cave à vin conditionnée	10 à 12°C/HR 75%
Local de tranchage	10 °C

Deux Arrêtés royaux (AR 57470 paru au Moniteur belge du 22.12.2005 et AR 57449 paru au Moniteur belge du 22.12.2005) traduisent respectivement les réglementations européennes en droit belge.

Recommandations

Les réglementations en matière d'hygiène alimentaire ne précisent que très

peu les températures de conservation à respecter durant toute la chaîne alimentaire froide. Aussi, la plupart se réfèrent au code de bonne pratique HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point).

Les Guides HACCP pour les PME et les artisans représentent une source importante d'informations concernant les températures réglementées en fonction du type de denrée.

Normes et réglementation

❄️ Réglementations concernant l'utilisation des gaz frigorigènes :

- ▲ Le Règlement Européen EU517/2014 impose une réduction importante de l'usage des gaz à effet de serre fluoré.

Textes de référence : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0517>

Le but de cette réglementation est de protéger la couche d'ozone et limiter l'augmentation moyenne de la

température de l'atmosphère à 2°C en interdisant l'utilisation de fluides frigorigènes dangereux pour l'environnement.

Dans ce cadre, on utilise la référence GWP. **Global Warming Potential**, elle désigne le potentiel de réchauffement global d'un gaz émis dans l'atmosphère. Plus la valeur du GWP est importante et supérieure à 1, plus l'impact du gaz est néfaste pour l'environnement. Le tableau suivant reprend les valeurs GWP maximales à ne pas dépasser à partir des échéances indiquées.

	2015	2017	2020	2022	2025	2030
Nouvelle Installation	Equipement de réfrigération domestique GWP > 150	Climatisation mobile dans les nouvelles voitures et camionnettes GWP > 150	Equipement de réfrigération hermétique à usage commercial GWP > 2500 Equipement de réfrigération fixe GWP > 2500 Clim mobile autonome GWP > 150	Equipement de réfrigération hermétique à usage commercial GWP > 150 Systèmes de réfrigération centralisés multiposte à usage commercial > 40kW GWP > 150	Climatisation bi-bloc (unité intérieure et extérieure) < 3kg avec GWP > 750	
Entretien	Entretien Interdiction de stocker, réparer ou maintenir les installations au R22		Aucune intervention avec HFC neuf GWP > 2500 sur équipement > 40t CO2 eq			Aucune intervention sur les équipements GWP > 2500

▲ GWP de référence:

Type de gaz	GWP (Global warming potentiel)
R32	675
R134a	1430
R404a	3922
R407a	2017
R407c	1530
R407f	1825
R410a	1730
R449a	1397
R507	3985
R290 (propane)	20
NH3 (Amoniac)	0
CO2	1 (référentiel)

- * Limiter les fuites de fluide frigorigène à un taux de moins de 10%. Les contrôles et leur fréquence sont donc légiférés :

Equivalent CO2	Fréquence des contrôles
> 5 Tonnes	Annuel
> 50 Tonnes	2 fois par an
> 500 Tonnes	4 fois par an

Il est à noter qu'à partir de 50 tonnes équivalent CO2 les contrôles sont plus fréquents, à savoir 2 fois par an. Cette fréquence peut être réduite de moitié si l'installation dispose d'un système automatique de détection des fuites.

La réglementation exige la tenue d'un registre ou livret d'entretien. Celui-ci est sous la responsabilité des exploitants

de l'équipement mais c'est le personnel certifié qui consigne les informations adéquates.

Les entreprises employant le personnel certifié (entreprises agréées) doivent conserver une copie du registre pour une période de minimum 5 ans.

Ce registre doit reprendre un certains nombre d'informations:

- ▲ La quantité et le type de gaz à effet de serre fluorés installé,
- ▲ Les quantités de gaz à effet de serre fluorés ajoutées,
- ▲ La quantité de gaz à effet de serre fluorés qui a été éventuellement recyclée ou régénérée, y compris le nom et l'adresse de l'installation de recyclage ou de régénération,
- ▲ La quantité de gaz à effet de serre fluorés récupérée,
- ▲ L'identité de l'entreprise qui a assuré l'installation, l'entretien, la maintenance et, le cas échéant, la réparation ou la mise hors service de l'équipement, y compris, le numéro de son certificat,
- ▲ Les dates et les résultats des contrôles,
- ▲ Si l'équipement a été mis hors service, les mesures prises pour récupérer et éliminer les gaz à effet de serre fluorés.

Incitants financiers

Le seuil minimum d'investissements éligibles est fixé à :

- * 25.000 € (hors TVA) pour les grandes entreprises
- * 20.000 € (hors TVA) pour les PME.

Le montant global de l'aide est fixé à un pourcentage de la base subsidiable.

Taux bruts	PME	GE
Investissements permettant de dépasser les normes communautaires	30%	15%*
Investissements permettant de dépasser les normes communautaires et à condition d'être certifié ISO 14001	35%	17,5%*
Investissements permettant de dépasser les normes communautaires et à condition d'être certifié EMAS	40%	20%*
Investissements permettant une adaptation anticipée aux futures normes communautaires, à condition que les investissements soient mis en œuvre et achevés plus de 3 ans avant la date d'entrée en vigueur de la norme	15% PE 10% ME	
Investissements permettant une adaptation anticipée aux futures normes communautaires, à condition que les investissements soient mis en œuvre et achevés entre 1 et 3 ans avant la date d'entrée en vigueur de la norme	10 % PE	

* Les pourcentages visés ci-dessus, pour les grandes entreprises peuvent être augmentés d'un bonus déterminé comme suit :

- * 5 % si la grande entreprise se situe dans les communes répertoriées en zone de développement hors province du Luxembourg ;
- * 10 % si la grande entreprise se situe dans les communes répertoriées en zone de développement de la province du Luxembourg.

Le montant de l'aide est déterminé en appliquant le taux brut à la base subsidiable déterminée comme explicité au point ci-dessus :

$$\text{Montant de l'aide} = \text{base subsidiable (surcoût)} \times \text{taux brut}$$

Ce type d'investissement relève de la catégorie « protection de l'environnement ». Il a été décidé de considérer les cas de figure suivants :

Puissance frigorifique installation kW	Surcoût		
	NH3	CO2	Propane
25	69%	11%	33%
50	64%	11%	31%
75	59%	12%	29%
100	55%	12%	27%
200	42%	13%	22%
300	34%	13%	19%
400	28%	14%	17%
500	23%	14%	15%
600	20%	14%	13%
700	17%	15%	12%
800	14%	15%	11%
900	12%	15%	11%
>1000	11%	15%	10%

La puissance de l'installation est la puissance frigorifique du compresseur.

Exemple :

pour un groupe de froid de 400.000 € au NH3 d'une puissance de 250 kW, le surcoût est de 42%, ce qui représente 168.000 €. S'il s'agit d'une PME, le taux d'aide à appliquer est de 30% sur ce surcoût, soit une prime de 50.400 €.

Les installations à base de gaz fluorés, ne sont pas éligibles à l'aide spécifique « environnement et utilisation durable de l'énergie ».

Enfin, estimant que la récupération de chaleur sur les groupes de froid doit être systématisée, elle est considérée comme partie intégrante de l'investissement global.

Les groupes de froid inéligibles à l'aide spécifique « environnement » ou pour lesquels celle-ci serait moins élevée que l'aide classique, peuvent être présentés, le cas échéant, dans le cadre de l'aide classique.

LA PRODUCTION DU FROID

Principe de fonctionnement du cycle du froid

La machine frigorifique sert à capter la chaleur au sein d'une source chaude (chambre froide, frigidaire, congélateur, ...) et à évacuer cette chaleur loin de celle-ci.

C'est, en réalité, le fluide qui circule dans ce système de production de froid qui va effectuer ce transfert de chaleur. Il possède la propriété de se condenser et s'évaporer à des températures différentes en fonction de sa pression : il est appelé « fluide frigorigène ».

Le cycle du fluide est composé de plusieurs étapes :

Evaporation :

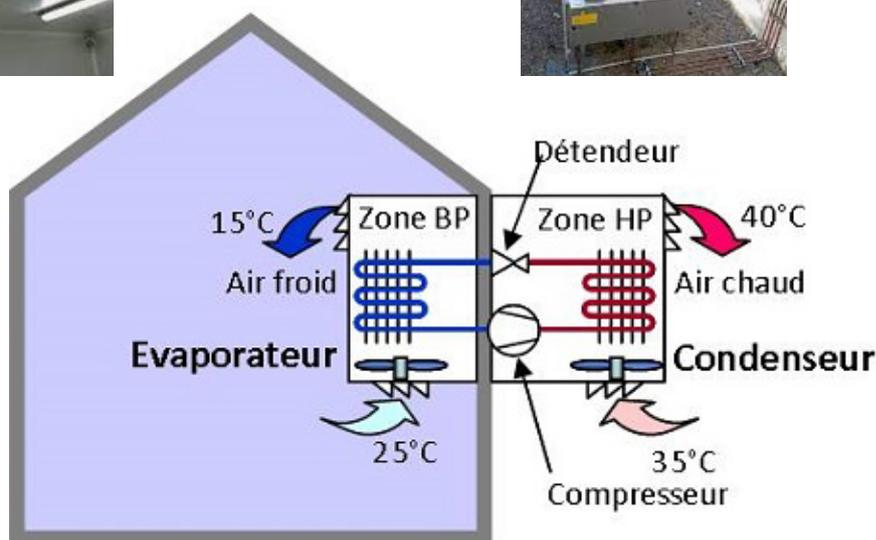
A l'entrée de l'évaporateur (batterie située dans la chambre froide, le frigo, les meubles réfrigérés, ...), le fluide frigorigène est liquide et à basse pression. Il se charge de chaleur qu'il extrait de celui-ci et s'évapore.

Surchauffe :

Le fluide frigorigène gazeux continue même de se réchauffer un peu, pour garantir qu'il ne reste plus de fluide à l'état liquide

Compression du fluide frigorigène :

Le gaz frigorigène est comprimé par le compresseur et passe alors à haute pression et haute température.



Evacuation

à travers le condenseur, de la chaleur extraite vers l'extérieur (à l'arrière du frigo, au niveau de l'unité extérieure de la machine de froid, ...):

- * **Désurchauffe**: le gaz frigorigène évacue sa chaleur sensible (chute de t°)
- * **Condensation** : Le fluide frigorigène gazeux élimine sa chaleur latente en changeant de phase et redevenant liquide.
- * **Sous-refroidissement** : Le fluide frigorigène liquide perd encore de la chaleur

Détente du fluide frigorigène :

Ce liquide est ensuite détendu pour revenir aux conditions dans lesquelles il pourra, de nouveau, réextraire de la chaleur hors du lieu à refroidir.

Le diagramme de Mollier représente ce cycle. Vous y retrouvez toutes les étapes décrites ci-dessus :

Comment récupérer la chaleur du condenseur ?

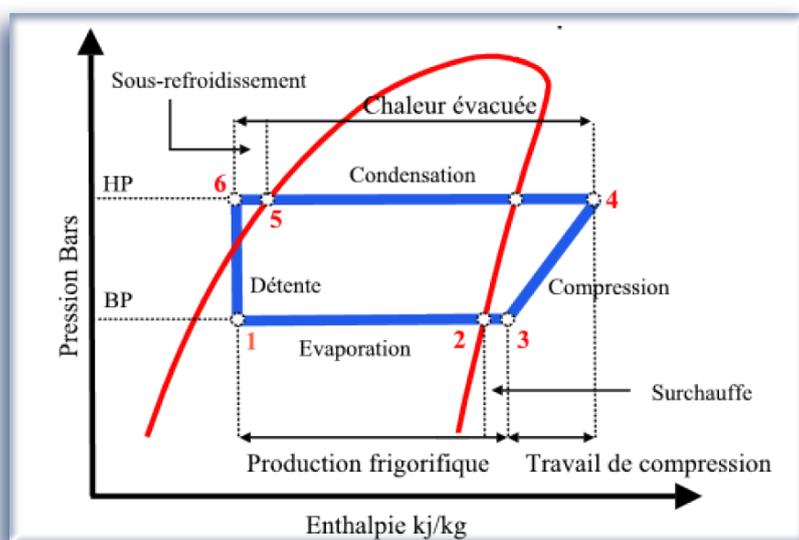
Il a plusieurs moyens de mettre à profit la chaleur du condenseur.

Il peut être efficace de faire passer directement l'air des locaux à chauffer sur le condenseur de l'installation frigorifique.

Il s'agit essentiellement du cas où le condenseur est incorporé au meuble frigorifique. La chaleur est donc évacuée dans le magasin même. Inintéressante lorsque la température du magasin est déjà trop élevée (été par exemple), cette situation peut conduire à vouloir rafraîchir le magasin (consommations électriques supplémentaires pour cette climatisation inutile). Il faut donc maîtriser cet apport facile de chaleur. Pour ce faire, une gaine récupérant l'ensemble de cette chaleur doit être installée. Elle amènera l'air chaud soit vers l'extérieur (lorsque la température du magasin est trop importante), soit vers le lieu à chauffer par exemple, vers un rideau

d'air à l'entrée du magasin, vers les caisses (pieds des caissières – la chaleur monte ...) ou vers des zones du magasin éloignées des zones réfrigérées.

Par contre, renvoyer cet air chaud vers les allées entre les meubles frigorifiques n'est pas intéressant du point de vue énergétique. Cet apport de chaleur va nécessairement réduire l'efficacité des meubles frigorifiques et augmenter leurs consommations



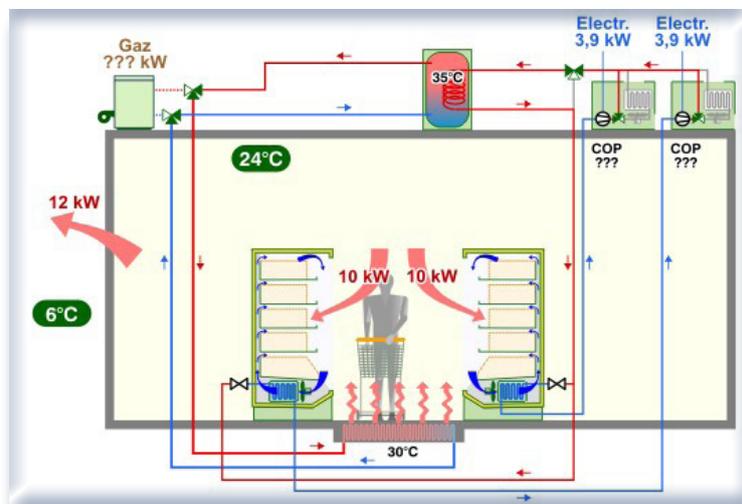
électriques pour produire du froid. Le fait d'avoir des meubles frigorifiques fermés est un plus dans cette situation.

Une deuxième possibilité est de récupérer la chaleur évacuée par le condenseur à air, par l'intermédiaire d'un condenseur à eau. La machine centralise la production de froid de plusieurs meubles ou de chambres froides,... Elle est située à l'extérieur (sur le toit ou de préférence à un endroit protégé des rayonnements solaires).

✧ La chaleur récupérée va permettre de chauffer **l'eau de chauffage** à une température variant en fonction des besoins en froid. Malheureusement, les besoins en froid augmentent quand les températures extérieures sont clémentes et c'est le moment où on n'a moins besoin de chauffage. En période hivernale, par contre, la température de l'eau ne sera peut-être pas suffisante pour chauffer les locaux mais un appoint pourra être installé (chaudière, PAC, ...). Certaines installations de chauffage peuvent se permettre d'utiliser de basses températures d'eau telles que les systèmes de rayonnement de sol ou du matériel légèrement surdimension-

né. Le rayonnement de sol est utilisable si le magasin est bien isolé, c'est un bon moyen de réchauffer les allées entre les meubles réfrigérés si vraiment cela est nécessaire (mauvais moyen = pulser de l'air chaud dans ces allées). La chaleur chauffe l'air par rayonnement et donc peu de chaleur est entraînée par induction dans les meubles lors de l'ouverture des portes. Le rayonnement de sol peut aussi servir à chauffer les zones de caisses (à condition qu'un rideau d'air ou mieux un sas coupe le froid venant de l'extérieur). Le système de chauffage par rayonnement sera conçu dès la construction. Les circuits doivent être pensés de telle manière à repérer les zones de vente des zones réfrigérées, des zones de caisse,... La régulation pourra ainsi fermer certaines zones lorsque d'autres resteront ouvertes.

La récupération de chaleur peut également être utilisée **pour l'eau sanitaire**. Les besoins en eau chaude sanitaire doivent être importants par rapport à la puissance de la machine frigorifique. Un ballon tampon peut conserver l'eau chauffée en permanence par la machine pour qu'elle soit utilisée au moment opportun.



Une troisième solution consiste à utiliser **une PAC eau/eau installée sur le circuit**. Pour le chauffage des locaux, on peut ainsi récupérer 50 à 80 % des besoins. Notez qu'il est aussi possible de récupérer la chaleur produite lors du refroidissement de l'huile des compresseurs.

Isolation des tuyauteries de fluide frigorigène

Au-delà de la récupération de chaleur, il est important évidemment d'éviter les fuites de chaleur. Les tuyauteries de retour du condenseur (extérieur) vers l'évaporateur (intérieur) doivent être calorifugées y compris le détendeur afin de limiter les apports thermiques de l'ambiance extérieure vers le liquide frigorigène. En effet, réchauffer le liquide diminuerait la capacité frigorifique de l'évaporateur.

Les tuyauteries quittant l'évaporateur et compresseur vers le condenseur ne doivent pas être absolument isolées car la température du gaz qu'elles contiennent est déjà trop élevée (sauf si on veut récupérer la chaleur sur la désurchauffe).

Comment conserver le froid ?

Il est plus facile de conserver une zone à basse température si l'on en réduit les déperditions d'énergie et infiltrations d'air par les parois et les apports thermiques externes et internes.

Ce principe, économiseur d'énergie, est identique pour un meuble réfrigéré, un congélateur, une chambre froide ou un local réfrigéré.

Réduction des apports thermiques externes

Réduire les apports solaires

- ❄ Eviter toute ouverture telle que lanterneau ou fenêtre de toit inondant la zone à réfrigérer de rayonnements solaires. Cette action réduit l'éclairage naturel ce qui oblige à un éclairage artificiel consommateur d'électricité (choix judicieux du type de luminaires).
- ❄ Placer des protections solaires. Ce dispositif doit être placé à l'extérieur du bâtiment ou de la zone : volet, végétation, toile solaire (vitrine), toiture en surplomb, store, brise-soleils, vitrages antisolaires ... Les protections solaires les plus performantes permettent une réduction de près de 90% des apports solaires.

Réduire les apports thermiques par les parois opaques

❄ Isoler la toiture du magasin

Cette action permet de réduire les déperditions de chaleur hivernales mais aussi les apports thermiques lors de températures extérieures élevées. Ceux-ci sont d'autant plus importants que le revêtement de la toiture est sombre.

* **Créer un sas au niveau de l'entrée du magasin**

Il existe plusieurs solutions pour éviter les échanges de chaleur au niveau de l'entrée:

- ▲ Installation de deux portes successives qui ne s'ouvrent pas simultanément,
- ▲ Installation d'une porte tambour (ou tourniquet) : plus chère à l'achat que le sas mais plus efficace du point de vue énergétique et plus simple au niveau de la régulation d'ouverture des portes.
- ▲ Placement d'un rideau d'air chauffé en hiver et de préférence non climatisé en période estivale. Cette solution est moins onéreuse à l'achat que le sas ou tambour mais bien plus chère à l'utilisation (fonctionnement du ventilateur, chauffage de l'air et climatisation éventuelle mais déconseillée). De plus, la pulsion d'air chauffé induit un apport de chaleur à l'intérieur du magasin.

Réduire les apports thermiques internes

Eviter les pièces (sur)chauffées

- * Congélateurs, frigos doivent être placés hors du local chauffé par un four à pain, une rôtissoire à poulets ou tout matériel de production dégageant de la chaleur ou unité extérieure de la machine de production, ... Idéalement, les deux locaux doivent être séparés par une porte, des lanières en plastique, etc ...

- * Extraire la chaleur dégagée par les appareils producteurs de froid. Au niveau du condenseur, la chaleur est dégagée des frigos, congélateurs, de l'unité extérieure de chambre froide ou de climatisation, ... Comme nous l'avons vu précédemment, il est intéressant de réduire la température de condensation du FF donc de permettre une bonne et facile évacuation de la chaleur lors de cette étape. Il est possible d'extraire cette chaleur du local via un ventilateur. Cet air chauffé peut être directement dirigé vers un local contigu à chauffer ou vers l'extérieur. Cette opération permettra d'augmenter le rendement de la machine de froid. Lorsqu'il s'agit de machines de froid de plus grosse puissance (plusieurs meubles frigorifiques, grande chambre froide, local réfrigéré, ...), il est adéquat d'étudier la possibilité de récupérer ce dégagement de chaleur (production d'eau chaude sanitaire, chauffage, -voir plus haut...).

Installer un système d'éclairage performant

Le remplacement de luminaires munis de tubes dégageant beaucoup de chaleur par des luminaires led (moins puissants pour un même éclairage) permettra de réduire les apports thermiques internes. Cette action sera bénéfique et réduira la consommation électrique du commerce, la durée de fonctionnement de l'éclairage étant souvent très importante.

Confinement du froid dans les meubles frigorifiques

La consommation électrique principale des meubles frigorifiques ouverts est due à l'échange de chaleur entre l'ambiance du magasin et l'intérieur du meuble (rideau d'air par induction et parois du meuble par conduction, convection et rayonnement).

Les produits réfrigérés, l'éclairage, la production de chaleur des ventilateurs, les cordons chauffants (portes) et systèmes de dégivrage sont des apports internes non négligeables.

Le meilleur moyen de préserver le froid à l'endroit où il est nécessaire et de rentabiliser son utilisation est de le confiner autant que possible dans une zone dédiée (local réfrigéré, meubles frigorifiques rassemblés ou tunnels froids, ...).

Réduction des apports thermiques vers les meubles frigorifiques

Les meubles ouverts horizontaux ou verticaux à température positive sont encore bien présents dans les magasins. Certains sont fournis en froid par une production centralisée mais bon nombre sont encore indépendants avec un groupe de froid individuel. Quoi qu'il en soit, il est indispensable de réduire au maximum les apports de chaleur dans leur enceinte.

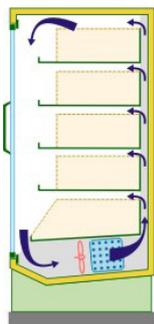
- * Tirer, durant la période de fermeture du magasin, un store ou volet isolant (meubles verticaux) ou une couverture type rideau aluminium isolé (meubles horizontaux). Il est possible d'appliquer ce type de volet aux meubles s'il n'est pas d'origine. Cette action peut conduire à une réduction énergétique moyenne de 15 à 20%.



- * Placer des portes en plexiglas pour fermer les gondoles (meubles horizontaux) à température négative peut réduire de 30 à 35 % la consommation électrique.

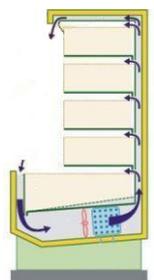


- ❄ Placer des portes aux meubles verticaux (t° positive ou négative) afin de réduire les entrées d'air venant de l'environnement vers l'intérieur des frigos. La diminution de la consommation énergétique peut aller jusqu'à 30%. Selon certains exploitants consultés, les denrées à choisir par le client sont moins accessibles ce qui semble réduire quelque peu la vente.



- ❄ Si des portes ne peuvent être placées, il est indispensable d'optimiser le rideau d'air circulant « dans » le meuble et qui limite les apports de chaleur par l'air ambiant. Cette optimisation passe par un contrôle de la vitesse de l'air du rideau d'air :

- ▲ meubles horizontaux, à 0,5 m/s
- ▲ meubles verticaux, entre 0,6 et 0,7 m/s.



- ❄ Réduire les pertes par rayonnement des parois des meubles vers les parois de l'environnement (plafond en particulier pour les meubles ouverts horizontaux). Cette perte par rayonnement

peut être très importante et réchauffer les denrées de 3 à 4 °C. Le placement d'un baldaquin au-dessus du meuble permet de réduire ces pertes .

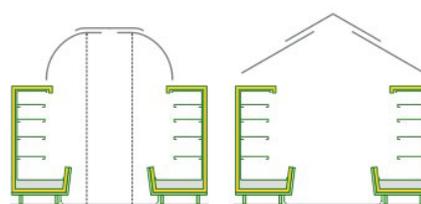


- ❄ Optimiser ou supprimer les luminaires dans les meubles. Les tubes et ballasts d'éclairage dégagent de la chaleur dans les meubles réfrigérés (les leds aussi mais moins que les TL néons dont le rendement lumineux est seulement de 40%). L'idéal est de remplacer les luminaires par des luminaires led et les placer hors de l'enceinte du meuble.

Centraliser les meubles frigorifiques

Les meubles frigorifiques ouverts ou fermés peuvent être rassemblés et plus facilement isolés de toute zone de dégagement de chaleur.

- ❄ Créer des tunnels de meubles frigo en plaçant un baldaquin au-dessus des allées entre les meubles se faisant face. Le froid est conservé dans l'entité « Tunnel ».



- * Ne pas chauffer les allées entre les meubles. Des mesures de température et d'humidité ont été réalisées dans plusieurs commerces de grande surface. En moyenne, les températures relevées ne dépassaient pas les 16°C avec une humidité relative de l'ordre de 35 %.

Il est parfois décidé de chauffer ces allées ce qui est une erreur du point de vue énergétique.

Centraliser les denrées réfrigérées dans un local réfrigéré

Cette solution est la meilleure pour réduire les apports de chaleur dans la zone réfrigérée. Les denrées réfrigérées subissent aussi beaucoup moins de variations de température sauf auprès des baies d'entrée et lorsque des produits à réfrigérer sont introduits.

Implanter au meilleur endroit

- * Au centre du bâtiment tant que possible afin d'éviter au maximum les apports thermiques externes ;
- * Loin des zones chauffées par chauffage ou par des matériels de production tels que rôtissoires, fours, ...
- * La plus compacte ou confinée possible afin de ne réfrigérer que l'essentiel ;
- * Travailler avec des chambres froides modulables.

Isoler l'enveloppe de la chambre froide

- * L'enveloppe doit être très bien isolée pour réduire les pertes à travers les parois (y compris le sol) mais aussi pour éviter la condensation, pour des raisons d'hygiène. L'enveloppe doit être très étanche et munie idéalement d'un pare-vapeur,
- * Ordre de grandeurs de coefficients thermiques à atteindre :
 - ▲ 0,350 à 0,263 W/m²K en stockage réfrigéré,
 - ▲ 0,263 à 0,162 W/m²K en stockage surgelé.
- * Installer une porte à fermeture automatique, des lamelles en plastique et isoler parfaitement la porte. Il est important de vérifier que les joints soient toujours élastiques et étanches.



Dégivrer l'évaporateur

Les meubles ouverts sont réfrigérés grâce à un flux d'air froid pulsé dans leur enceinte. Ce flux provoque des entrées d'air parasites de l'ambiance extérieure vers l'intérieur du meuble. Cet air ambiant contient de la vapeur d'eau (est plus humide que l'air réfrigéré) qui en refroidissant givre au contact des parois froides de l'évaporateur. Deux conséquences principales sont :

- * la chute du rendement de la machine frigorifique suite au mauvais fonctionnement du compresseur de la machine ;
- * la réduction de l'échange entre l'air à refroidir et le fluide frigorigène.

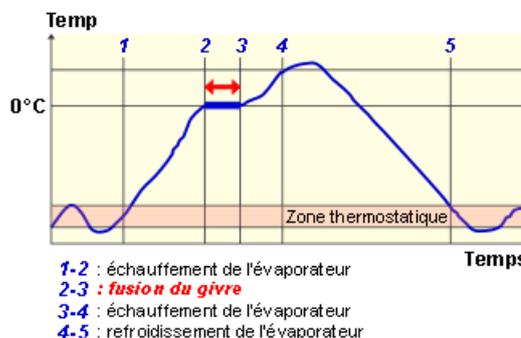
Les deux conséquences entraînent une consommation majorée d'électricité.

Le dégivrage de l'évaporateur est donc nécessaire (voire obligatoire).

Dégivrage forcé

- * Arrêt du fluide frigorigène dans la batterie de l'évaporateur : la vanne d'entrée du FF dans l'évaporateur est fermée : bien vérifier la présence de cette vanne et son fonctionnement,
- * Arrêt de la ventilation de l'évaporateur pour éviter un dégagement de chaleur (voir points suivants) dans la zone réfrigérée (chaleur due au dégivrage),
- * Réchauffage de la batterie jusqu'à une température supérieure à 0 degré pour faire fondre la glace (com-

prend les trois étapes 1-2 réchauffement du givre, 2-3 fusion du givre et 3-4 échauffement de l'évaporateur) :



- ▲ Soit via une résistance chauffante (méthode simple mais très coûteuse en électricité en heures pleines notamment. Attention aux pointes ¼ horaire).
- ▲ Soit par introduction de « vapeurs refoulées » ou « gaz chauds refoulés » par le compresseur. Les temps de dégivrages sont très courts car les gaz introduits sont très chauds mais cette technologie nécessite un réseau de fluide frigorigène plus spécifique ce qui entraîne un coût à l'achat plus élevé.

Les deux méthodes précédentes sont utilisées dans les meubles frigorifiques (fermés, ouverts ou mixtes) à température négative ainsi que pour les chambres frigorifiques mais avec une préférence pour la résistance électrique. Les machines à glaçons utilisent toujours le système à vapeurs refoulées.

- * Remise en fonction du fluide frigorigène (étape 4-5 du graphique ci-dessus) puis du ventilateur de l'évaporateur lorsque la batterie de celui-ci est suffisamment froide.



Dégivrage naturel

Dans l'enceinte d'un meuble frigorifique à température positive, la possibilité de réaliser un dégivrage naturel par circulation forcée d'air est souvent un succès.

Les points 2 et 3. sont alors remplacés par une circulation d'air sans production de froid. Il n'y a aucune production de chaleur donc aucune autre consommation électrique que celle due au fonctionnement du ventilateur.

Cette méthode est aussi utilisée pour le dégivrage dans les chambres froides dans certaines conditions.

Sources de consommation d'énergie lors du dégivrage

- * Apport de chaleur nécessaire à la fusion du givre,
- * Apport d'énergie pour refroidir l'évaporateur qui a été réchauffé dans l'opération 1. (dans la plupart des cas),
- * Apport d'énergie nécessaire à refroidir la chambre froide et évacuer la chaleur qui a été apportée.

Optimiser le temps du dégivrage de l'évaporateur

Par défaut, les fabricants règlent les durées de dégivrage mais il est important

de rationaliser ces durées en essayant de les réduire :

- * Soit alimentation électrique mise sur horloge (intéressant pour les petits volumes réfrigérés mais pas précis),
 - * Soit régulation électronique intelligente. Elle est intéressante si elle permet d'optimiser le dégivrage c'est-à-dire de le démarrer quand présence de givre et de le finir quand plus de givre du tout !
- ▲ **Système 1** : le régulateur conserve les durées de fusions successives démarrées à partir d'une horloge et estime l'importance du givre formé en fonction de ces durées. Il optimise ensuite la mise en route ou non du dégivrage suivant,
- ▲ **Système 2** : deux sondes réalisent les mesures de la température ambiante de la zone réfrigérée et la température entre les ailettes de l'évaporateur (nous montre si présence de glace ou non). En fonction de ce delta de températures, le régulateur décide du type de dégivrage qu'il utilise :
- Si grand delta : résistance chauffante en action,
 - Si faible delta : la mise en mouvement de l'air de la zone réfrigérée suffira à faire fondre la glace (compresseur mis à l'arrêt).

Améliorer le dégivrage au niveau des chambres froides

- * Placer l'évaporateur à l'opposé de la porte. L'air extérieur à la chambre froide est plus chaud et humide que l'air contenu dans celle-ci. La vapeur d'eau entre facilement à chaque ouverture de porte et givre sur l'élément froid qu'est l'évaporateur.
 - * Placer des lamelles en plastique côté intérieur derrière la porte de la chambre. Ce dispositif réduit encore l'entrée d'air chaud et humide dans la chambre froide. Il n'est pas possible partout.
 - * Effectuer régulièrement un dégivrage naturel. Arrêter la production frigorifique dix minutes toutes les deux heures tout en laissant tourner les ventilateurs de l'évaporateur. Ces dégivrages naturels coûtent peu en énergie mais réduisent le nombre de dégivrages non naturels.
 - * Réduire le nombre et la durée des ouvertures de la porte (tant que possible) Regrouper les entrées permet de réduire la quantité d'air chaud et humide entrant dans la chambre. Ceci permet de
 - ▲ Réduire le nombre de dégivrage (énergie pour le dégivrage et énergie pour refroidir l'évaporateur qui a été réchauffé pour le dégivrage)
 - * Réduire l'énergie nécessaire à refroidir l'air chaud et humide introduit
- Un calcul a été réalisé : Passer de 10 ouvertures de porte par heure (durée moyenne de chacune d'entre elles = 30 secondes) à 5 ouvertures de 6 se-

condes, divise par 10 la consommation d'électricité due aux dégivrages de cette chambre. Une organisation différente peut, peut-être, rendre possible cette opération.

- * Veiller à la bonne évacuation des condensats. Lorsque les condensats s'évacuent mal ou pas, la « rentabilité » du dégivrage est affaiblie car l'eau accumulée peut rapidement prendre en glace la batterie de l'évaporateur. L'échange de froid est alors fortement réduit et la consommation énergétique s'accroît.

Autres améliorations possibles

- * Utiliser un évaporateur à batteries multi-étagées (un étage est en dégivrage pendant que les autres sont en production de froid)
- * Déshumidifier l'air devant les meubles principalement s'il s'agit de meubles ouverts (voir rideau d'air devant les meubles)
- * Déshumidifier l'air du magasin en utilisant un groupe de traitement d'air global pour le magasin (très coûteux et non rentable).
- * Isoler les évacuations de condensats dans les chambres froides à température négative (voire les chauffer).

Optimiser la régulation

Connaître les profils de consommations pour chaque zone à réfrigérer

Il existe de simples systèmes de monitoring peu coûteux qui permettent de mieux se rendre compte de ce qui est consommé quand ont lieu les pics et pour quels appareils. Un compteur d'énergie est placé sur l'alimentation de la machine frigorifique. Ce compteur mesure périodiquement la consommation et rapatrie les données qui sont alors accessibles, depuis un ordinateur, une tablette ou un smartphone sous forme de graphique. Ce profil de consommations vous apprend combien consomme un dégivrage, l'impact de l'ouverture d'une porte de chambre froide, la consommation électrique durant les heures de fermeture du magasin, ...

Placer une gestion centralisée de la régulation de tous les utilisateurs de froid.

Lorsque qu'énormément de frigos ou meubles sont en place, il est plus facile de gérer les paramètres de régulation de chacun d'entre eux à partir d'une plateforme GTC.

Etaler les dégivrages dans le temps

Lorsque beaucoup de meubles ou zones doivent être dégivrés, la programma-

tion de ces dégivrages doit être étalée dans le temps. Ce permet de ne pas cumuler les appels de puissance de tous les compresseurs des machines frigorifiques. Cette action permet de maîtriser les pointes de courant responsables des pointes $\frac{1}{4}$ horaire (ces pointes ont un coût non négligeable).

Privilégier la production de froid quand le coût de l'énergie est plus faible

Durant les heures creuses (en soirée en tout cas), les différentes installations frigorifiques sont moins gourmandes en froid car elles sont beaucoup moins sollicitées: pas d'ouverture des portes, pas d'entrée de denrées plus chaudes, ... Par contre, le coût de l'électricité en heures creuses est moindre. Il peut s'avérer intéressant de surproduire du froid pour le stocker et le réutiliser en journée. Notons que les heures creuses sont effectives la nuit durant la semaine mais aussi toute la durée des week-ends.

Si l'on dispose de panneaux photovoltaïques, les heures de grand ensoleillement sont aussi à mettre à profit.

Dans ces différents moments, il est intéressant de produire de l'énergie frigorifique en abaissant la température de consigne de quelques degrés.

Cette surproduction est emmagasinée dans un réservoir

- * soit d'eau très froide (exemple 5°C) que l'on utilisera lors des pointes de demandes;
- * soit de glace. Ce système de stockage, bien plus coûteux, est beaucoup plus performant.

Pour aller plus loin dans la technique

Les fluides frigorigènes

Description

Un fluide frigorigène est un fluide ou un mélange de fluides présentant des particularités physiques permettant d'exploiter un cycle de compression/détente pour le transfert de chaleur. Ils possèdent en particulier une température d'évaporation faible sous pression atmosphérique.

Les fluides frigorigènes sont utilisés pour refroidir des dispositifs réfrigérants (réfrigérateur, congélateur, climatiseur...).

Propriétés des fluides frigorigènes

Chaque fluide répond à plusieurs critères :

- * Sa sécurité d'usage : inflammabilité,...
- * Son impact environnemental sur la couche d'ozone, mesuré par son indice ODP (Ozone Depletion Potential), exprimant la nocivité pour la couche d'ozone vs une référence qui est le R11. Cet indice n'existe que pour les fluides contenant du chlore (soit CFC et HCFC)
- * Son impact environnemental direct sur le réchauffement climatique exprimé via le Potentiel de Réchauffement Global (PRG ou GWP, Global Warming Potential, en anglais) dû aux émissions causées lors de fuites du fluide ou en fin de vie si le fluide

frigorigène est non recyclé. Le CO₂ sert de base et correspond à la valeur numérique 1 pour une durée de 100 ans. Cette valeur indique à quel point 1 kg d'un fluide frigorigène contribue au réchauffement global de la Terre par comparaison avec 1 kg de CO₂ dans l'atmosphère.

- * L'impact environnemental global de l'installation sur le réchauffement climatique exprimé par la valeur TEWI (Total Equivalent Warming Impact). Elle cumule sur l'ensemble de la durée de vie de l'installation l'impact de toutes les émissions directes (voir PRG) à l'impact des émissions indirectes relatives à la consommation énergétique de l'installation.

Comme nous le constatons, ces fluides frigorigènes ont un impact variable sur la couche d'ozone stratosphérique de la Terre et le réchauffement climatique. Pour rappel, la vie sur Terre est protégée par la couche d'ozone qui agit comme un filtre contre certains rayons UV nocifs du Soleil ce qui, indirectement, agit de manière bénéfique contre le réchauffement climatique.

Un accord mondial (Protocole de Montréal de 1987, ratifié par 197 pays membres de l'ONU) vise à éliminer progressivement les substances chimiques qui appauvrissent la couche d'ozone. Comme ces substances sont aussi de puissants gaz à effet de serre, la réduction progressive de leur production et consommation est essentielle à l'atténuation du changement climatique.

Le protocole de Montréal a été renforcé à de nombreuses reprises notamment via le protocole de Kigali entré en vigueur en 2019 et régissant l'utilisation

des HFC.

On croit qu'avec une mise en œuvre complète continue des dispositions du Protocole, la couche d'ozone devrait retrouver les niveaux d'avant 1980 d'ici 2030 pour les moyennes latitudes de l'hémisphère nord, et dans les années 2050 pour les moyennes latitudes de l'hémisphère sud, et dans les années 2060 pour l'Antarctique. Ces résultats dépendront aussi de l'évolution du réchauffement climatique d'ici là (source CNRS – 13 septembre 2022)

Types de fluides frigorigènes

❄ **Les chlorofluorocarbures halogénés** : Ils contiennent du Chlore et sont retirés du marché (protocole de Montréal) étant donné leur capacité importante de destruction de la couche d'ozone. Ils sont désormais totalement interdits. Ils ont été remplacés par les HFC (qui se sont avérés non plus destructeurs de la couche d'ozone mais a haut pouvoir de réchauffement climatique – voir ci-dessous).

⤴ **Chlorofluorocarbures** : CFC (R11, R12, R502) – mise sur le marché et recharge d'installation existante interdites depuis 2000,

⤴ **Hydro-chlorofluorocarbures** : HCFC (R22, ...) – mise sur le marché interdite depuis 2000, recharge d'installation existante interdites depuis 2010, utilisation interdite depuis 2015.

❄ **Les hydrocarbures halogénés**

Hydrofluorocarbures : les HFC (R134a, R404a, R407c, R410a, ...)

ne contiennent plus de chlore mais gardent un grand potentiel de réchauffement climatique (par exemple : le HFC-134a possède un PRG sur 100 ans de 1.430). La réduction de leur consommation et de leur production des HFC se fera par paliers (amendement de Kigali) pour atteindre 79% en 2030.

Le règlement européen CE517/2014 mis en vigueur en 2015 contient déjà des obligations telles que la réduction de l'utilisation des HFC, la prévention d'émission, la certification et le contrôle après réparation (endéans le mois). Les personnes responsables de ces opérations y sont mieux décrites. Les principaux points de ce règlement toujours en vigueur sont repris à l'adresse web : <https://energieplus-lesite.be/reglementations/climatisation-et-refrigeration3/reglementation-des-fluides-frigorigenes/>

L'amendement de Kigali au protocole de Montréal précise le calendrier de réduction de la consommation et production des HFC. Elle se fera par paliers pour atteindre 79% en 2030.

❄ **Les hydrofluoro-oléfinés (HFO)** sont des fluides frigorigènes de 4^{ème} génération. Ils n'ont pas d'action sur la couche d'ozone et peu sur l'effet de serre, ils sont donc utilisés sans restriction. Nous retrouvons notamment les HFO-R1234ze (tétrafluoropropène) ou HFO-R1234yf dans les climatisations automobiles, systèmes de réfrigérations domestiques, commerciaux et industriels.

❄ **Les fluides frigorigènes dits naturels** : CO₂ et NH₃

- ▲ **Le NH₃ (R717)** possède un ODP = 0 et PRG = 0 et est donc un des fluides frigorigènes les plus écologiques.
- ▲ **Le CO₂ (R744)** a de bonnes qualités pour les applications basses températures (réfrigération commerciale négative). Son impact est très faible sur l'environnement avec un PRG = 1.

Ces fluides sont reconnus comme fluides frigorigènes naturels depuis longtemps (1913 à 1934) et pourtant sont les fluides frigorigènes du futur étant donné les performances élevées et l'interdiction prochaine d'utilisation de la plupart des autres fluides frigorigènes. Lors de tout nouveau projet, il est inévitable d'étudier une solution les utilisant.

Choix du fluide

Les deux fluides frigorigènes dits naturels (CO₂ et NH₃) s'imposent vu leurs bonnes performances énergétiques et leur faible impact écologique tant sur la couche d'ozone que sur les émissions de CO₂.

❄ **NH₃ ou (R717)**

- ▲ Efficacité énergétique élevée
- ▲ Ce fluide naturel sans conséquence sur l'environnement est toxique dans certaines circonstances et un peu inflammable ce qui conduit parfois à mettre en œuvre des systèmes multi-fluides où l'ammoniac est alors utilisé en quantité plus rai-

sonnable.

- ▲ Son coût est très faible en comparaison à la plupart des autres fluides frigorigènes. Par contre, il nécessite souvent des systèmes de détection de fuite étant donné sa toxicité.
- ▲ Un système à l'ammoniac peut être 15 à 20% moins énergivore qu'un système R404a par exemple. Les combinaisons NH₃/CO₂ en cascade sont encore bien plus efficaces pour de très basses températures .

❄ **CO₂ (R744)**

- ▲ Un des fluides frigorigènes les plus respectueux de l'environnement (pas d'action sur ozone et peu d'impact sur l'effet de serre (exemple : le R404a a un impact 3.800 fois plus important que le CO₂),
- ▲ Fluide naturel dont la disponibilité est infinie,
- ▲ Non toxique, non corrosif et ininflammable
- ▲ Pressions de service très importantes par rapport aux autres fluides réfrigérants donc matériel de sécurité doit être très performant,
- ▲ Par contre, volume massique faible ce qui entraîne une capacité de production frigorigène volumétrique très supérieure à celle des réfrigérants habituels. Ceci permettant l'utilisation de compresseurs de faible cylindrée et des circuits de faible volume (installations compactes possibles), (Source : Intarcon https://www.intarcon.com/fr/refrigeration-au-co2/#Proprietes_thermodynamiques_du_CO2)

Optimisation du cycle frigorifique

Régulation de la production

Les besoins en froid des installations diffèrent en fonction des conditions climatiques extérieures. Il est intéressant d'adapter le fonctionnement de la machine de production de froid en tenant compte de ces besoins différents :

* Détendeur soit thermostatique, soit électronique

Le détendeur sert à détendre le fluide frigorigène liquide afin qu'il puisse, à l'entrée de l'évaporateur, commencer à capter la chaleur sur l'ambiance à refroidir, en se vaporisant peu à peu puis augmentant sa température (surchauffe).

Si peu de chaleur est à extraire, le fluide frigorigène liquide risque de ne pas s'évaporer complètement ce qui pourrait abîmer le compresseur au sortir de l'évaporateur. Dans ce cas, le débit du fluide frigorigène liquide entrant dans l'évaporateur devrait être limité. Pour ce faire, le pointeau du détendeur thermostatique se ferme. La fermeture de ce pointeau est régulée en tenant compte de la valeur de la température mesurée au bulbe situé au sortir de l'évaporateur. Le détendeur thermostatique gère, en fonction d'une technologie simpliste, la surchauffe au niveau de l'évaporateur (le débit de fluide frigorigène introduit dans l'évaporateur).

Cependant, le détendeur thermostatique est maintenant souvent remplacé par un détendeur électronique. Dans ce nouveau dispositif, la surchauffe est mesurée en permanence à la sortie de

l'évaporateur. Ceci permet au détendeur électronique, en suivant la régulation installée, d'adapter de manière optimale, le débit de fluide frigorigène à injecter dans l'évaporateur. On optimise ainsi la valeur minimale stable de la surchauffe en fonction de la charge de l'évaporateur. On soulage aussi le travail de compression du compresseur en étant certain de ne pas y injecter du liquide.

* Compresseur à vitesse variable

Le compresseur doit être dimensionné en fonction des besoins maximaux mais ces besoins varient parfois fortement. La solution, pour adapter le taux de compression aux moins grands besoins de froid est d'installer un variateur de vitesse sur le moteur du compresseur.

Ces compresseurs vont pouvoir comprimer un volume de fluide variable et ainsi adapter la puissance frigorifique à la charge thermique du local. La consommation électrique s'en voit réduite. De plus, le variateur de vitesse peut être utilisé comme démarreur progressif, ce qui permet de réduire l'intensité au démarrage. Le gain énergétique peut atteindre 20%.

* Réduction de la température de condensation

Pour réduire le travail du compresseur et donc réduire ses consommations électriques, on cherche à réduire l'écart de températures entre condensation et évaporation.

- ▲ Augmentation de la température d'évaporation (difficile) : la température d'évaporation est conditionnée par la température imposée

de conservation des aliments (4°C, -18°C, ... par exemple).

- ▲ Diminution de la température de condensation : possible dans les limites du fonctionnement de la machine de froid et de son environnement : la réduction de 3°C de la température du fluide frigorigène à la condensation permet de réduire de 10% la consommation électrique de la machine frigorifique.
- ▲ Placement de l'unité extérieure dans un endroit ombragé et aéré

Récupération d'énergie

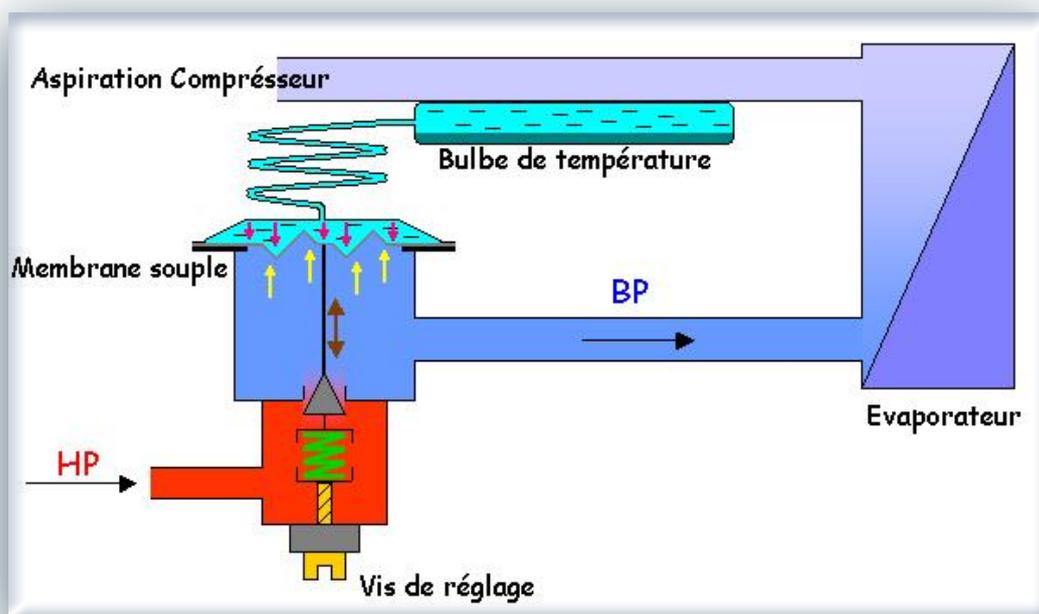
❄ Récupération sur la phase de condensation

Il est possible de récupérer, au condenseur, la chaleur extraite à l'évaporateur. Cette récupération fait l'objet d'un dilemme : d'une part, réduire les consommations énergétiques en diminuant la température de condensation (voir

ci-dessus), d'autre part, récupérer le maximum de chaleur de condensation pour la réutiliser en chauffage ou production d'eau chaude sanitaire. La récupération de chaleur s'envisage généralement sur des puissances importantes et dans les cas où un apport de chaleur est nécessaire quelque part.

La récupération est possible soit à la désurchauffe, soit au sous-refroidissement. La chaleur récupérée est utilisée au préchauffage de l'eau chaude sanitaire ou de l'eau de chauffage.

La désurchauffe des gaz au refoulement du compresseur (2-3 dans le diagramme de Mollier page suivante) peut être une source de chaleur récupérée pour produire de l'eau chaude sanitaire ou compenser les besoins en chauffage ou préchauffer l'air pulsé. En effet, ces gaz sont à une température élevée (entre 70 et 80°C). Or, pour pouvoir être condensés, ces gaz doivent atteindre une température correspondant à la pression de condensation c'est-à-dire une température de +/- 40°C. Donc, si on récupère



cette chaleur, on réduit la température à la condensation et donc la puissance absorbée. Ici, c'est le delta de températures qui permet le gain car la quantité de chaleur est, elle, limitée.

Le sous-refroidissement du fluide frigorigène condensé (4-5 dans le diagramme de Mollier ci-dessus) diminue la température de ce liquide (à même pression) afin d'améliorer la puissance frigorifique de la machine de froid puisqu'il déplace le cycle vers la gauche en augmentant la capacité de l'évaporateur. Il serait alors judicieux de récupérer la chaleur correspondant au sous-refroidissement (delta t° de 20 à 25 $^\circ\text{C}$ environ).

Dans ce cas, le gain est notable puisque le sous-refroidissement bien mené engendre une augmentation du rendement de la machine (de 15 à 25 %) et une récupération de chaleur (notamment en période où la température à la condensation est élevée – été).

DISTRIBUTION ET ÉMISSION DU FROID

Utilisation de fluides frigoporteurs

* Différence entre détente directe et refroidissement indirect

Dans le cycle du fluide frigorigène vu précédemment, l'échange se fait entre ce fluide frigorigène et de l'air, autant au niveau de l'évaporateur qu'au niveau du condenseur. Ce système est appelé un système de production de froid à détente directe. Dans le cas de réfrigération à température positive, se déve-

loppent des systèmes où l'échange se réalise entre le fluide frigorigène et un autre fluide (nommé fluide frigoporteur) que l'air. Le fluide frigorigène reste alors confiné dans la machine de production de froid. Le système est naturellement appelé système de production de froid à détente indirecte.

* Inconvénients du système de refroidissement indirect

- ▲ la consommation électrique globale est légèrement plus élevée que dans un système à détente directe. En effet, deux échanges sont nécessaires: fluide frigorigène/eau et eau/air.
- ▲ L'investissement est plus important,
- ▲ L'espace technique dédié aux machines est plus volumineux,
- ▲ La complexité technique du système est plus grande. Entretien et source de panne plus importants.

* Avantages du système de refroidissement indirect

- ▲ Bonne performance au niveau de l'échange fluide frigorigène /eau,
- ▲ La régulation de la production de froid en fonction des besoins est plus élaborée,
- ▲ Possibilité de réduire les dégivrages grâce à la régulation,
- ▲ Réduction des quantités de fluide frigorigène en réseau dans les magasins puisque celui-ci reste dans l'installation de production de froid. Ceci réduit les risques de fuites de frigorigène et les coûts exorbitants

de remplacement de celui-ci.

- ▲ C'est bien le fluide frigoporteur qui est mis en réseau.

❄️ **Choix du fluide frigoporteur**

▲ **Fluide frigoporteur monophasique**

L'eau glacée est le frigoporteur le plus répandu.

Les consommations énergétiques globales sont plus importantes car le transfert de chaleur (soit de froid) correspond à un delta de température de l'eau (transfert de chaleur de +/- 20 kJoules/kg en chaleur sensible) donc de gros débits sont nécessaires pour transférer cette quantité de froid ce qui implique de plus grandes déperditions au niveau du réseau.

Par contre, les équipements utilisés sont simples et faciles à réguler.

▲ **Fluide frigoporteur diphasique (liquide + solide)**

Ces fluides se trouvent sous forme de « coulis » ou « sorbets » pour des applications de froid positif.

La chaleur latente de fusion est utilisée dans les transferts de chaleur (+/- 250 kJoules/kg) ce qui nécessite moins de quantité de frigoporteur pour transférer la même quantité de chaleur par rapport à l'eau, par exemple.

Il en découle une installation moins importante du réseau et de ses accessoires pour un même transfert de chaleur.

Par contre, certains éléments sont chers à l'achat.

▲ **Fluide frigoporteur diphasique (liquide + vapeur)**

Ces frigoporteurs sont rencontrés dans des applications de froid négatif allant jusqu'à -54°C.

La chaleur latente de vaporisation est utilisée dans les transferts de chaleur et est plus importante encore ce qui implique un bon coefficient d'échange de chaleur. Le réseau le transportant est de plus faible dimension pour une même puissance.

Le CO2 est couramment utilisé pour cette application.

Bibliographie

Expertise de l'Ademe

- * <https://expertises.ademe.fr/batiment/passer-a-laction/elements-dequipement/dossier/usages-professionnels/froid-alimentaire-commercial>
- * Diagnostic électrique d'un supermarché de moyenne surface (Ener-tech) – pdf

Energie +

La chaîne du froid et énergie

<https://energieplus-lesite.be>

SPW Energie et divers

- ▲ AD Delhaize de Bertrix : les frigories ont froid dans le dos
- ▲ axima-15-03-2013-elimination-progressive-du-r22
- ▲ ccih-articlefond-froid-industriel-20180104
- ▲ ccilb-2013-fluides-frigorigenes-versionfinale
- ▲ Chauffage d'un supermarché à partir du groupe de froid - Intermarché Péruwelz –
- ▲ dai-fichsureindustrie-cuveset-tuyauteries
- ▲ dai-fichsureindustrie-froid-edition2010

- ▲ dai-fichsureindustrie-froidextension-150dpi
- ▲ dai-fichsureindustrie-recuperationchaleur-edition2010(3)
- ▲ Optimisation énergétique d'une nouvelle installation de production de froid chez Pastificio Della Mamma
- ▲ Intarcon https://www.intarcon.com/fr/refrigeration-au-co2/#Proprietes_thermodynamiques_du_CO2

X-pair

<https://www.xpair.com>