

Certificats d'économies d'énergie

Fiche de calcul - Opération n° BAT-EQ-117

Installation frigorifique utilisant du CO₂ subcritique ou transcritique

A- SECTEUR D'APPLICATION

Bâtiments tertiaires existants : locaux de distribution alimentaire, destinés à l'exposition ou la mise en libre-service à l'intention du public, de produits frais tels qu'hypermarchés, supermarchés, petits magasins alimentaires, plateformes ou points de retrait permettant au public de récupérer ses produits sans accéder aux rayons (magasin de type « Drive ») et entrepôts frigorifiques.

B- DENOMINATION

Remplacement d'une installation existante utilisant du R404a en circuit primaire ou dans toute l'installation, par une installation frigorifique utilisant le CO₂ comme fluide en cycle transcritique ou subcritique (cascade ou frigoporteur) vers les terminaux (meubles frigorifiques, évaporateurs chambres froides, ...) diffusant le froid pour une application positive, négative, ou les deux.

Dans une installation au CO₂ frigoporteur subcritique, la condensation se produit en fluide frigoporteur diphasique dont les vapeurs sont recondensées par un fluide primaire de « synthèse » ou de l'ammoniac, pour une production de froid à température positive.

Dans une installation au CO₂ subcritique en cascade, la condensation se produit en cascade sur une centrale de production utilisant un fluide primaire de « synthèse » ou de l'ammoniac pour une production de froid à température négative.

Dans une installation au CO₂ transcritique, la condensation se produit en détente directe utilisant du CO₂ comme fluide frigorigène en cycle transcritique.

C- CONDITIONS POUR LA DELIVRANCE DE CERTIFICATS

La mise en place est réalisée par un professionnel.

Installation CO₂ frigoporteur :

La preuve de la réalisation de l'opération mentionne la mise en place d'une production CO₂ frigoporteur fonctionnant sur une production de froid à température positive, ainsi que la puissance frigorifique positive P⁺ installée. Elle est complétée par une fiche d'intervention faisant apparaître l'extraction du fluide frigorigène R404a, fournie par un opérateur attesté et accrédité par le Comité français d'accréditation (COFRAC) ou par tout autre organisme d'accréditation signataire de l'accord de reconnaissance multilatéral établi par la coordination européenne des organismes d'accréditation.

Installation CO₂ subcritique en cascade :

La preuve de la réalisation de l'opération mentionne la mise en place d'une production CO₂ subcritique à compression fonctionnant en cascade sur une production de froid à température négative ainsi que la puissance frigorifique négative P⁻ installée. Elle est complétée par une fiche d'intervention faisant apparaître l'extraction du fluide frigorigène R404a, fournie par un opérateur attesté et accrédité par le Comité français d'accréditation (COFRAC) ou par tout autre organisme d'accréditation signataire de l'accord de reconnaissance multilatéral établi par la coordination européenne des organismes d'accréditation.

Les deux solutions précédentes peuvent être mises en œuvre conjointement : CO₂ frigorigène en cascade pour la production de froid à température négative et frigoporteur pour la production de froid à température positive. Dans ce cas, la preuve de la réalisation de l'opération mentionne à la fois la mise en place d'une production CO₂ subcritique fonctionnant en cascade sur la production de froid à température négative et la mise en place d'une production CO₂ frigoporteur pour la production de froid à température positive ainsi que, pour chaque cas, les puissances frigorifiques correspondantes.

Installation CO₂ transcritique :

La preuve de la réalisation de l'opération mentionne :

- la mise en place d'une installation au CO₂ transcritique répondant aux besoins en froid positif et négatif équipée soit d'une compression parallèle seulement, soit d'une compression parallèle et d'un éjecteur ;
- les puissances frigorifiques positive P⁺ et négative P⁻ installées.

À défaut et pour chaque type d'installation, la preuve de la réalisation de l'opération mentionne la mise en place d'un équipement avec ses marque et référence et elle est complétée par un document issu du fabricant indiquant que l'équipement de marque et référence installé est un des systèmes listés ci-dessus. Ce document indique les puissances frigorifiques positive et négative des équipements installés.

D- DETAILS DES GISEMENTS ESTIMES

L'impulsion donnée par la réglementation F-gas, restreignant l'usage des gaz au fort potentiel de réchauffement global, a permis le fort développement des installations en cascade sur du froid négatif à partir de 2010. Les systèmes en CO₂ frigoporteur en positif et transcritique ont commencé à se développer plus tardivement.

Le gisement dans le secteur des GMS est le suivant :

Nombre d'hypermarchés en France : 1880

Nombre de supermarchés en France : 5591

Source : Panorama tradedimensions 2012 (guide de la distribution)

On compte deux installations frigorifiques par hypermarché et une installation par supermarché. Au total, le parc contient donc 9 351 installations.

A ce jour, le nombre d'installations utilisant le CO₂ (toutes technologies confondues) est de 300 dont 80 installations utilisant le CO₂ transcritique. Le reste est réparti avec environ 10% pour le CO₂ frigoporteur et 90% pour le CO₂ en cascade¹.

Soit :

- 198 installations CO₂ subcritique en cascade
- 22 installations CO₂ frigoporteur
- 80 installations CO₂ transcritique

4% des installations du parc utilisent donc la technologie CO₂.

E- REGLEMENTATION EN VIGUEUR OU PREVUE

Depuis le 01/01/2015, le nouveau règlement Européen F-Gas est entré en vigueur. Il encadre l'utilisation des fluides fluorés, ainsi que la diminution progressive de 79% de leur utilisation de 2017 à 2030 avec des non disponibilité de HFC R404A ou R507 vierge à partir de 2020.

¹ Source Perifem et Paul Rivet.

A partir de 2020, les systèmes neufs avec PRP > 2500 seront interdits ainsi que la maintenance avec fluide vierge PRP > 2500 SAUF systèmes <40 Téqu CO₂ (= 10kg pour R404A).

En 2022, les installations neuves PRP > 150 en **GMS** pour les systèmes de plus de 40 kW frigorifique seront interdites SAUF PRP < 1500 si utilisation en fluide primaire en cascade.

Les installations avec un PRP > 150 sur meubles autonomes seront interdites aussi.

En 2030, Interdiction des PRP > 2500 pour la maintenance sur les systèmes supérieurs à 40 Téqu CO₂.

A ces incertitudes, s'ajoute une révision en cours de la norme européenne EN 378 qui sert à limiter le taux de concentration des fluides frigorigènes dans les systèmes de réfrigération et de pompes à chaleur.

F- SITUATION DE REFERENCE

CO2 frigoporteur pour le froid positif :

La référence est une installation à détente direct R404A avec eau glycolée

Un gain de pompage et de compression sera calculé par rapport à une référence qui est de l'eau glycolée. Cette solution résout le handicap de la surconsommation électrique.

CO2 subcritique en cascade pour le froid négatif :

La référence est une installation au R404 en un seul étage de compression.

La mise à disposition de compresseurs CO2 moyenne pression (40 bar) à partir de 2000 a permis de réaliser le circuit négatif en CO2 frigorigène en cascade sur le positif. Le niveau de la cascade est situé entre 0 et -10°C.

CO2 en transcritique :

Dès lors que le CO2 était employé en frigorigène cascade pour les postes négatifs et en frigoporteur pour les postes positifs, il restait toujours la nécessité d'un fluide primaire et la question cruciale de son choix. L'apparition de compresseurs CO2 haute pression vers 2005 (120 à 130 bar) a permis la compression. Le refroidissement des postes négatifs se fait avec du CO2 frigorigène comprimé à l'étage intermédiaire ; les vapeurs refoulées par compresseurs BP se mélangent avec les vapeurs provenant des postes positifs. Le système est donc de type booster avec l'étage haute pression fonctionnant en période chaude en transcritique (lorsque l'air ambiant, généralement utilisé pour évacuer la chaleur de compression, atteint +25°C environ).

Le système de référence est l'installation HFC avec séparation du froid positif et négatif, c'est la configuration actuelle du parc.

G- DUREE DE VIE CONVENTIONNELLE

Les retours d'expérience des constructeurs témoignent d'une durée de vie des groupes frigorifiques de 15 ans minimum (voir annexe), soit un taux d'actualisation à 4% de 11,563.

H- GAIN ANNUEL EN ENERGIE FINALE GENERE PAR L'OPERATION

Les caractéristiques des puissances frigorifiques installées dans les magasins sont issues des résultats de l'étude AFF/EDF/ADEME/PERIFEM DE 1999-2000 :

Bilan frigorifique : installation frigoporteur R404A avec eau glycolée

Magasin Hypermarché type 10 000m² ayant une installation frigorifique fonctionnant au R404A en détente direct consomme 1,68 GWh/an (l'installation tourne 16h/jour).

Cette technique n'est pas utilisée en supermarché car elle est relativement coûteuse.

Puissance frigorifique **positive** : 576,4 kW (chambres froides comprises)

Consommation annuelle du système frigorifique indirect à eau glycolée :

-Pompes de circulation :

26.3kW x 365J x 24h = **0,23 GWh/an**

-Centrale de compression au R404A :

COP = 2 à -6°C et 1,56 à -14°C (diminution de 3% du COP par °C diminué)
Soit **2,16 GWh /an**

Total **2,39 GWh/an**

Bilan frigorifique : installation moyenne pour une cascade au R404 :

Magasin Hypermarché type 10 000m²

-Puissance frigorifique **négative** 83 kW (chambre froide comprise)

-COP =1

-Consommation annuelle pour environ 6000h de fonctionnement (soit 16h/jour) :

0,5 GWh

Magasin Supermarché type 1500m²

-Puissance frigorifique **négative** 20kW (chambre froide comprise)

-COP =1

-Consommation annuelle pour environ 6000h de fonctionnement (soit 16h /jour) :

0,12 GWh

Le CO2 transcritique répond aux besoins du froid positif et négatif en même temps. Les consommations respectives sont donc les mêmes que celles données précédemment.

Les comparaisons entre les installations au CO2 et les situations décrites ci-dessus donnent :

Fluide frigoporteur pour le froid positif :

L'apparition du CO2 frigoporteur diphasique liquide/vapeur présente deux avantages en pompage et en compression :

Comparaison installation R404/eau glycolée et R404/CO2 :

Pompage :

Réduction importante des débits de frigoporteur grâce à la chaleur latente d'évaporation : 255 kJ.kg⁻¹ à -8°C alors que la chaleur latente pour un frigoporteur monophasique tel que l'eau glycolée est de 14kJ.kg⁻¹. Le débit est globalement divisé par au moins 10 en prenant en compte un coefficient de recirculation pour le système CO2.

La formule de calcul de la puissance absorbée de pompage est la suivante :

$P = \text{Débit volumique} \times \text{Perte de charge (Pa)} / \text{efficacité de la pompe (\%)}$

Hypothèse : l'efficacité des pompes CO₂ est à ce jour, généralement inférieure à celle des pompes EG. Nous considérerons une efficacité de 60% pour les pompes EG et de 40% pour les pompes CO₂²

La perte de charge du réseau est de l'ordre de 4 bars pour l'eau glycolé et de 3 bars pour le CO₂.³

	Eau glycolée		CO2 frigoporteur	
Puissance	1	kW	1	kW
Débit mass	0,07	kg/s	0.00403	kg/s
Chaleur sensible (liquide)	3,63	kJ/(kg.K)	185,93	kJ/kg ⁴
Chaleur latente de vaporisation	n/a		433,86	kJ/kg ⁵
Delta T		4	n/a	
Masse volumique	1048,2	kg/m ³	961,53	kg/m ³
Débit volumique	6,67*10 ⁻⁵	m ³ /s	4.195*10 ⁻⁶	m ³ /s
	Soit 0,240	m ³ /h	Soit 0.015	m ³ /h
Efficacité pompe	60%		40%	
Perte de charge	400 000 Pa		300 000 Pa	
Puissance absorbée de pompage	6.67*10 ⁻⁵ *		4.195*10 ⁻⁶ *	
	400 000 / 60% =		300 000 / 40% =	
	44.5 W		3.15 W	

Pour une puissance frigorifique positive 576,4 kW (chambres froides comprises) Il faut donc 26,3 kW de puissance pour l'EG contre 1,9 kW pour le CO₂.

L'utilisation du CO₂ comme frigoporteur permet donc une économie annuelle sur la partie pompage de :
 $0,041 \text{ kW abs pompe/kW installé} \times 365 \times 24 = \mathbf{359,16 \text{ kWh/kW froid positif installé}}$

- Compression

Suppression de la différence de température entrée/sortie tant sur les postes de froid que sur le liquéfacteur et donc possibilité de remonter la température d'évaporation du fluide primaire ici R404 servant à la recondensation des vapeurs du CO₂ (le CO₂ s'évapore à température constante et permet d'obtenir une stabilité dans la température atteinte). Cette remontée se traduit par une amélioration du COP et une diminution de la taille du compresseur.

A noter que le meilleur coefficient d'échange du CO₂ (évaporation ou condensation) permet une remontée de la température d'évaporation du fluide primaire de 6 à 8 K.

De plus les évaporateurs plus compacts sont dégivrés vides alors qu'ils restent remplis d'eau glycolée

² Source : Paul Rivet, axima réfrigération et Perifem

³ Source : Paul Rivet, axima réfrigération et Perifem

⁴ Enthalpie phase liquide

⁵ Enthalpie phase vapeur

<i>situation de référence</i>	
<i>Base eau glycolée</i>	-8°C/-4°C
Fluide primaire / secondaire	R404A / EG
<i>Température d'évaporation du R404a</i>	-14°C
<i>COP EG</i>	2,57
1/COP EG	0,389
<i>Variante CO2</i>	
Fluide primaire / secondaire	R404A / CO2
<i>Température condensation CO2</i>	-6°C
<i>Température d'évaporation du R404a</i>	-10°C
<i>COP CO2</i>	2,9
1/COP CO2	0,345

Les valeurs des COP pour les températures de condensation données sont sourcées Perifem, Axima réfrigération et Emerson (voir annexes).

Pour une puissance installée de 1 kW :

Economie annuelle réalisée : $(1/COPEG - 1/COP\ CO2) \times Tps\ fonct$

En général, la compression dure 16h/j soit un temps de fonctionnement annuel de 5840h/an.

L'utilisation du CO₂ comme frigoporteur permet donc un gain annuel sur la partie compression de **257 kWh/kW froid positif installé**

Soit un gain total compression + pompage de **616 kWh/kW froid positif installé**

En cascade (détente directe pour le froid négatif) :

Par rapport à une solution CO₂ frigoporteur, l'installation en cascade impose une compression supplémentaire sur l'étage CO₂ (Basse pression).

COP moyen des installations positives des super et hypermarchés : 2

COP moyen des compresseurs CO₂ au régime -37 / -9°C : 4

Le calcul suivant peut être réalisé par kW de puissance frigorifique négative :

Consommation compresseur CO₂ (COP = 4) pour 1 kW Froid : 0,25 kWh

Consommation compresseur positif induite pour condensation du CO₂ sur la centrale positive : (Rejet négative) / COP positive = $(1 + 0.25) / 2 = 0,625$ kWh

Soit un COP de la centrale CO₂ cascade de $1 / (0.25 + 0,625) = 1,14$

Soit un accroissement du COP par rapport à une centrale classique (COP =1) de 14 % ce qui représente une réduction de la consommation énergétique de 12,3%.

L'opération élémentaire sera calculée sur l'économie d'énergie en kWh, par kW de puissance frigorifique négative fournie à partir d'une production CO2 fonctionnant en cascade sur la centrale de production positive.

Magasin Hypermarché type 10 000m²

-Puissance frigorifique **négative** 83 kW (chambre froide comprise)

-COP =1

-Consommation annuelle pour environ 6000h de fonctionnement (soit 16h/jour) :
0,5 GWh

Gain de consommation à l'année : 61,5 MWh (12,3% de 0.5 GWh) soit 740 KWh/kW froid négatif installé pour 83 kW froid négatif

De la même manière,

Magasin Supermarché type 1500m²

-Puissance frigorifique **négative** 20kW (chambre froide comprise)

-COP =1

-Consommation annuelle pour environ 6000h de fonctionnement (soit 16h /jour) :
0,12 GWh

Gain de consommation à l'année : 14.76 MWh (12,3% de 0.12 GWh) soit 740 KWh/kW froid négatif installé pour 20 kW froid négatif

L'utilisation du CO₂ en cascade permet donc une économie annuelle sur la partie compression de :
740 KWh/kW froid négatif installé

CO2 transcritique :

Le remplacement d'une installation HFC froid + et – séparé par un système Booster transcritique avec compression parallèle et un éjecteur engendre 13% à 20%(selon les conditions climatiques) d'économie d'énergie annuellement par rapport à la compression parallèle seule ; laquelle améliore de 8 à 10% les performances (à dire d'experts AXIMA réfrigération, Perifem, Paul Rivet, Frigo-Consulting International Ltd).

Pack Calculation permet de comparer la consommation d'énergie annuelle de différentes installations frigorifiques. Il offre notamment la possibilité de comparer les systèmes transcritiques au CO2 à des systèmes traditionnels. Cette comparaison est effectuée sur la base de critères géographiques. Cet outil utile contient des modèles pour 11 cycles de réfrigération couramment utilisés et pour plus de 4 000 compresseurs disponibles sur le marché.

Une année de fonctionnement a été simulée à l'aide du logiciel Pack Calculation Pro pour chacun des systèmes :

- 1) Système HFC froid + et - séparé (référence)
- 2) Booster CO2 transcritique
- 3) Booster CO2 transcritique compression parallèle

Le même profil annuel de charge et les conditions météorologiques ont été utilisés dans toutes les simulations.

Chaque simulation a été effectuée sur une base horaire en effectuant une simulation de l'état d'équilibre pour chaque heure de l'année. Dans chaque heure la charge était connue à partir d'un profil de charge horaire pour l'année entière. En parcourant les étages de puissance des compresseurs du système simulé, l'étage de capacité(s) est celui qui correspond le mieux à la moyenne charge de l'heure.

Si aucun étage de capacité a été en mesure de correspondre exactement à la charge, ce qui est généralement le cas pour les systèmes sans compresseur à vitesse contrôlée, les résultats pour l'heure ont été calculés en pondérant les résultats pour les deux étages de puissance les plus proches.

La simulation utilise un système HFC froid + et - séparé comme système de référence, et le lieu sélectionné, qui détermine la température ambiante : Nantes en zone H2, Paris Orly en zone H1 et Marseille en zone H3.

En annexe la consommation énergétique par mois des systèmes simulés en zone H1. Chaque barre est égale à la somme de la consommation énergétique du compresseur et de la consommation énergétique d'équipements supplémentaires (ventilateurs du condenseur, de l'évaporateur et les pompes utilisées dans le système).

Le tableau ci-dessous montre la moyenne de la consommation énergétique par mois des systèmes simulés dans la zone H1. Équipements supplémentaires : ventilateurs du condenseur, de l'évaporateur et les pompes utilisées dans le système.

Mois	Système HFC froid + et - séparé			Booster CO2 transcritique			Booster CO2 transcritique compression parallèle		
	Compresseur (kWh)	Ventilateurs et pompes (kWh)	Total (kWh)	Compresseur (kWh)	Ventilateurs et pompes (kWh)	Total (kWh)	Compresseur (kWh)	Ventilateurs et pompes (kWh)	Total (kWh)
Janvier	27 555,9	2 049,9	29 605,8	29 818,9	2 078,6	32 697,5	29 221,9	2 104,8	32 326,7
Février	24 000,0	1 806,0	26 726,0	18 664,8	1 907,5	20 572,4	18 297,2	1 930,1	20 235,3
Mars	27 588,5	2 485,9	30 074,4	22 824,1	2 276,1	25 099,3	22 842,3	2 296,5	24 338,8
Avril	26 829,1	3 929,8	28 754,9	25 223,2	2 364,4	27 527,6	23 967,7	2 381,1	26 268,8
Mai	28 909,9	3 863,4	32 833,3	31 737,2	2 732,8	34 470,0	29 606,5	2 626,0	32 232,4
Juin	28 978,8	4 136,5	33 115,3	34 412,6	2 952,4	37 365,1	31 742,4	2 734,8	34 477,3
Juillet	31 927,1	4 475,8	36 403,0	38 885,2	3 589,8	42 455,0	35 667,9	3 176,7	38 844,6
Août	32 483,8	4 528,5	37 012,3	39 966,3	3 683,5	43 649,8	36 472,3	3 229,0	39 701,3
Septembre	28 143,8	3 965,2	32 107,0	32 282,4	2 738,4	35 020,8	29 952,8	2 681,3	32 553,9
Octobre	27 927,9	3 321,4	31 249,2	27 568,1	2 426,1	29 994,3	26 053,7	2 478,6	28 478,3
Novembre	26 741,6	2 293,4	29 035,0	21 561,0	2 189,1	23 750,1	20 902,2	2 216,6	23 118,8
Décembre	27 373,9	2 109,5	29 483,4	29 928,0	2 086,4	32 014,4	28 450,5	2 118,8	30 569,3
Total	339 300,2	37 999,1	377 379,4	334 632,0	30 951,2	365 583,3	315 377,2	28 760,1	345 137,3
Moyenne	28 281,7	3 166,6	31 448,3	27 886,0	2 579,3	30 465,3	26 281,4	2 480,0	28 761,4

Bilan :

	Système HFC froid + et - séparé (référence)	Booster CO2 transcritique	Booster CO2 transcritique compression parallèle
Accomplissement de la charge en% du temps			
BT:	100,0	100,0	100,0
MT:	100,0	100,0	100,0
Total:	100,0	100,0	100,0
Accomplissement de la charge en% de l'énergie			
BT:	100,0	100,0	100,0
MT:	100,0	100,0	100,0
Total:	100,0	100,0	100,0
COP moyen			
BT [-]:	1,68	3,95	3,95
MT [-]:	3,19	3,37	3,58
Total [-]:	2,91	3,01	3,18
Consommation d'énergie pompes et ventilateurs			
BT [kWh]:	4 662	0	0
MT [kWh]:	33 337	30 951	29 760
Total [kWh]:	37 999	30 951	29 760
Consommation d'énergie compresseurs			
BT [kWh]:	64 622	29 542	29 538
MT [kWh]:	274 758	305 090	245 141
Parallèle [kWh]:	0	0	40 698
Total [kWh]:	339 380	334 632	315 377
Consommation d'énergie totale			
BT [kWh]:	69 284	29 542	29 538
MT [kWh]:	308 096	336 041	315 599
Total [kWh]:	377 379	365 583	345 137
Économies			
Économies d'énergie annuelles [kWh]:	-	11 796	32 241
Économies d'énergie annuelles [%]:	-	3,1	8,5

- Le remplacement d'une installation HFC froid + et - séparé par un système Booster transcritique avec compression parallèle engendre 8.54% d'économie d'énergie annuellement
- Le remplacement d'une installation HFC froid + et - séparé par un système Booster transcritique avec compression parallèle ET un éjecteur engendre 13% d'économie supplémentaire annuellement

Même simulation en zone H2 (voir résultats en annexes) :

- Le remplacement d'une installation HFC froid + et - séparé par un système Booster transcritique avec compression parallèle engendre 6.5% d'économie d'énergie annuellement
- Le remplacement d'une installation HFC froid + et - séparé par un système Booster transcritique avec compression parallèle ET un éjecteur engendre 13% d'économie supplémentaire annuellement

Même simulation en zone H3 (voir résultats en annexes) :

- Le remplacement d'une installation HFC froid + et - séparé par un système Booster transcritique avec compression parallèle engendre 1.5% d'économie d'énergie annuellement
- Le remplacement d'une installation HFC froid + et - séparé par un système Booster transcritique avec compression parallèle ET un éjecteur engendre 13% d'économie supplémentaire annuellement.

Les résultats obtenus correspondent à une puissance installée de 150 kW en froid positif et 20 kW en froid négatif, nous obtenons les gains annuels suivants par puissance installée :

P		Zone climatique	Booster avec compression parallèle		P		Zone climatique	Booster avec compression parallèle
Puissance frigorigifique positive installée en kW	x	H1	50.02	+	Puissance frigorigifique négative installée en kW	x	H1	1987.3
		H2	-102.77				H2	2010,4
		H3	-252.36				H3	2190.55

I- MONTANT DE CERTIFICATS EN KWH CUMAC

CO₂ subcritique frigoporteur :

Montant en kWh cumac par kW		Puissance frigorigifique positive installée en kW
7 123	X	P ⁺

CO₂ subcritique en cascade :

Montant en kWh cumac par kW		Puissance frigorigifique négative installée en kW
8557	X	P ⁻

CO₂ transcritique :

Avec compression parallèle :

Puissance frigorigifique positive installée en kW	x	Zone climatique	Montant en kWh cumac par kW	+	Puissance frigorigifique négative installée en kW	Zone climatique	Montant en kWh cumac par kW	
			Booster avec compression parallèle				Booster avec compression parallèle	
		P ⁺	H1		578.38	P ⁻	H1	22 979,14
			H2		-1188,32		H2	23 246,25
	H3	-2918.03		H3	25 329,32			

Avec compression parallèle ET éjecteur :

Puissance frigorifique positive installée en kW	x	Zone climatique	Montant en kWh cumac par kW	+	Puissance frigorifique négative installée en kW	x	Zone climatique	Montant en kWh cumac par kW
			Booster avec compression parallèle					Booster avec compression parallèle
P+		H1	653,5694		P-		H1	25966,43
		H2	-1342,8				H2	26268,26
		H3	-3297,37				H3	28622,13

Présentation retenue pour l'arrêté :

CO₂ subcritique frigoporteur :

Montant en kWh cumac par kW	X	Puissance frigorifique positive installée en kW
7100		P+

CO₂ subcritique en cascade :

Montant en kWh cumac par kW	X	Puissance frigorifique négative installée en kW
8600		P-

Lorsque les deux solutions (subcritique frigoporteur et subcritique en cascade) sont mises en œuvre respectivement pour la production de froid à température positive et pour la production de froid à température négative, les montants de certificats d'économies d'énergie s'ajoutent.

CO₂ transcritique avec compression parallèle seulement :

Puissance frigorifique positive installée en kW	x	Zone climatique	Montant en kWh cumac par kW	+	Puissance frigorifique négative installée en kW	x	Zone climatique	Montant en kWh cumac par kW
P+		H1	580		P-		H1	23 000
		H2	- 1200				H2	23 200
		H3	- 2900				H3	25 300

CO₂ transcritique avec compression parallèle et éjecteur :

Puissance frigorifique positive installée en kW		Zone climatique	Montant en kWh cumac par kW		Puissance frigorifique négative installée en kW		Zone climatique	Montant en kWh cumac par kW
P ⁺	X	H1	650	+	P ⁻	X	H1	26 000
		H2	- 1300				H2	26 300
		H3	- 3300				H3	28 600

DOCUMENT DE TRAVAIL

ANNEXES

ANNEXE : justification des durées de vie des machines frigorifiques

L'étude « Moteur 2008 » du CEREN qui détaille le parc des moteurs électriques dans l'industrie sur cette période fournit la répartition des consommations d'énergie (GWh/an) des machines frigorifiques par tranches d'âge suivante :

Tranche d'âge	< ou = 5 ans	6 à 10 ans	11 à 15 ans	16 à 20 ans	21 à 25 ans	26 à 30 ans	> 30 ans	
Age moyen (ans)	3	8	13	18	23	28	30	
Consommations (GWh/an)	2975	3036	5614	497	58	109	192	12481

Tableau 1 : consommations d'énergie des machines frigorifiques par tranche d'âge

L'âge moyen (pondéré par les consommations d'énergie) du parc de machines frigorifiques dans l'industrie est de 10 ans en 2008.

Par ailleurs, le flux de machines frigorifiques neuves (majoritairement en remplacement de machines existantes) calculé de la même manière que pour les moteurs électriques s'établit à 4,8%/an du parc de compresseurs installés.

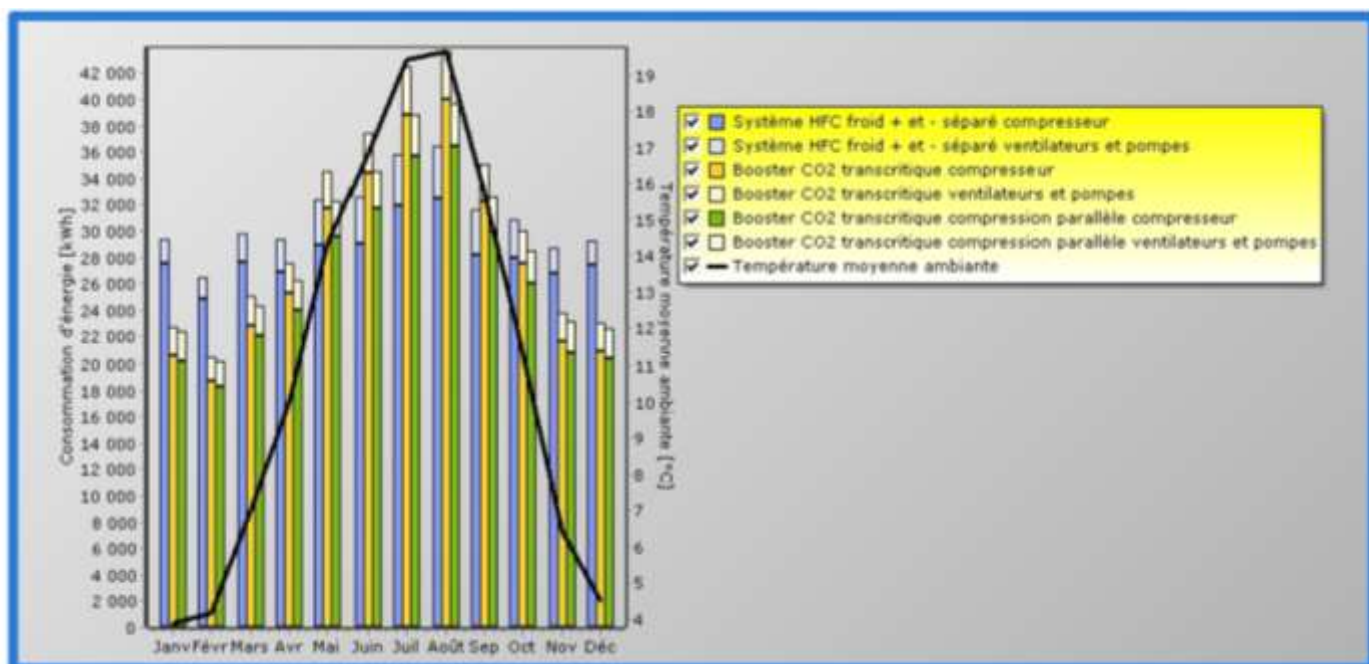
Durée de vie des machines frigorifiques

Par ailleurs, cette l'étude CEREN donne des durées de vie pour les machines frigorifiques allant de 10 à 30 ans sur la base d'entretiens avec TRANE, YORK et DANFOSS.

Technique	Durée de vie (ans)	Durée de vie retenue (ans)
Spirale	10	10
Piston	10	10
Vis refroidie par air	10-15	12,5
Vis refroidie par eau	25-30	22,5
Centrifuge	25-30	30 (idem compresseur d'air)

Tableau 2 : durées de vie des machines frigorifiques par type de compresseur

Valeurs des COP pour fluides frigoporteurs (Emerson) :



COP Tévap : -10°C et Tcond : - 35°C

Copeland Selection Software	Version 7.12 / 42318 (11/15)			
Fluide frigorigène	R404A Pt rosée			
Réseau électrique	380/420V - 3~ - 50Hz			
Température d'évaporation	-10,0°C			
Température condensation	35,0°C			
Surchauffe aspiration	5,0K			
Sous-refroidissement liquide	0,0K			
Puissance Frigo. Requite	2.000000000000000E+000			
Compresseur	Puiss. Frigo.	P. Absorbée	C.O.P.	Débit masse
4MA-22X	3.65000005438924E+001	1.21000001803040E+001	3,02	3.220000000000000E+002
4MF-13X				

	3.53000005260110E+0001	1.22500001825392E+0001	2,89	3.11000000000000E+0002
4MH-25X	4.27000006362796E+0001	1.44500002153217E+0001	2,95	3.76000000000000E+0002
4ML-15X	4.25000006332994E+0001	1.48000002205371E+0001	2,87	3.74000000000000E+0002
4MI-30X	4.73000007048249E+0001	1.58500002361834E+0001	2,98	4.16000000000000E+0002
4MM-20X	4.67000006958842E+0001	1.60000002384186E+0001	2,92	4.11000000000000E+0002
4MJ-33X	5.33000007942319E+0001	1.78500002659857E+0001	2,98	4.69000000000000E+0002
4MT-22X	5.25000007823110E+0001	1.83000002726912E+0001	2,87	4.62000000000000E+0002
4MK-35X	5.97000008895993E+0001	2.08000003099442E+0001	2,87	5.26000000000000E+0002
4MU-25X	5.85000008717179E+0001	2.10000003129244E+0001	2,79	5.15000000000000E+0002
6MI-40X	7.16000010669231E+0001	2.45000003650784E+0001	2,92	6.31000000000000E+0002
6MM-30X	7.08000010550022E+0001	2.45000003650784E+0001	2,90	6.24000000000000E+0002
6MJ-45X	8.03000011965632E+0001	2.71000004038215E+0001	2,96	7.07000000000000E+0002
6MT-35X	8.01000011935830E+0001	2.78000004142523E+0001	2,89	7.05000000000000E+0002
6MK-50X	8.93000013306737E+0001	3.16000004708767E+0001	2,83	7.86000000000000E+0002
6MU-40X	8.99000013396144E+0001	3.16000004708767E+0001	2,85	7.91000000000000E+0002
		Moyenne	2,91	

COP Tévap : -14°C et Tcond : - 35°C

Copeland Selection Software	Version 7.12 / 42318 (11/15)			

Fluide frigorigène	R404A Pt rosée			
Réseau électriq	380/420V - 3~ - 50Hz			
Température d'évaporation	-14,0°C			
Température condensation	35,0°C			
Surchauffe aspiration	5,0K			
Sous-refroidissement liquide	0,0K			
Puissance Frigo. Requise	2.000000000000000E+000			
Compresseur	Puiss. Frigo.	P. Absorbée	COP	Débit masse
4MA-22X	3.07000004574656E+0001	1.15500001721084E+0001	2,66	2.760000000000000E+0002
4MF-13X	2.96000004410744E+0001	1.16000001728534E+0001	2,55	2.660000000000000E+0002
4MH-25X	3.57000005319715E+0001	1.37000002041459E+0001	2,6	3.210000000000000E+0002
4ML-15X	3.58000005334616E+0001	1.41000002101063E+0001	2,54	3.220000000000000E+0002
4MI-30X	4.00000005960464E+0001	1.51000002250075E+0001	2,65	3.590000000000000E+0002
4MM-20X	3.95000005885959E+0001	1.52000002264976E+0001	2,6	3.550000000000000E+0002
4MJ-33X	4.48000006675720E+0001	1.69500002525747E+0001	2,64	4.020000000000000E+0002
4MT-22X	4.43000006601214E+0001	1.73500002585351E+0001	2,55	3.980000000000000E+0002
4MK-35X	5.01000007465482E+0001	1.96500002928078E+0001	2,55	4.500000000000000E+0002
4MU-25X	4.92000007331371E+0001	1.99000002965331E+0001	2,47	4.420000000000000E+0002
6MI-40X	6.01000008955598E+0001	2.32000003457069E+0001	2,59	5.400000000000000E+0002
6MM-30X	5.94000008851290E+0001	2.33000003471971E+0001	2,55	5.340000000000000E+0002

	001	001		002
6MJ-45X	6.76000010073185E+0001	2.59000003859401E+0001	2,61	6.07000000000000E+0002
6MT-35X	6.74000010043383E+0001	2.64000003933907E+0001	2,55	6.05000000000000E+0002
6MK-50X	7.52000011205673E+0001	2.99000004455447E+0001	2,52	6.76000000000000E+0002
6MU-40X	7.54000011235476E+0001	2.99000004455447E+0001	2,52	6.77000000000000E+0002
		Moyenne	2,57	

