

# RÉFRIGÉRATION AVEC PEU D'ÉNERGIE

La production de froid pour l'industrie, le commerce, les bâtiments administratifs et résidentiels consomme une quantité d'électricité considérable. C'est également le cas des installations frigorifiques au CO<sub>2</sub> telles qu'elles sont utilisées dans les supermarchés et les centres de distribution alimentaire. L'intégration de composants techniques innovants (système de transfert d'énergie/ETS) permet d'améliorer considérablement l'efficacité énergétique de ces installations. C'est ce qu'un projet pilote et de démonstration financé par l'OFEN a démontré.



Installation frigorifique au CO<sub>2</sub> avec ETS dans le magasin Prodega de Saint-Gall. L'ETS y est mis en œuvre sous sa forme la plus avancée, à savoir avec une pompe radiale résistante à la pression. L'installation de réfrigération avec ETS a été mise en service en octobre 2024. Elle a une puissance frigorifique de 180 kW (comparable à la puissance frigorifique du magasin Prodega de Dietikon). Photo : Frigo-Consulting AG



Prodega Dietikon (ZH) de la filiale Coop Transgourmet Schweiz AG : sur une surface de vente de 4 800 m<sup>2</sup>, on y trouve notamment des produits alimentaires réfrigérés (entre 1°C et 14°C) et des produits surgelés (à -23°C). À l'automne 2022, l'installation frigorifique a été renouvelée : le réfrigérant est désormais du CO<sub>2</sub> et elle est équipée d'un ETS. Photo : Frigo-Consulting AG

Aujourd'hui, le réfrigérateur compte parmi l'équipement de base de tout logement. La production de froid est également cruciale dans l'industrie et le commerce. Les supermarchés, les cash-and-carry ou les centres de distribution, qui rendent les aliments stockables par réfrigération ou congélation, constituent un domaine d'application important. Ces installations frigorifiques disposent de puissances frigorifiques de 50 à plus de 1'000 kW. Le dioxyde de carbone est désormais un fluide frigorigène très répandu : le CO<sub>2</sub> n'est ni inflammable ni toxique et, en cas de fuite, il nuit nettement moins à l'environnement que d'autres agents réfrigérants.

Ces derniers temps, une série de mesures techniques a permis de réduire la consommation électrique des installations frigorifiques au CO<sub>2</sub>. Ces mesures comprennent la compression parallèle, l'utilisation d'éjecteurs et l'immersion partielle des postes réfrigérés (à ce sujet, voir les projets mentionnés à la fin du présent article). La combinaison de ces étapes d'optimisation permet d'améliorer l'efficacité énergétique des installations frigorifiques au CO<sub>2</sub> d'environ 25%.

### Environ 8% d'électricité en moins

La dernière innovation visant à réduire la consommation d'électricité est connue sous le nom de « système de transfert

d'énergie » ou ETS pour Energie-Transfer-System. La première installation frigorifique au monde avec ETS a été mise en service à l'automne 2022 chez Prodega Dietikon (ZH), grossiste alimentaire pour la gastronomie et l'hôtellerie. Une autre des quatre installations frigorifiques avec ETS fonctionne depuis octobre 2024 dans le magasin Prodega de Saint-Gall, lequel appartient également à la filiale Transgourmet de Coop. Afin d'évaluer la performance des deux ETS, les deux installations ont été surveillées par monitoring pendant plusieurs mois : l'installation de Dietikon au cours de l'hiver 2022/23 et celle de Saint-Gall au cours de l'hiver 2024/25. La société Frigo-Consulting AG (Gümligen/BE), qui a développé et planifié les installations frigorifiques avec ETS et accompagné leur intégration, était responsable du monitoring. L'Office fédéral de l'énergie a soutenu financièrement le développement ainsi que le monitoring dans le cadre de son programme pilote et de démonstration.

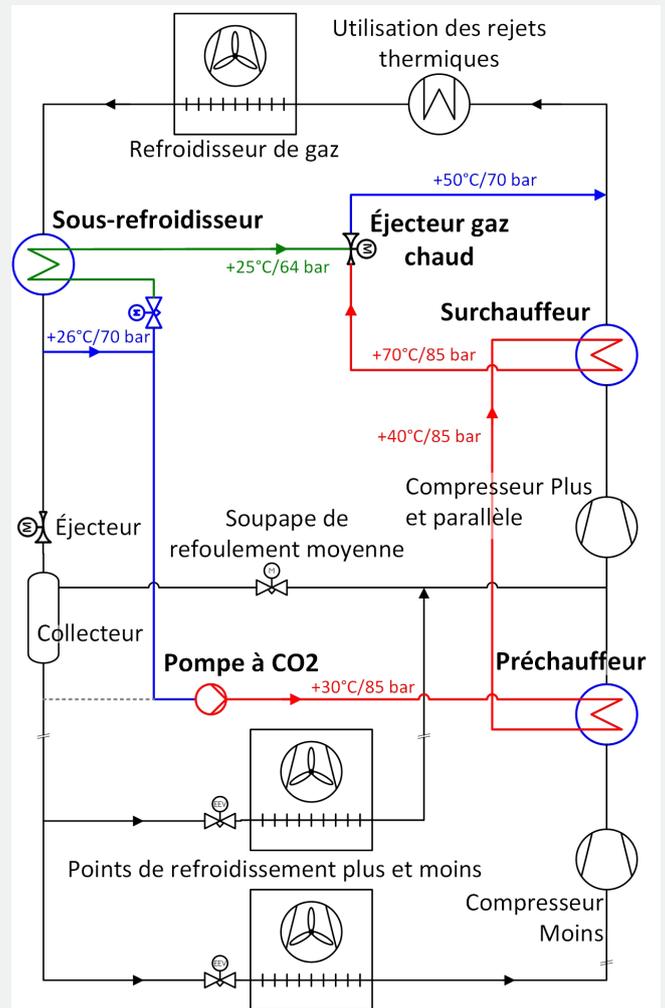
L'évaluation scientifique a montré que la technologie ETS fonctionne et que le processus thermodynamique associé peut être contrôlé automatiquement par des techniques de régulation. Lorsque les installations frigorifiques au CO<sub>2</sub> sont complétées par un ETS, elles consomment environ 8% moins d'électricité, comme le chef de projet Jonas Schönenberger

## COMMENT LE ETS COMPLÈTE L'INSTALLATION FRIGORIFIQUE

Le fonctionnement d'une installation frigorifique au CO<sub>2</sub> traditionnelle (sans ETS) est représenté de manière simplifiée dans le graphique (lignes noires) : le réfrigérant liquide (CO<sub>2</sub>) s'écoule du collecteur vers les postes réfrigérés où il s'évapore en prélevant la chaleur des réfrigérateurs et des congélateurs (refroidissement). Le CO<sub>2</sub> gazeux arrive dans deux compresseurs montés en série (compresseur négatif, compresseur positif et compresseur parallèle). La chaleur résiduelle contenue dans le gaz chaud comprimé est utilisée autant que possible pour le chauffage du bâtiment ou rejetée dans l'environnement via le refroidisseur de gaz. Ce faisant, le CO<sub>2</sub> est désurchauffé et/ou condensé avant d'être réacheminé vers le collecteur via un éjecteur.

Un système de transfert d'énergie (ETS) peut alors être intégré dans cette installation frigorifique au CO<sub>2</sub>. L'ETS est un processus circulaire distinct, également alimenté par du CO<sub>2</sub> : le réfrigérant liquide CO<sub>2</sub> est transporté à une pression élevée par une pompe à entraînement électrique, puis passe par deux échangeurs de chaleur (préchauffeur, surchauffeur) où il est réchauffé et absorbe la chaleur du circuit « classique » de CO<sub>2</sub>. Chaud et sous haute pression, le CO<sub>2</sub> parvient à l'éjecteur de gaz chaud (à ne pas confondre avec l'éjecteur du processus de réfrigération traditionnelle), où il est détendu tout en développant un effet d'aspiration. L'effet d'aspiration de l'éjecteur permet de faire fonctionner un sous-refroidisseur interne. Dans le sous-refroidisseur, le CO<sub>2</sub> liquide s'évapore et refroidit le CO<sub>2</sub> de l'installation frigorifique en dessous du niveau de température ambiante. Globalement, l'ETS extrait la chaleur qui se trouve en dessous du niveau de température ambiante de l'installation frigorifique et l'élève à un niveau de température supérieur à la température ambiante, où elle est finalement transférée au chauffage du bâtiment ou rejetée dans l'environnement. Cela permet de « faire croire » à l'installation frigorifique qu'elle a une température d'abaissement plus basse et ainsi de la délester.

En résumé : l'ETS utilise la différence de température du gaz chaud de l'installation frigorifique, située 100°C et 50°C, pour fournir du froid, lequel permet de sous-refroidir l'installation frigorifique et ainsi de la délester.



le déduit des résultats de mesure disponibles : « Nos mesures à Dietikon et Saint-Gall ont été réalisées pendant le semestre d'hiver. En extrapolant les mesures disponibles à l'ensemble de l'année, nous pouvons en déduire que des économies de 8% sont réalistes. Nous avons même des raisons de penser qu'elles pourraient être légèrement plus élevées ».

### Double utilisation des rejets thermiques

L'ETS est un circuit thermodynamique supplémentaire qui vient compléter les installations frigorifiques au CO<sub>2</sub> existantes. Il se compose essentiellement d'une pompe et d'un éjecteur. L'agent réfrigérant utilisé est le même que celui utilisé dans l'installation frigorifique, à savoir du CO<sub>2</sub>. L'ETS utilise

les rejets thermiques jusqu'à 100 degrés de l'installation frigorifique via un cycle de Rankine pour fournir du froid (voir encadré p.3). Le froid supplémentaire déleste l'installation frigorifique pour une moindre consommation d'électricité et une plus grande efficacité énergétique.

Ainsi, l'ETS constitue une nouvelle possibilité d'utiliser la différence de température des rejets thermiques de l'installation frigorifique. Cependant, comme le souligne Jonas Schöenberger, les rejets thermiques de l'installation frigorifique peuvent également être utilisés pour le chauffage du bâtiment en présence d'un ETS : « Les installations frigorifiques avec ETS contribuent pratiquement dans la même mesure au chauffage des bâtiments que les installations frigorifiques sans ETS. La seule différence réside dans le fait que les rejets thermiques utilisés pour le chauffage des bâtiments sont à une température inférieure, c'est-à-dire à environ 50°C au lieu d'une centaine de degrés. Cette température est largement suffisante pour le chauffage. L'ETS ne réduit pas significativement la puissance de chauffage ni la quantité de chaleur ».

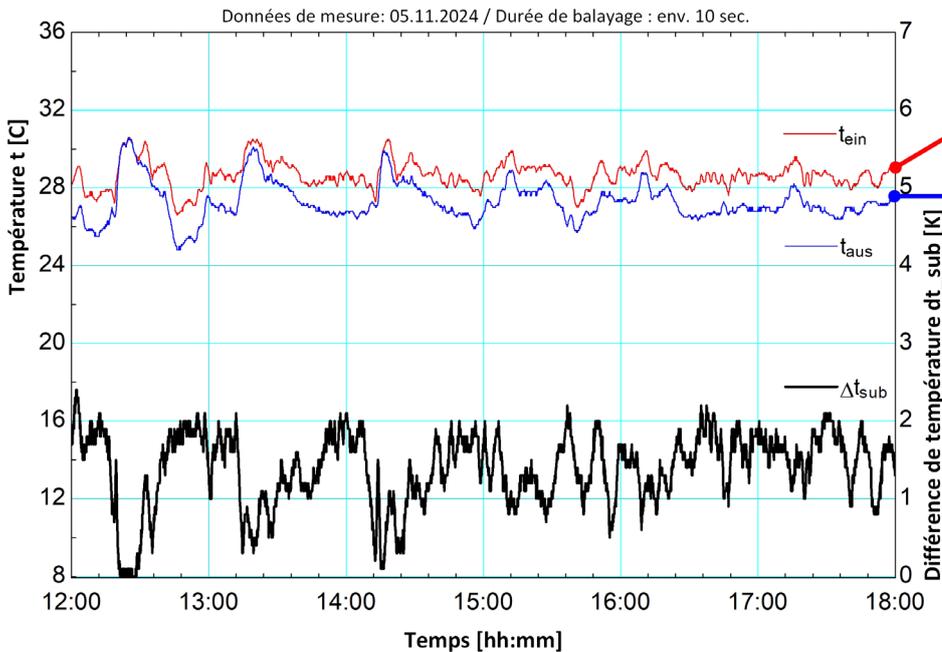
### Conception d'une nouvelle pompe

Le véritable cœur de l'ETS est une pompe qui transporte et comprime le CO<sub>2</sub> dans le processus du cycle de Rankine. Dans

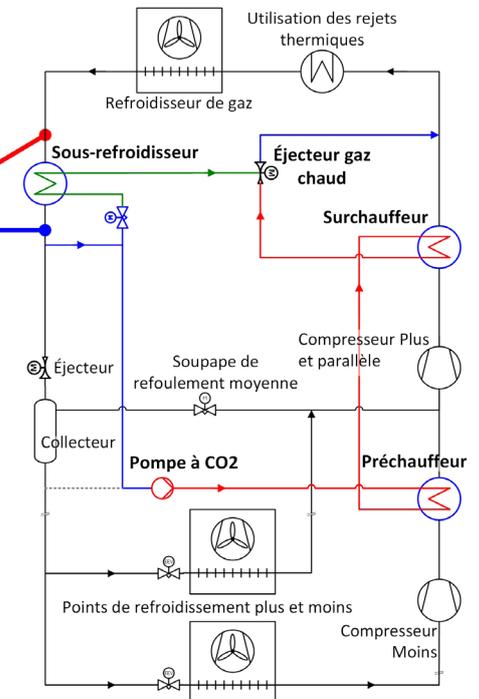


Installation frigorifique au CO<sub>2</sub> avec ETS dans le magasin Prodega de Saint-Gall. L'ETS y est mis en œuvre sous sa forme la plus avancée, à savoir avec une pompe radiale résistante à la pression. L'installation de réfrigération avec ETS a été mise en service en octobre 2024. Elle a une puissance frigorifique de 180 kW (comparable à la puissance frigorifique du magasin Prodega de Dietikon). Photo : Frigo-Consulting AG

ce processus, la pompe augmente en effet la pression dans la phase liquide (tandis que dans le processus de réfrigération traditionnel, un compresseur comprime le CO<sub>2</sub> gazeux).



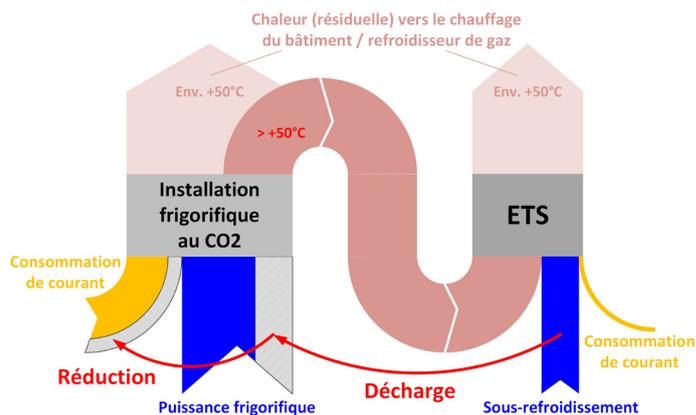
Mesure de 6 heures de l'ETS dans le magasin Prodega de Saint-Gall : le graphique montre la température du CO<sub>2</sub> liquide avant son entrée dans le sous-refroidisseur (rouge) et sa sortie (bleu). Le réfrigérant a été refroidi jusqu'à 2 kelvins dans le sous-refroidisseur (noir). L'extrait des données de mesure prouve en partie que l'efficacité de l'ensemble du système est supérieure de plus de 8%. Graphique : Frigo-Consulting AG



La particularité de cette pompe : elle transporte un débit volumétrique relativement faible, mais doit en contrepartie maîtriser une course de compression élevée. Les pompes présentant cette spécification sont peu répandues sur le marché. Pour l'ETS de Prodega Dietikon, une pompe à piston effectuant une course de compression de 40 à 70 bars a été sélectionnée. Dans la pratique, la forte sollicitation mécanique a rapidement entraîné des fuites et du CO<sub>2</sub> s'est échappé. La pompe à piston de type ouvert a dû être mise hors service et révisée après environ 4'000 heures de fonctionnement.

Malgré cet échec, les premiers essais ont été un succès : avec la pompe à piston, l'équipe du projet a démontré qu'en principe, l'ETS fonctionne dans des conditions d'exploitation réelles. Grâce à cette expérience d'exploitation positive, un fabricant de pompes s'est laissé convaincre de développer une nouvelle pompe robuste répondant aux spécifications souhaitées : il s'agit d'une pompe radiale semi-hermétique, logée dans un boîtier en acier résistant à une pression élevée (130 bars). Cette nouveauté a été utilisée pour la première fois à l'automne 2024 dans l'ETS de l'installation frigorifique du magasin Prodega de Saint-Gall.

Au cours des premiers mois, la pompe a assuré son service avec fiabilité et sans fuites. Grâce à la résistance accrue à la pression de la pompe radiale, celle-ci peut être intégrée de manière légèrement différente dans l'ETS, ce qui permet d'obtenir une course de compression nettement plus faible d'environ 15 bars, ce qui est avantageux du point de vue énergétique. « Grâce à la nouvelle pompe radiale, nous avons pu mettre en œuvre l'ETS comme nous l'avions prévu à l'origine », explique Schöenberger. « Nos premières mesures indiquent qu'avec cette configuration, nous pouvons même dépasser légèrement le gain d'efficacité calculé de 8% ».



Le diagramme Sankey illustre la manière dont l'ETS prend en charge l'installation frigorifique (représentation simplifiée, pas à l'échelle).  
Graphique: Frigo-Consulting AG

### Un délai d'amortissement de cinq à huit ans

Si les expériences d'exploitation de l'installation de Prodega Saint-Gall se confirment à long terme, les installations frigorifiques au CO<sub>2</sub> avec ETS pourraient devenir une nouvelle norme en matière d'efficacité énergétique. Selon les informations de Jonas Schöenberger, une série d'autres installations de réfrigération au CO<sub>2</sub> avec ETS est déjà en cours de planification. Il s'agit d'installations frigorifiques plus volumineuses, avec des puissances frigorifiques de 200 à 300 kW, telles qu'elles sont utilisées, par exemple, dans les grands centres de distribution alimentaire comprenant plusieurs milliers de mètres carrés de surface réfrigérée. Selon Frigo-Consulting, le surcoût de l'ETS sera amorti en cinq à huit ans grâce aux économies réalisées sur les coûts d'électricité. Pour les petites installations, l'ETS ne fonctionne pas encore de manière rentable aujourd'hui, car les coûts d'investissement ne peuvent pas être échelonnés à volonté vers le bas avec les composants et les technologies disponibles aujourd'hui, comme le souligne Schöenberger.

## DES DIFFÉRENCES SAISONNIÈRES

La puissance électrique absorbée par une installation frigorifique dépend entre autres de la température d'abaissement (température extérieure) et de la puissance frigorifique effectivement nécessaire. Plus la température d'abaissement et/ou la puissance frigorifique sont élevées, plus la puissance électrique nécessaire est importante. Par conséquent, une installation frigorifique a théoriquement besoin de plus d'énergie électrique pendant le semestre d'été que pendant le semestre d'hiver. Dans la pratique, pendant le semestre d'hiver, les rejets thermiques de l'installation de réfrigération sont généralement utilisés en totalité pour le chauffage du bâtiment. Ainsi, la température d'abaissement en hiver est comparable à celle de l'été et la puissance électrique absorbée ne dépend « plus que » de la puissance frigorifique. L'ETS est conçu de manière à apporter un bénéfice énergétique aussi bien en été qu'en hiver pendant l'exploitation de la récupération de chaleur.

En additionnant toutes les optimisations techniques, y compris l'ETS, l'efficacité des installations frigorifiques au CO<sub>2</sub> a pu être améliorée d'environ un tiers au cours des deux dernières décennies. Jonas Schönenberger estime qu'il sera difficile de réaliser des gains d'efficacité supplémentaires significatifs du côté de la production de froid. « Aujourd'hui, le potentiel d'économies semble largement épuisé. De nouveaux investissements dans les technologies d'efficacité pourraient être rentables uniquement en cas d'augmentation significative des prix de l'énergie », explique l'expert en installations frigorifiques.

- Des **informations supplémentaires** concernant le projet « Installation frigorifique au CO<sub>2</sub> avec système de transfert d'énergie ETS intégré » sont disponibles sur : <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=50893>. Vous trouverez les précédents projets de l'OFEN sur les innovations en matière d'installations frigorifiques au CO<sub>2</sub> sur <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=33448> et <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=35841>. Un article de vulgarisation scientifique sur l'utilisation des éjecteurs : <pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8924>.
- Men Wirz ([men.wirz@bfe.admin.ch](mailto:men.wirz@bfe.admin.ch)), responsable du programme pilote et de démonstration de l'OFEN, et Stephan Renz ([info@renzconsulting.ch](mailto:info@renzconsulting.ch)), responsable externe du programme de recherche sur les pompes à chaleur et la technique du froid de l'OFEN, communiquent des **informations** à ce sujet.
- Vous trouverez plus d'**articles spécialisés** concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine des pompes à chaleur et le froid sur [www.bfe.admin.ch/ec-pac-froid](http://www.bfe.admin.ch/ec-pac-froid).