

CO2 EN REFRIGERATION

1. INTRODUCTION

Utilisé au XIXème siècle, en particulier pour produire le froid utile à la conservation des poissons sur les navires de pêche, puis remplacé par les fluides fluorés, le CO2 fait valoir ses propriétés thermodynamiques et environnementales en réfrigération et se positionne désormais comme une alternative crédible aux fluides fluorés.

Ses propriétés thermodynamiques remarquables permettent de concevoir des installations à haute efficacité énergétique.

Le CO2 est l'unité de référence en matière de réchauffement avec un GWP (Global Warming Potential) de 1. Son impact sur le réchauffement climatique reste très modéré contrairement aux HFC les plus courants, comme le R404a qui a un GWP de 3260 kg éq CO2 ou le R134a avec un GWP de 1300 kg équivalent CO2. L'utilisation de CO2 à la place de HFC garantit la pérennité réglementaire des installations et son utilisation s'inscrit directement dans une politique de développement durable.

2. UTILISATION DU CO2 EN FRIGOPORTEUR

L'utilisation du CO2 en tant que fluide frigoporteur s'avère comme l'alternative idéale à l'utilisation de l'eau glycolée.

De par ses propriétés uniques, le CO2 distribué par pompe se démarque en de nombreux points de l'eau glycolée.

Performance énergétique :

La faible viscosité du CO2 diminue fortement l'énergie de pompage du fluide. Le CO2 est un fluide pur et donc reste constant en température pendant les changements de phase.

L'utilisation d'échangeur haut rendement sur les postes (meubles frigorifiques, évaporateurs...) permet de diminuer le taux de compression du groupe de liquéfaction.

Dimension des installations réduites:

A puissance égale les conduites CO2 ont un diamètre jusqu'à 3 fois inférieur aux conduites d'eau glycolée.

Exploitation facilitée :

L'intervention sur un circuit CO2 est plus simple et rapide que sur un circuit d'eau glycolée car les opérations de vidange et de remplissage sont écourtées.

CO2 EN REFRIGERATION

Hygiène et sécurité garanties :

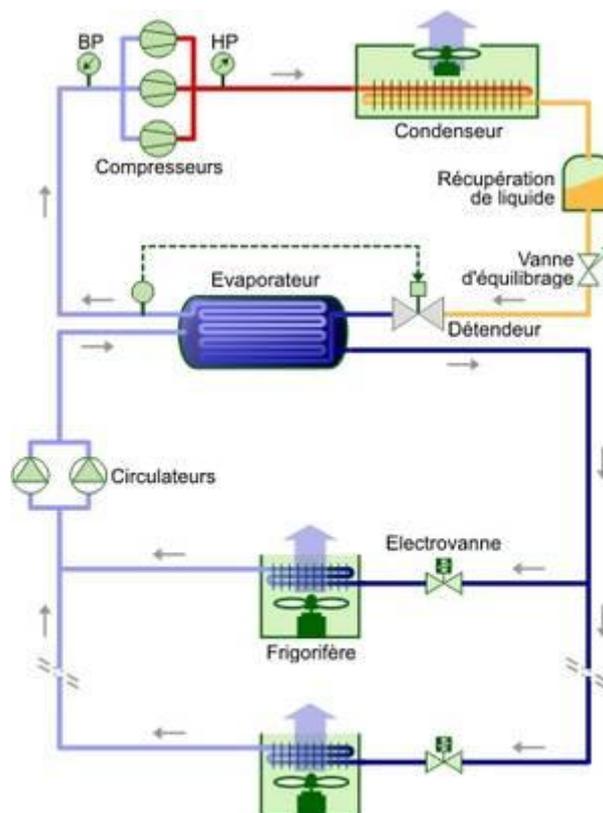
Le CO2 est un fluide non toxique, non inflammable, et de qualité alimentaire : aussi, son contact avec des produits alimentaires ne les rend pas impropres à la consommation.

L'utilisation du CO2 en tant que frigoroporteur concurrence également les installations fonctionnant en détente directe. Malgré la consommation énergétique légèrement supérieure, différents avantages sont à noter :

- **Le confinement du fluide frigorigène assurant la liquéfaction** : réduction notable de la charge et meilleur contrôle des fuites éventuelles.

- **L'utilisation de fluides performants et/ou écologique** : un certain nombre de fluide ne peuvent pas être utilisés en détente directe pour des raisons techniques ou réglementaires. Le confinement du fluide en salle des machines ouvre la porte à leur utilisation.

L'utilisation du CO2 comme fluide frigoroporteur est adaptée à une multitude d'applications (Agro alimentaire, GMS, Logistique, Industrie,...) sur une gamme de température très large de -30°C à $+10^{\circ}\text{C}$.



CO2 EN REFRIGERATION

Récapitulatif :

- Un frigoporteur qui revient en mélange vapeur liquide vers un réservoir dans lequel on récupère la phase liquide.
- Les pompes aspirent dans ce réservoir.
- La phase vapeur va vers l'entrée de l'évaporateur de fluide primaire du type à plaques ou tubulaire où elle se condense.
- Le liquide condensé descend par gravité dans le réservoir.

Les avantages :

- Pas de compresseurs au CO2
- Systèmes simples, adapté aux basses températures
- Tuyauteries de petits diamètres

	R404A	Dow J	CO2
Ligne liquide (aller)	 $\phi = 35 \text{ mm}$	 $\phi = 83,5 \text{ mm}$	 $\phi = 14,1 \text{ mm}$
Ligne retour	 $\phi = 80 \text{ mm}$	 $\phi = 83,5 \text{ mm}$	 $\phi = 32,3 \text{ mm}$

Dimension des tubes pour passer 50 kW à -35°C

Les inconvénients :

- Sous-refroidissement nécessaire pour éviter la cavitation de la pompe
- PS élevée (12 bar à -35°C)
- Montée en pression durant périodes d'arrêts

CO2 EN REFRIGERATION

3. UTILISATION DU CO2 EN FRIGORIGENE

La mise en œuvre du CO2 avec un deuxième fluide est particulièrement adaptée aux applications où les produits doivent être refroidis ou conservés à des températures inférieures à -30°C. Le CO2 peut permettre de refroidir des produits ou l'air d'un local industriel jusqu'à -50°C.

Solution cascade ou hybride

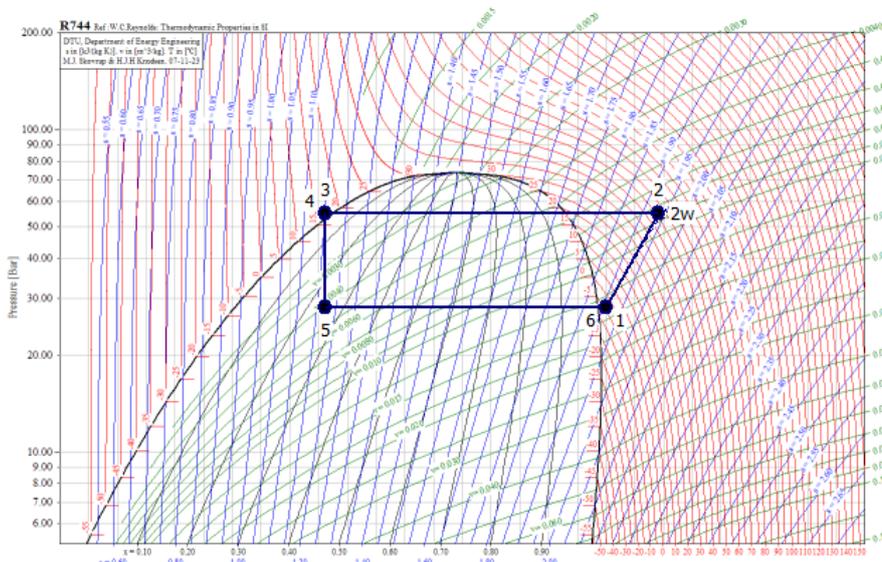
- Le CO2 est utilisé en basse température.
- Il y a un étage HP avec un autre fluide primaire.

La distribution peut être en détente directe ou en recirculation par pompe (≥ 150 kW)

1. LES SYSTEMES DITS « SUBCRITIQUES »

A. Subcritique monoétagé

Les conditions de fonctionnement et la technique de production frigorifique reste identique à celle utilisée avec les autres fluides. Cela reste exceptionnel d'obtenir ces conditions sans utiliser un médium de refroidissement complémentaire. Sinon, le fonctionnement sera toujours transcritique.



CO2 EN REFRIGERATION

B. Cycles de compression « en cascade » :

Cela permet de faire fonctionner chacun des compresseurs sous des taux de compression raisonnables pour obtenir une efficacité énergétique optimale.

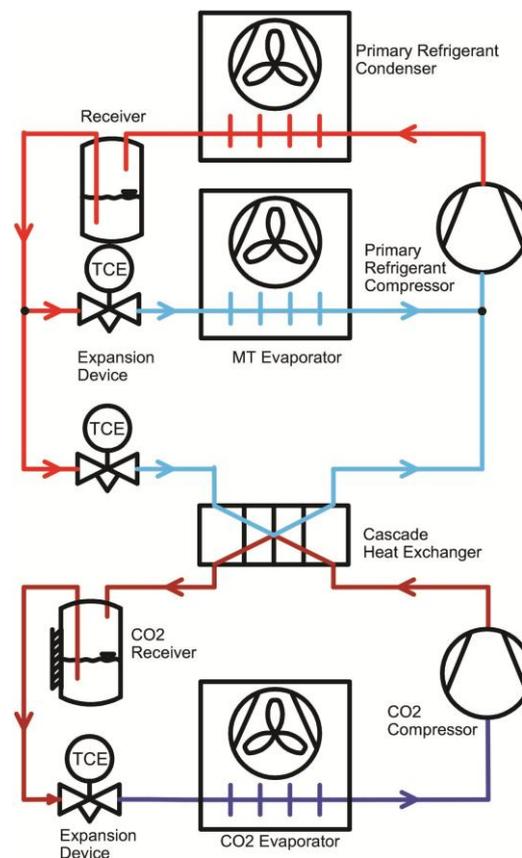
Hygiène et sécurité garanties : le CO2 est un fluide non toxique, non inflammable, et de qualité alimentaire : aussi, son contact avec des produits alimentaires ne les rend pas impropres à la consommation.

Diminution des coûts d'installation du fait de ses propriétés thermo-physiques et thermodynamiques, le débit de CO2 est plus faible et le compresseur à installer est de taille réduite par rapport à un fluide frigorigène de type HFC.

Sécurité et protection de l'environnement : la quantité de fluide frigorigène de type HFC est limitée à l'étage haute pression de la cascade.

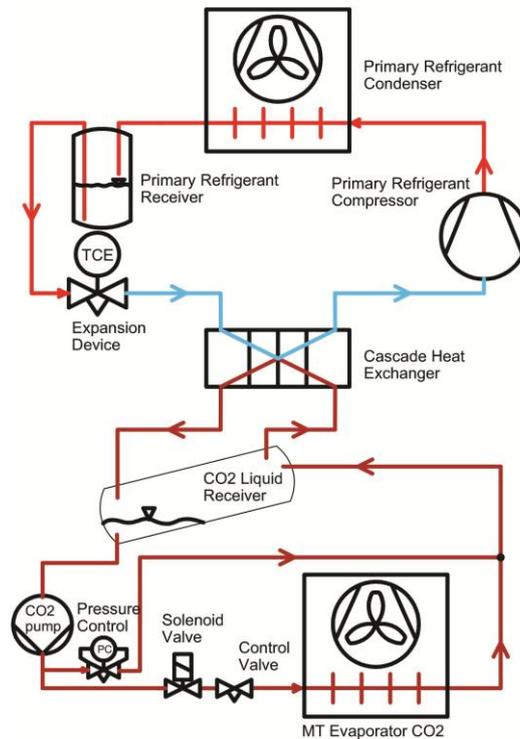
L'utilisation du CO2 en cascade sur le froid négatif tend désormais à s'imposer comme un standard en Agro-alimentaire, en GMS (Grand et Moyen Supermarché) et en logistique.

CASCADE DETENTE DIRECTE

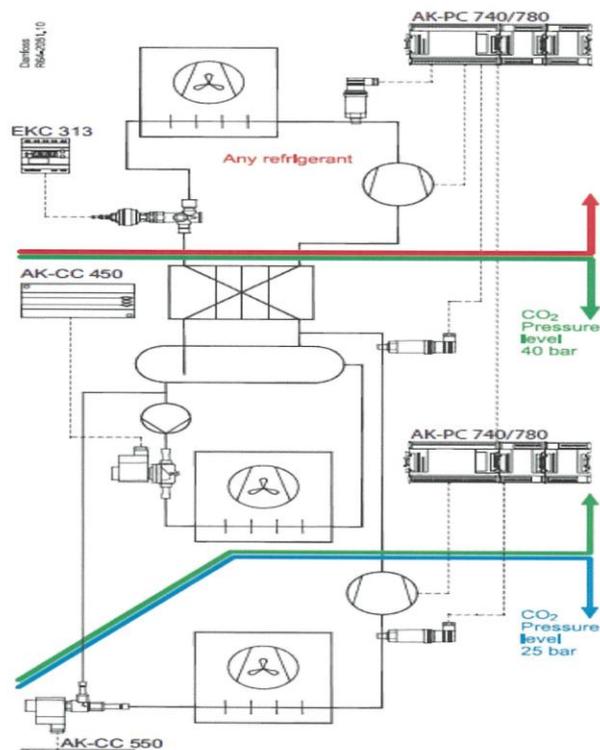


CO2 EN REFRIGERATION

CASCADE BT (ou hybride) PAR POMPE



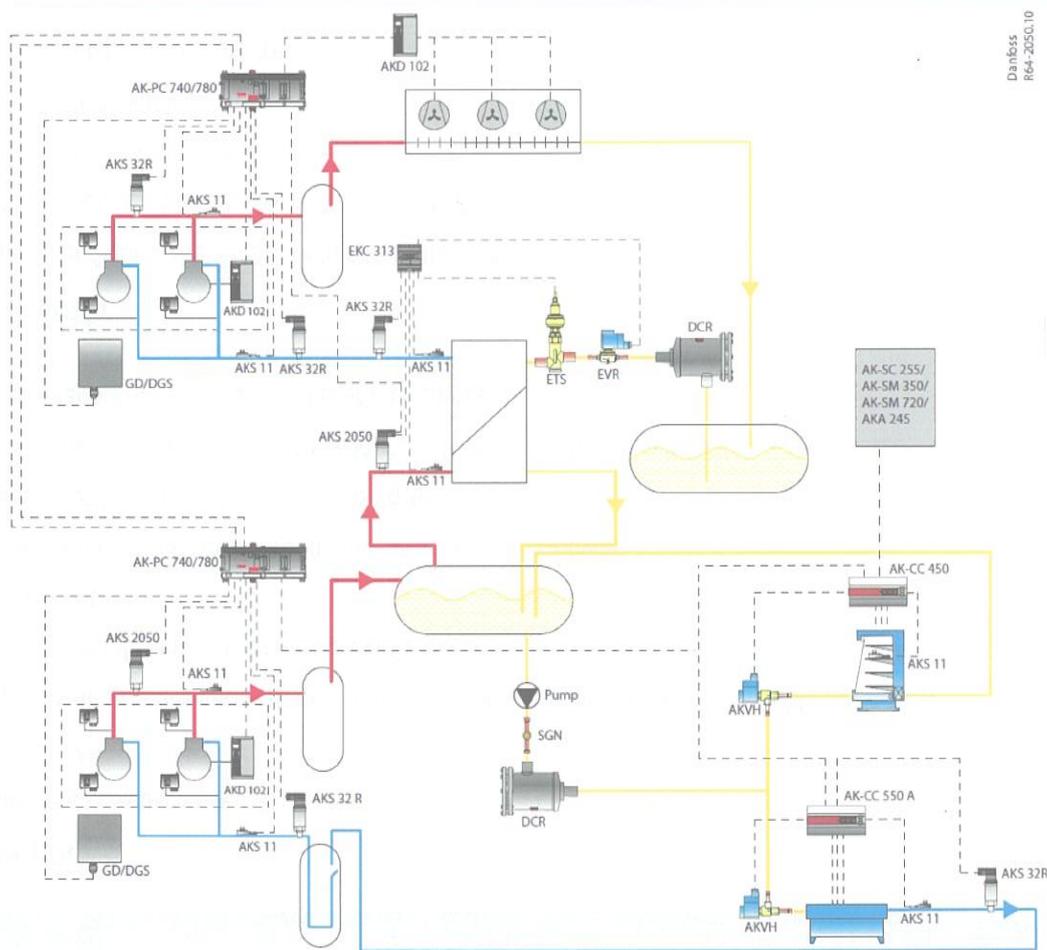
CASCADE CO2 DETENTE DIRECTE SUR NEGATIF ET POMPE SUR POSITIF



CO2 EN REFRIGERATION

La solution idéale pour des besoins en basse pression et moyenne pression simultanées.

CASCADE CO2 ET POMPE SUR NEGATIF ET POSITIF



Une attention particulière sera portée sur le sous refroidissement du liquide. Le CO2 condensé liquide en système cascade doit être à l'état de saturation entre 0°C et -10°C.

Il faut donc être attentif à la vaporisation dans cette même ligne liquide.

Il faut sous refroidir le liquide surtout dans le cas d'alimentation directe des postes de froid (détente directe) avec soit en utilisant un échangeur liquide vapeur ou un sous refroidisseur.

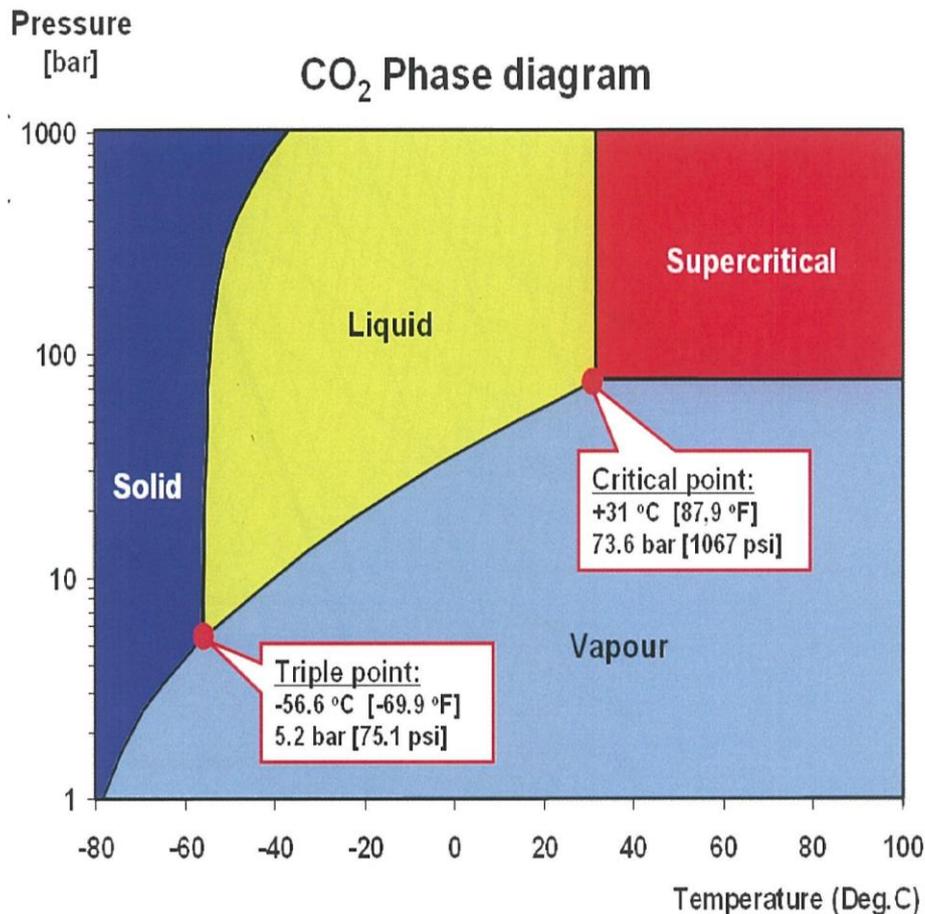
Certains constructeurs de compresseur préconisent une surchauffe à l'aspiration allant jusqu'à 20°C. Il faut aussi pour une bonne lubrification une huile à une température minimale de 30°C et une température de refoulement de dépassant pas 50°C.

CO2 EN REFRIGERATION

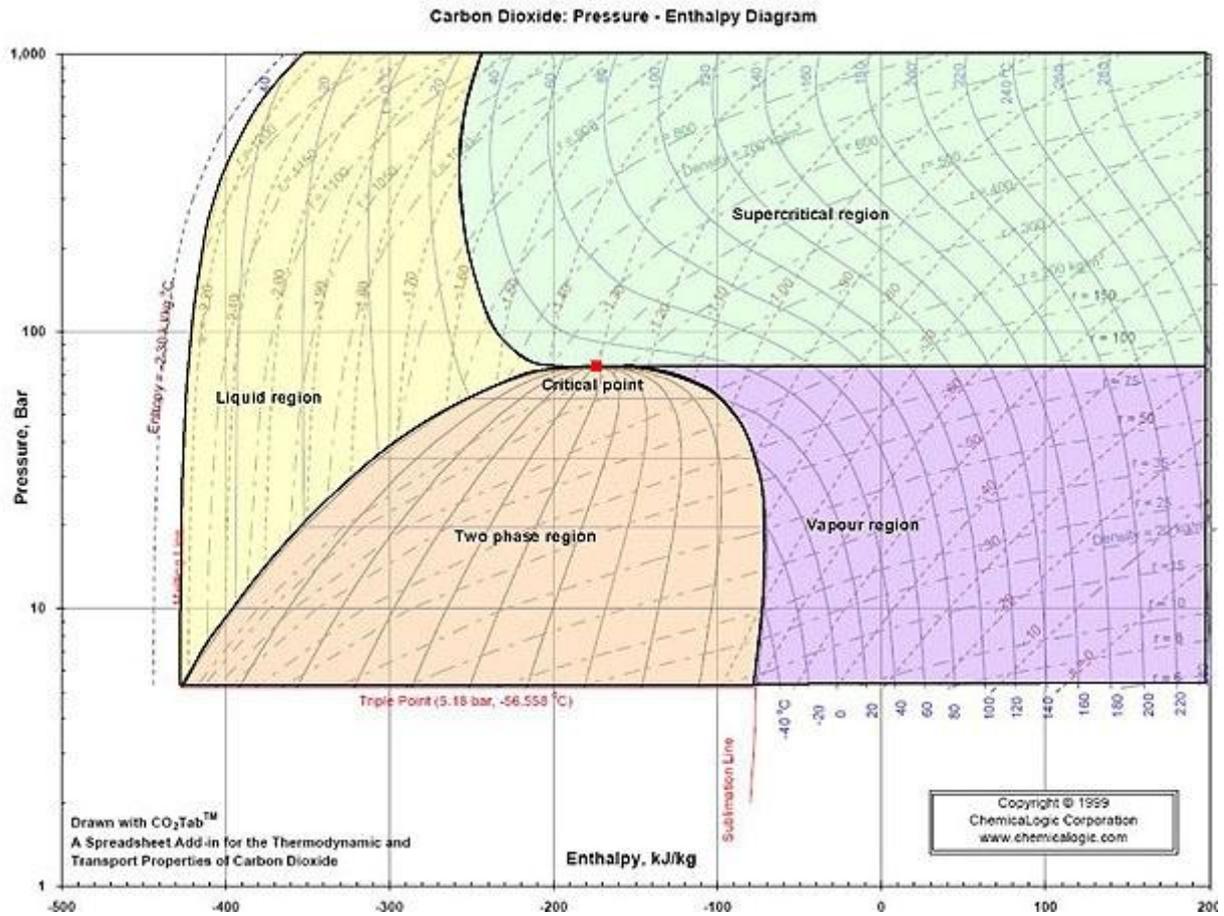
2. LES SYSTEMES DITS « TRANSCRITIQUES » UTILISENT LE CO2 COMME UNIQUE FLUIDE FRIGORIGENE.

Tout corps pur possède un point critique correspondant à une pression et une température donnée. Lorsque le corps pur est soumis à une pression et une température supérieures à celles de son point critique, ce corps pur est en phase dite "**supercritique**".

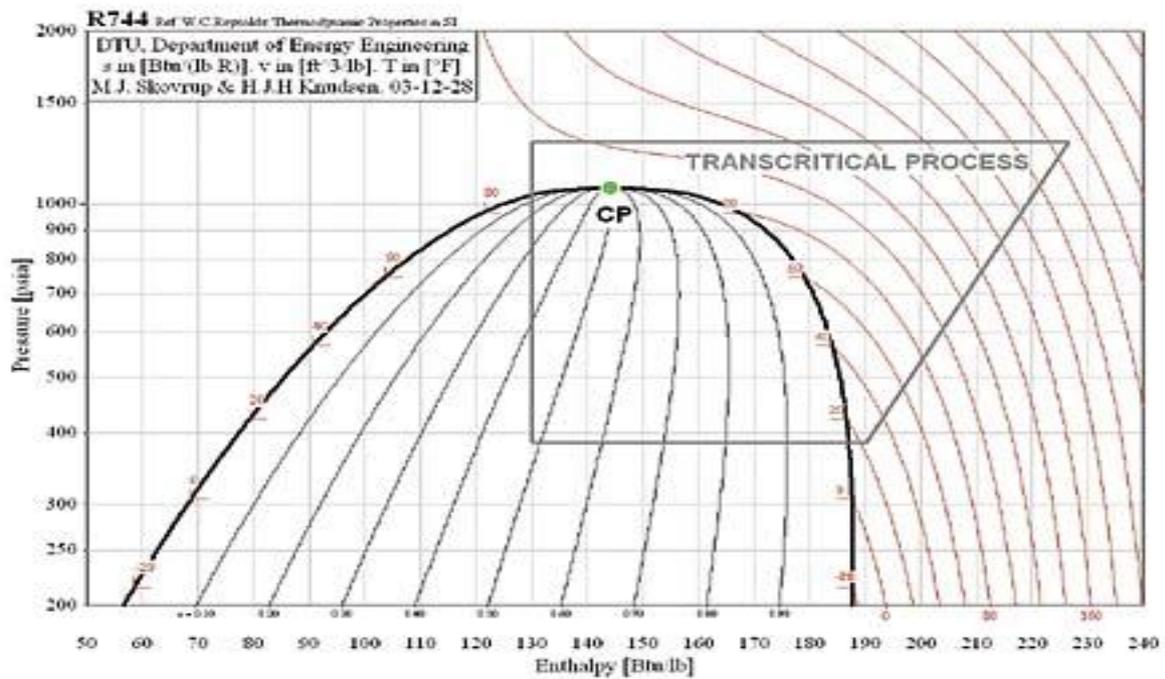
Il présente alors un comportement intermédiaire entre l'état liquide et l'état gazeux, avec des propriétés particulières : une masse volumique élevée comme celle des liquides, un coefficient de diffusivité intermédiaire entre celui des liquides et des gaz, et une faible viscosité (comme celles des gaz).



CO2 EN REFRIGERATION



A. TRANSCRITIQUE MONOETAGE



CO2 EN REFRIGERATION

Cette technologie innovante développée notamment en Europe du nord, est particulièrement adaptée aux installations de réfrigération de la distribution (commerces, supermarchés). Avec des coûts d'exploitation équivalents aux installations HFC en détente directe, l'atout majeur de la solution est la suppression complète des fluides à fort impact sur le réchauffement planétaire.

SPECIFICITES DU CYCLE TRANSCRITIQUE

Pas de bouteille Haute Pression

- Accumulateur en sortie d'évaporateur

Utilisation d'un détendeur électronique

- Pas de réglage de température mais de haute pression et de volume balayé

Matériels spécifiques (échangeurs micro-canaux)

- Masse volumique & pression supérieur → **micro-canaux**
- Ø Intérieur des canaux < 1mm
- **Surface d'échange (air) optimisée**

Givrage rapide de l'évaporateur

Avantages :

- **Chaleur de vaporisation élevée (sauf NH3) :** débits massiques faibles
- **Faible volume massique vapeur :** volumes aspirés plus faibles (10 fois plus faible que R-404A à -35°C)
- **Production frigorifique volumique élevée (5 à 7 fois supérieure à l'ammoniac):** les tuyauteries et les compresseurs sont donc nettement plus compacts.
- **Taux de compression faible:** meilleur rendement des compresseurs.
- **Les puissances absorbées sont en général inférieures.**
- **Viscosité faible:** pertes de charge limitées.
- **Plage de température : -55°C à +120°C**
- **Récupération de chaleur à des niveaux élevés de température**
- **Applications étendues :** froid industriel, commercial jusqu'à la pompe à chaleur
- **Performances systèmes :** les compresseurs et les canalisations (surtout coté vapeur) sont largement réduits.
- **Très faibles charges en fluide frigorigène.**

Non soumis aux incertitudes sur l'évolution des règlements européens ou internationaux
Gaz inerte: choix plus large concernant les matériaux métalliques (formation acide carbonique en présence d'eau).

Classement A1 : Ininflammable et non explosif (agent extincteur).

Non toxique en faible concentration (risque d'anoxie comme avec les HFC en ambiance confinée).

Potentiel de réchauffement faible: (GWP =1) respect de l'environnement ODP = 0.

Peu cher: beaucoup moins cher que les HFC/HFO et moins cher que l'ammoniac.

Alimentaire : déjà utilisé sous forme de neige carbonique pour congélation et conservation directes.

Permet certaines aides financières (applications PAC).

CO2 EN REFRIGERATION

Inconvénients :

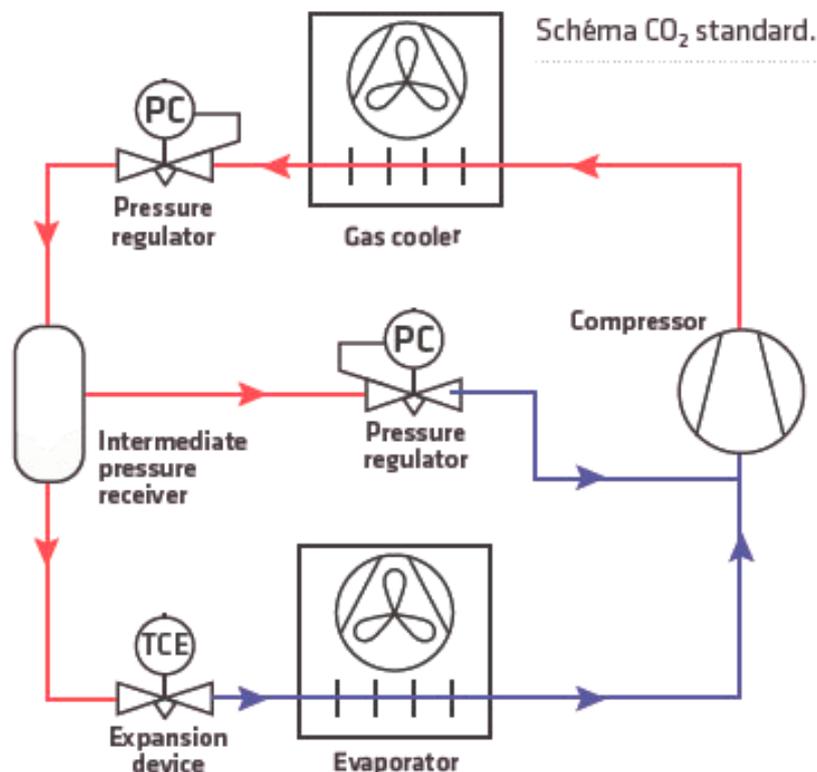
- **Température critique de 31°C:** Cycles TC de faible rendement à priori.
- **Pression de conception élevée:** HP=120 bar ; 12 bar à -35°C ; 25 bar à -12°C : composants adaptés.
- **Montée en pression pendant les périodes d'arrêt:** dispositif spécifique.
- **Détection du CO2:** Le CO2 n'a ni couleur ni odeur, il faut donc un dispositif de détection approprié dans les espaces confinés pour éviter les accidents.
- **Eviter la présence d'eau dans le circuit sous peine de corrosion** (acide carbonique).
- **Performances dégradées dans les zones chaudes.**

TECHNIQUES ET PRINCIPES CONSTRUCTIFS EN TRANSCRITIQUE

EN SYSTEME MONO-UTILISATION

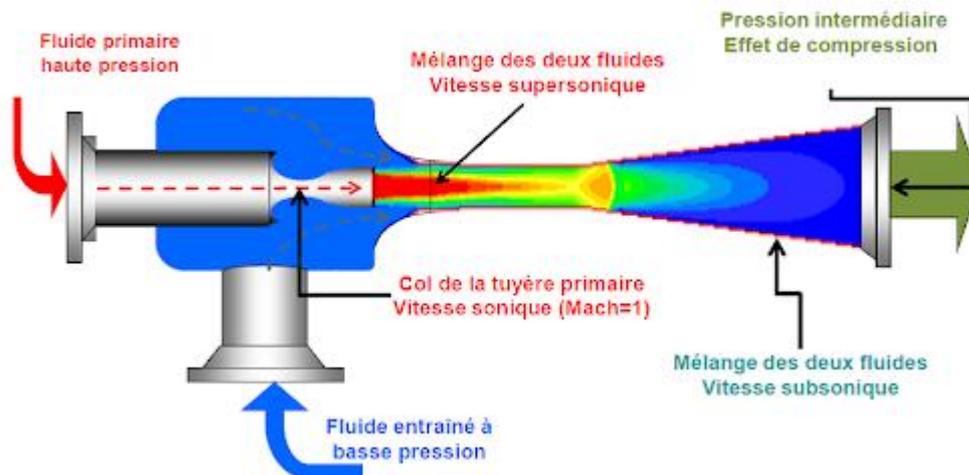
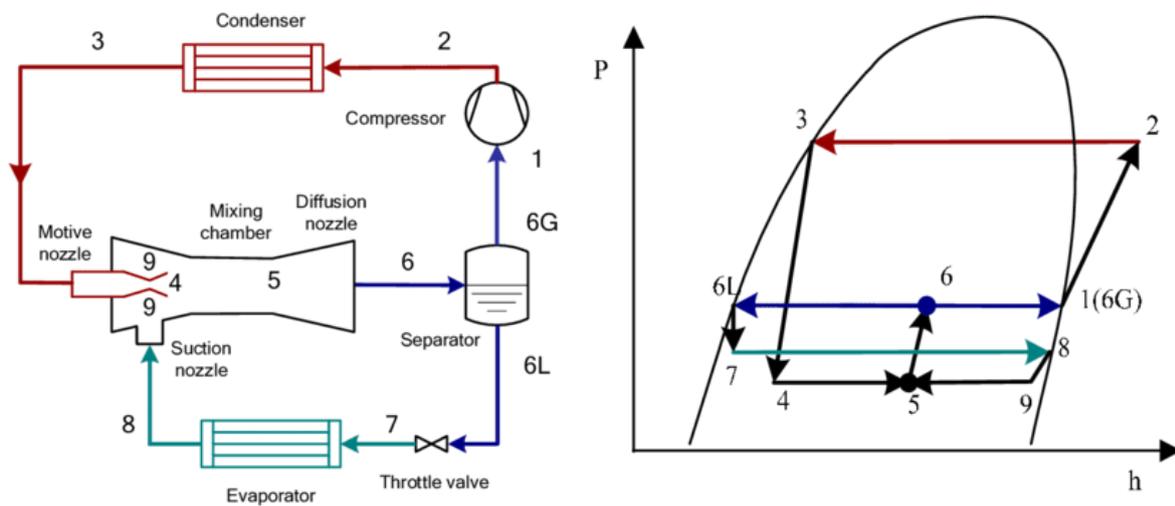
- ✓ Système mono-étagé avec évaporateur sur air et refroidisseur de gaz sur air,
- ✓ Développement en bi-étagé pour améliorer la performance ou applications négatives,
- ✓ Développement avec éjecteur au lieu de détendeur pour améliorer les performances.

A. Cycle standard



CO2 EN REFRIGERATION

B. Cycle avec éjecteur



C. Cycle avec éjecteur et échangeur

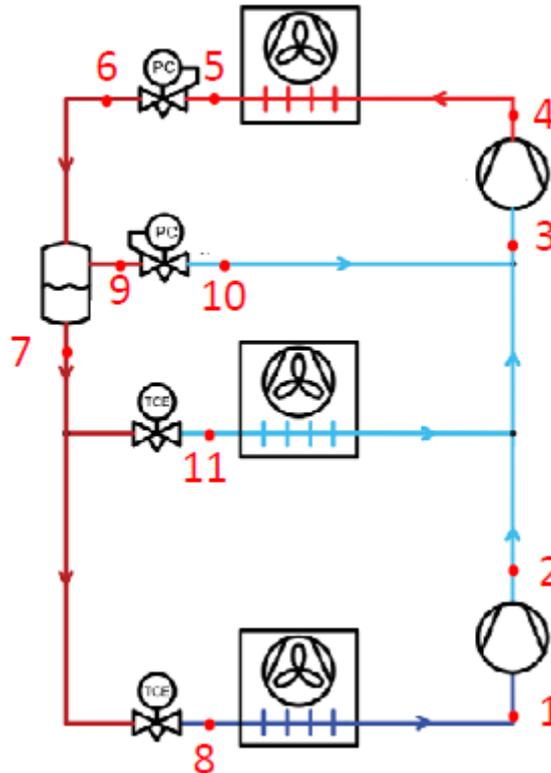
EN SYSTEME MULTIPOSTE GMS

- ✓ Combiné avec CO2 négatif en détente directe,
- ✓ Booster,
- ✓ Avec évaporateurs refroidisseurs d'air et refroidisseur de gaz sur air avec option refroidissement adiabatique,
- ✓ Avec éjecteur,
- ✓ Utilisation du compresseur dédié pour comprimer séparément le gaz de la détente (compression parallèle),
- ✓ Mise en place de sous refroidisseur de gaz,
- ✓ Avec éjecteur « dopant » et compresseur parallèle.

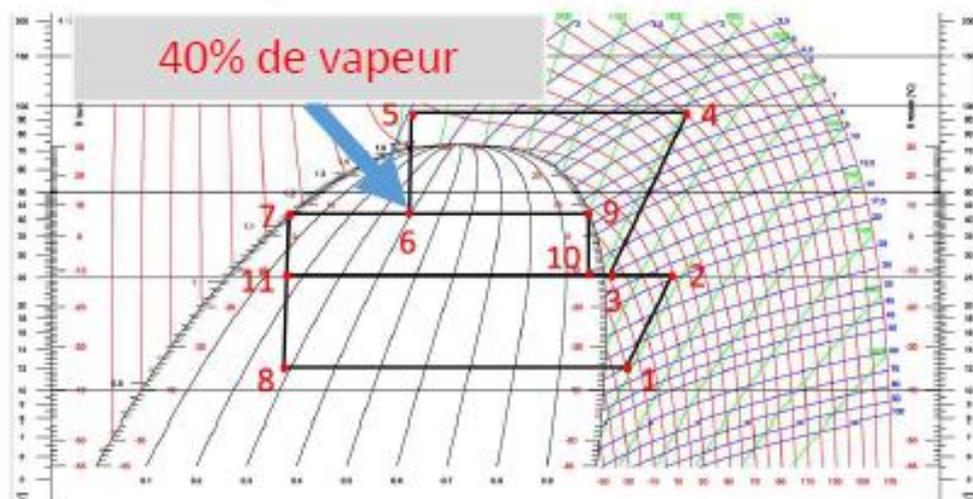
CO2 EN REFRIGERATION

3. TRANSCRITIQUE BIETAGE

A. SYSTEME BOOSTER CO2 STANDARD



▪ Température extérieure de 35°C

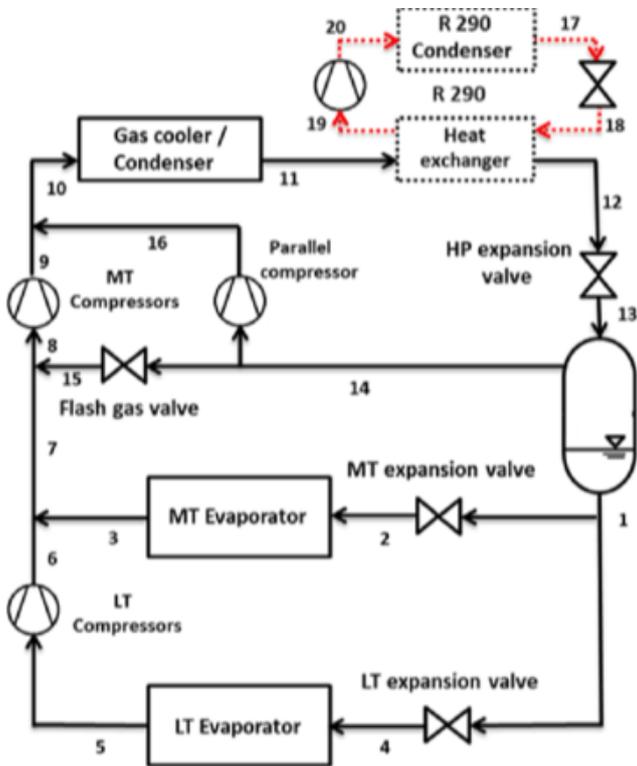


La performance de la machine est réduite par la détente de la vanne haute pression. Les vapeurs produites en sortie de cette vanne sont détendues avant d'être comprimées sans effet frigorifique. Il existe une haute pression optimale intégrant les paramètres température et pression au refoulement. La régulation sera un compromis entre une pression élevée et une augmentation de la puissance absorbée.

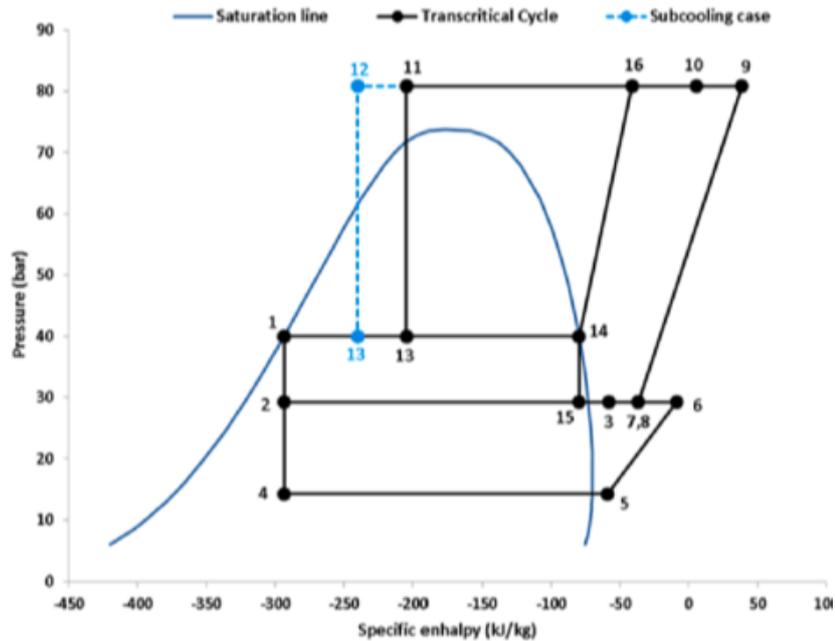
Les performances vont baissées avec une température d'air extérieure élevée.

CO2 EN REFRIGERATION

B. SYSTEME BOOSTER AVEC COMPRESSION PARALLELE



(a)



(b)

Le sous refroidissement du gaz sortant du gaz-cooler et la compression parallèle augmente nettement l'efficacité de la production frigorifique.

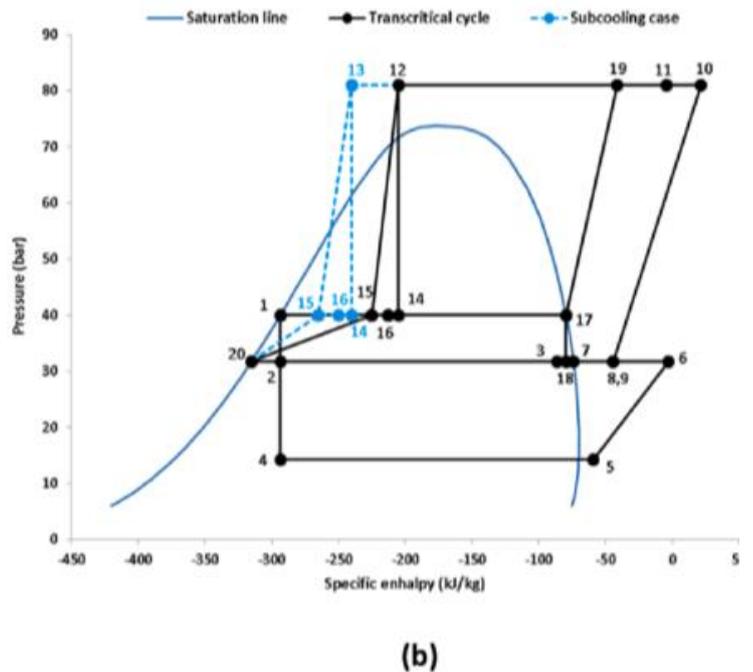
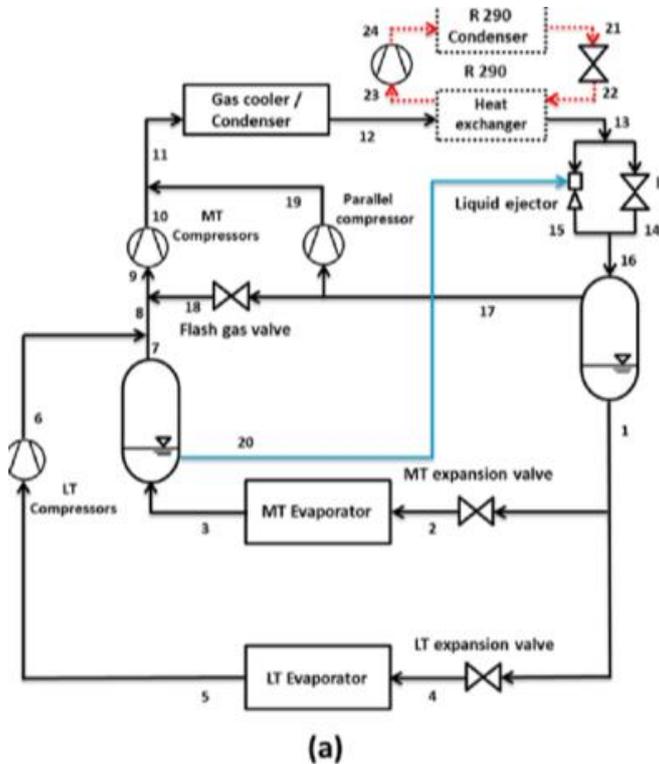
Capacité de réfrigération supplémentaire (« compresseur supplémentaire »)

Cette fonction accroît la capacité de réfrigération d'un système en augmentant la pression dans le refroidisseur de gaz. La fonction est activée quand la puissance du compresseur a atteint 100 % pendant 5 minutes. La performance de refroidissement atteint $Q_0 + dh_0$.

La fonction augmente également la charge sur le moteur du compresseur à mesure que la pression s'accroît. La consommation d'énergie atteint $Q_m + dQ_m$.

CO2 EN REFRIGERATION

C. SYSTEME BOOSTER AVEC COMPRESSION PARALLELE ET EJECTEURS



Remarque :

Sous l'effet venturi un fluide à une pression inférieure.

5. PROPOSITIONS AFIN D'EVITER L'AUGMENTATION DE LA PRESSION CO2

- Vanne de décharge (25 bar = pression maxi avec échangeurs traditionnels) : Recharges régulières,
- Volume de stockage CO2 vapeur → très gros volume,
- Refroidisseur auxiliaire (périodes d'arrêts) → consommation supplémentaire.

CO2 EN REFRIGERATION

6. UTILISATION DE LA DESURCHAUFFE

Récupérer de la chaleur sur refoulement CO2 en cascade, biétagé ou froid transcritique :

- réduire le rejet sur le positif,
- diminuer les besoins de condensation,
- réduire la température d'entrée des gaz refoulés,
- améliorer les performances du condenseur en réduisant la zone de désurchauffe.

Récupérer cette chaleur pour :

- chauffage de locaux
- chauffage de sol
- chauffage ou préchauffage d'eau sanitaire
- disposer d'eau de process, lavage...

Les conditions de récupération sont idéales :

- le niveau de température est élevé (+ 130 °C en été à + 60°C en hiver),
- la quantité de chaleur représente entre 10 et 60% de la chaleur rejetée à l'atmosphère.