



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Production de froid



1- Généralités

On dit :

- ▶ « il fait chaud ou il fait froid »
- ▶ « c'est chaud ou c'est froid ».



En réalité:

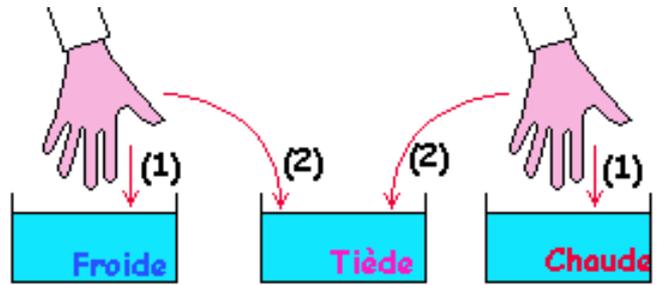
- ▶ Le froid est l'absence de chaleur

Comme l'Obscurité

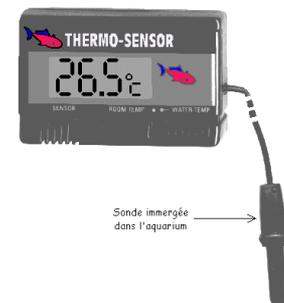
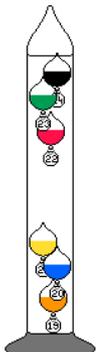
est l'absence de Lumière



Le toucher :

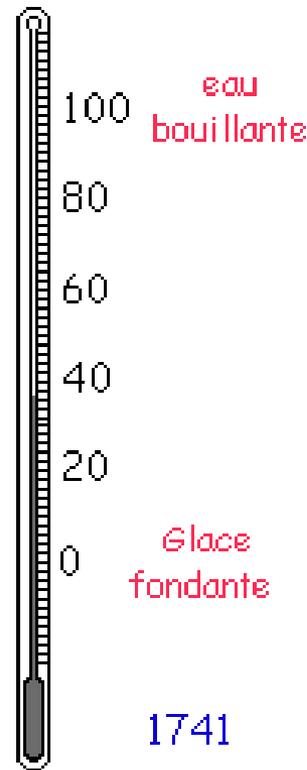


Le thermomètre



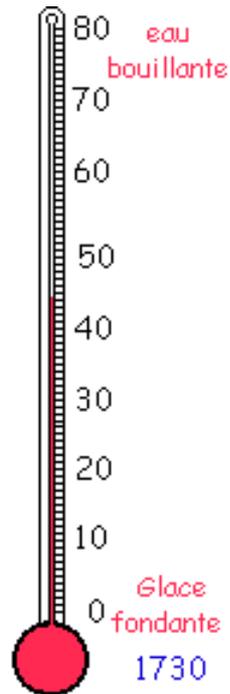
Échelle CELCIUS

Premier thermomètre
à mercure à échelle
centésimale



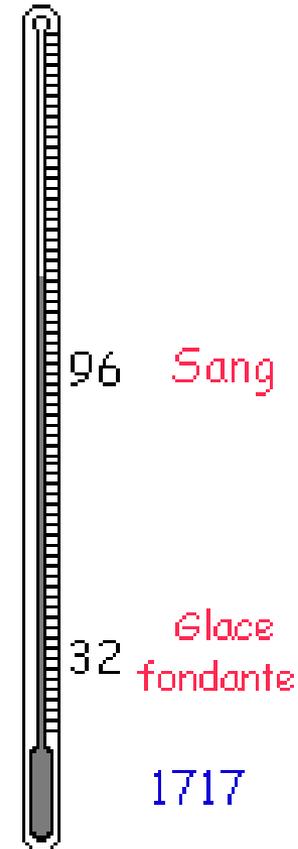
Échelle RÉAUMUR

► Thermomètre à alcool



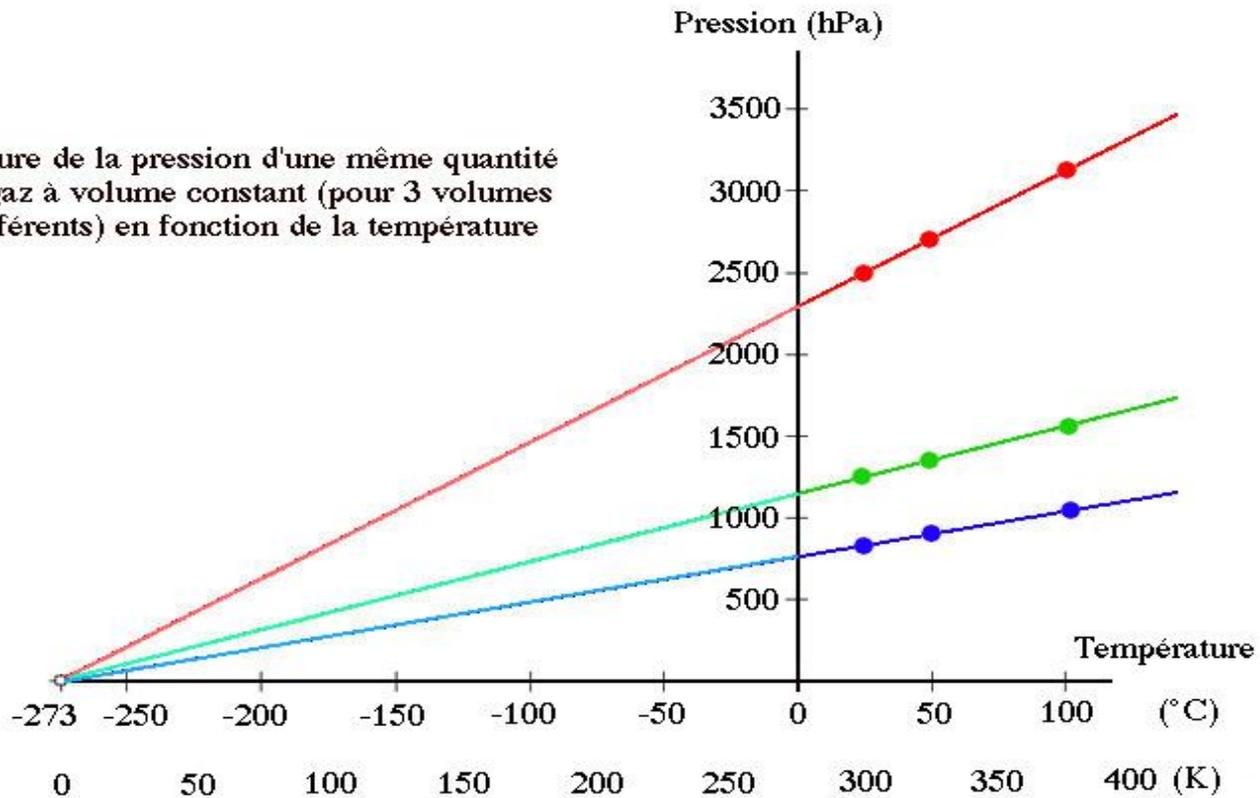
Échelle FARENHEIT

- Premier thermomètre à mercure.



Échelle KELVIN

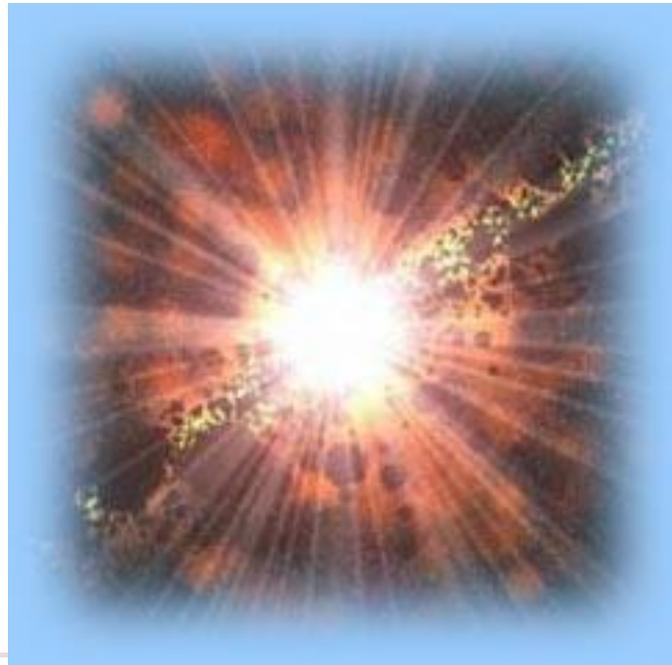
Mesure de la pression d'une même quantité de gaz à volume constant (pour 3 volumes différents) en fonction de la température



Quelques températures

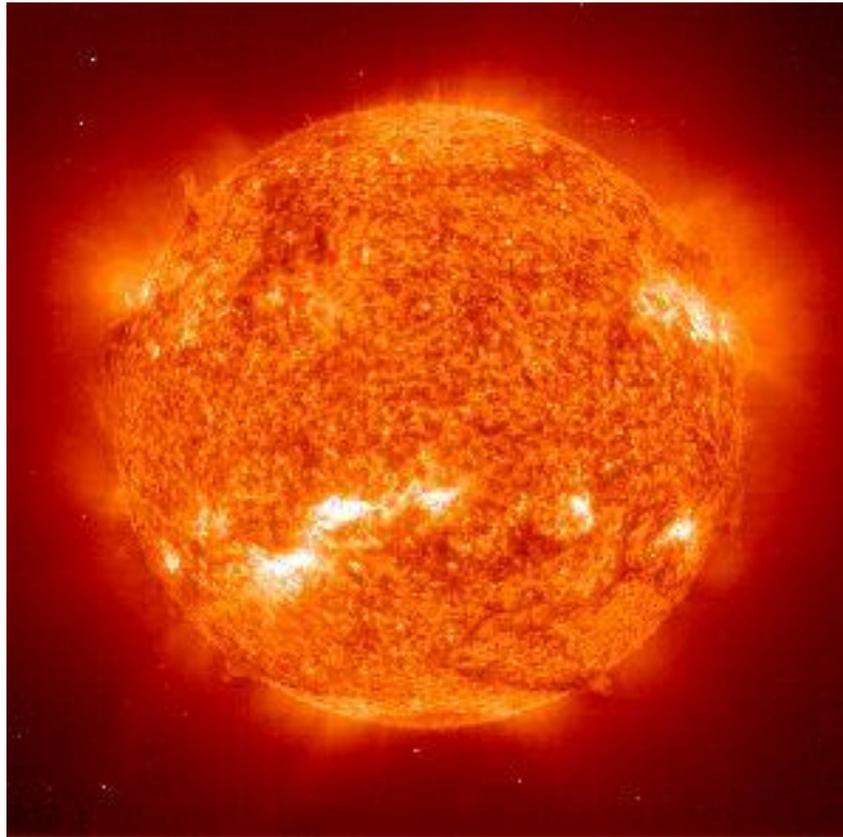
- ▶ Au moment du « big-bang »

Quinze milliards de degrés



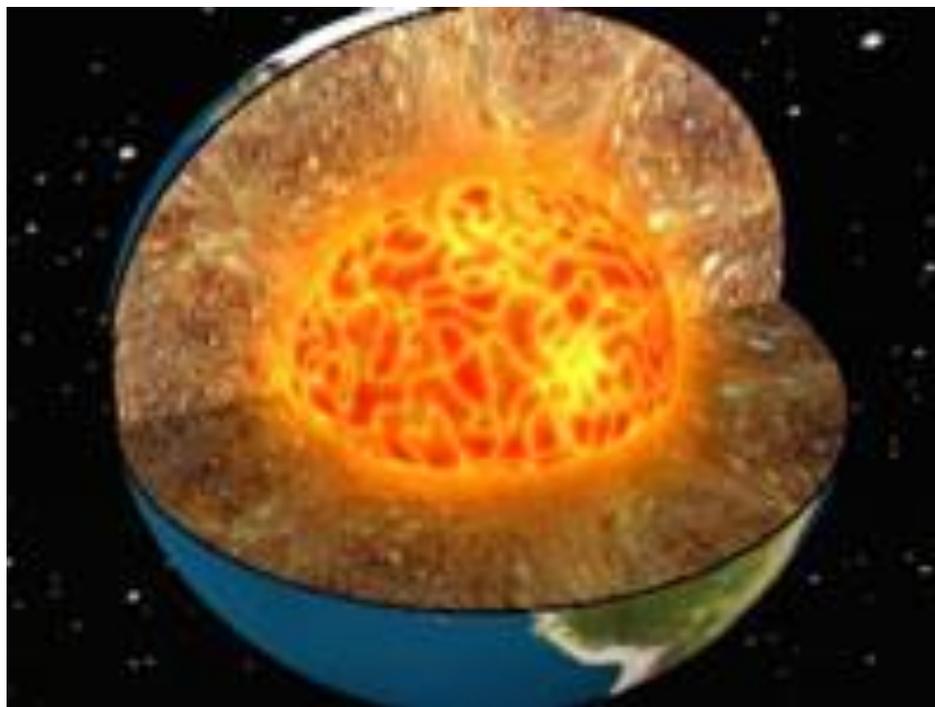
► Au centre du Soleil

Quinze millions de degrés



► Au centre de la Terre

Quatre mille cinq cents degrés



► Plus forte température moyenne annuelle

+34°C en Éthiopie



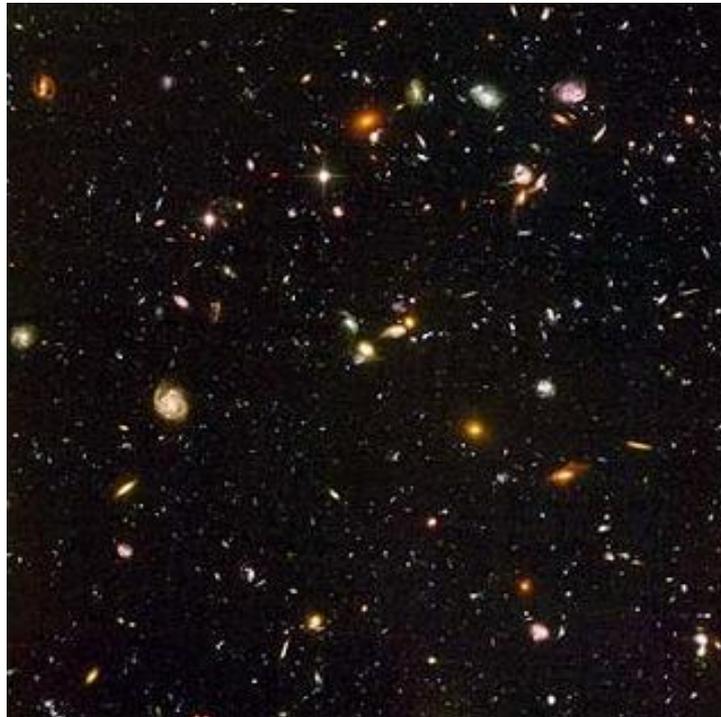
► Plus basse température moyenne annuelle

-58°C en Antarctique



► Rayonnement fossile de l'Univers

2,7K





giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

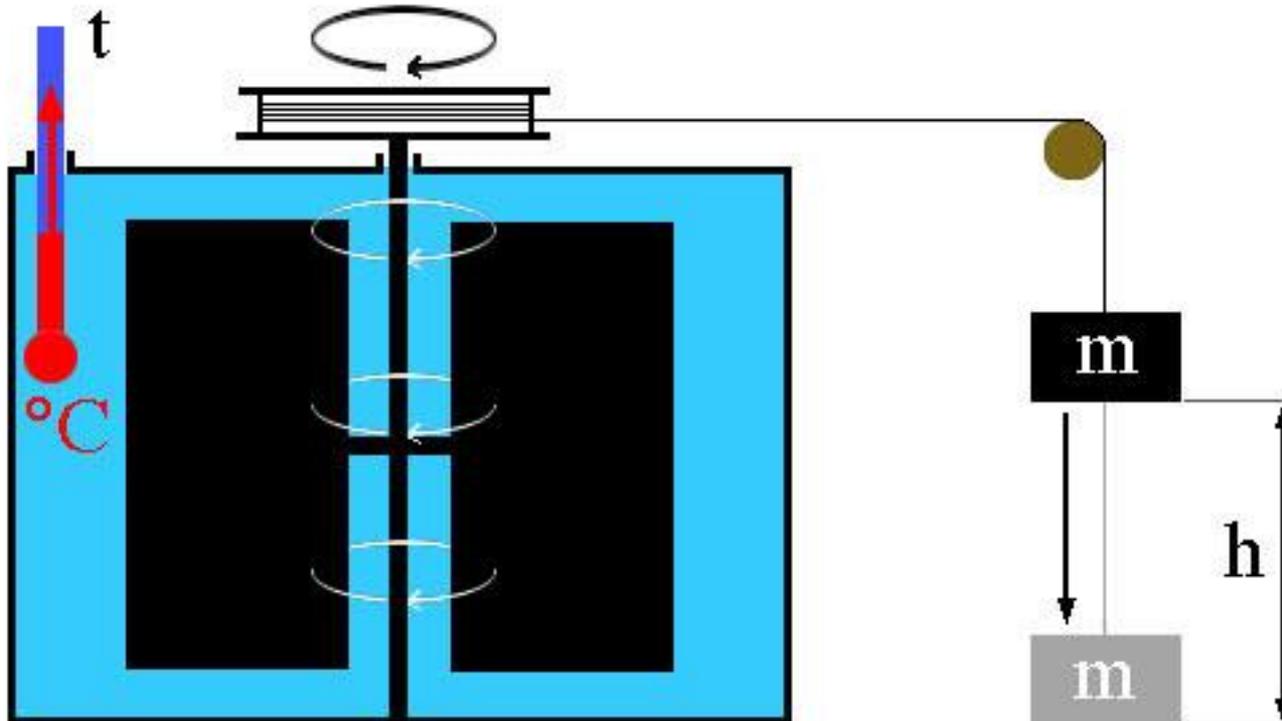


**BUREAU
VERITAS**

En résumé

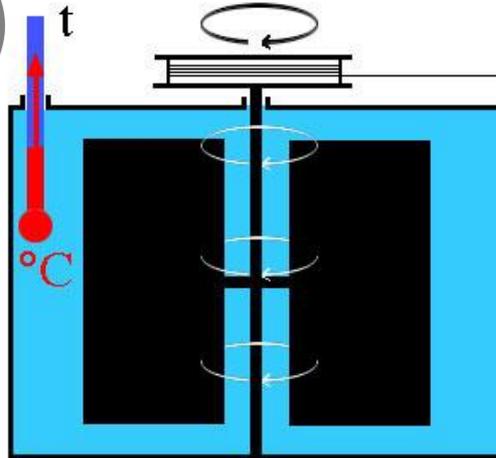
- ▶ A 0K il n'y a plus de chaleur.
- ▶ Au dessus de 0K, il y a de la chaleur
- ▶ Le « froid » est une conception humaine relative à notre sensation de la chaleur.
- ▶ La production de froid permet d'absorber de la chaleur.

La CHALEUR, une autre énergie!

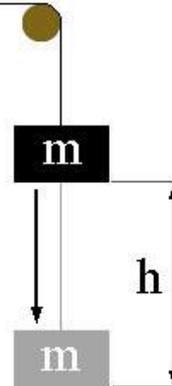


$W = J \times Q$ avec $J = 4,18 \text{ J/cal}$

J'ai obtenu de la chaleur?



J'ai fourni du travail



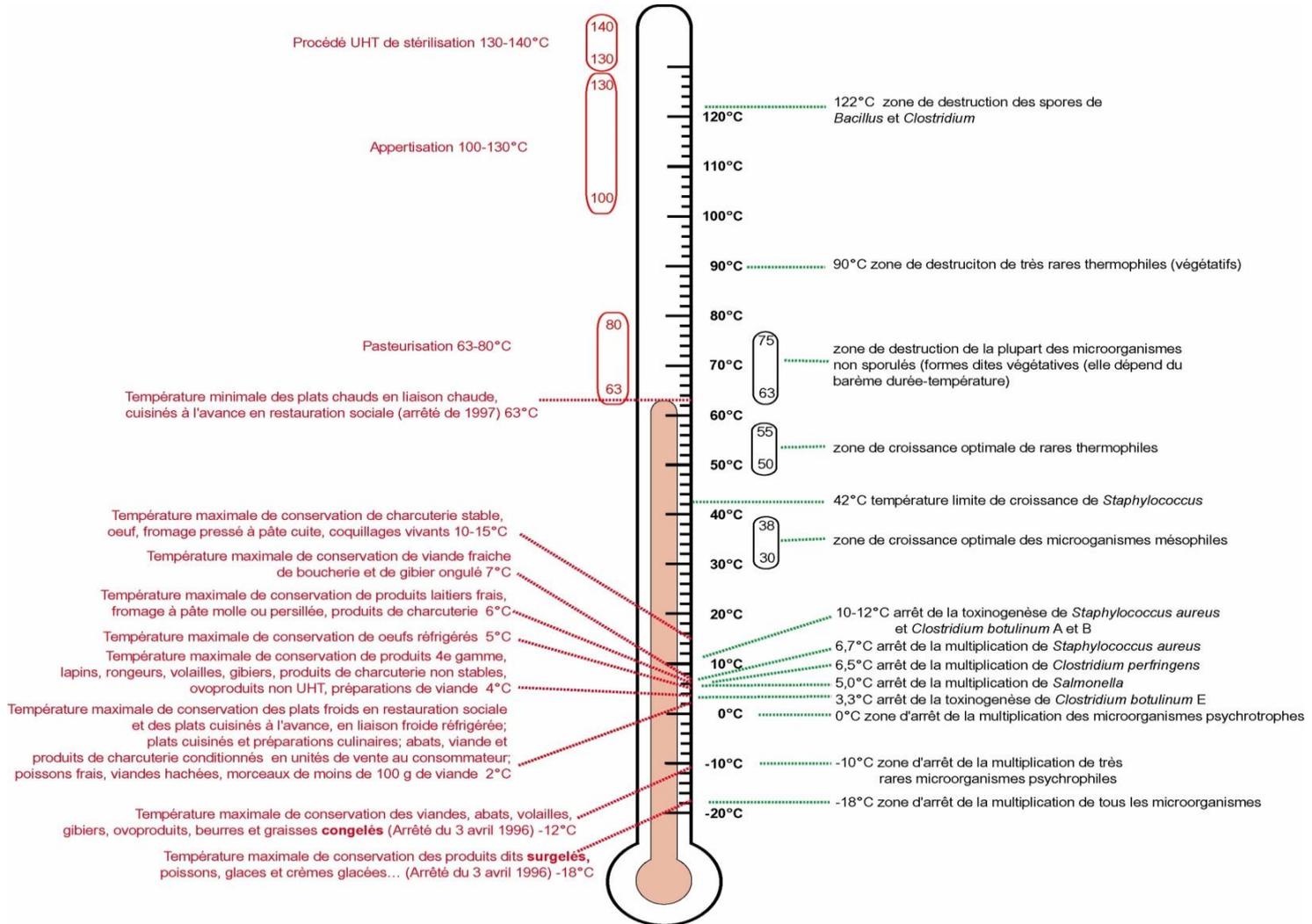


2- Pourquoi « Produire du froid »

- Conservation des denrées



Influence de la température dans le développement microbien



Conditionnement d'air



De nombreuses techniques de conservations des aliments existent



Séchage
Drying



Salaison
Salting

Fumaison
Smoking



Appertisation



Fermentation
Fermentation



Confisage
Sugar cooking



Ne pas oublier que depuis des millénaires, ces techniques assurent la base de l'alimentation humaine ...
Remind that these techniques are the basis of human food supply for thousand years ...

3- Comment « produire du froid »

► Naturellement

Fusion de la glace

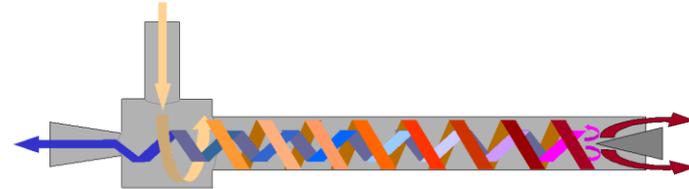


Mélanges réfrigérants



► Artificiellement

Détente air comprimé (tube de Ranque)



Effet thermoélectrique (Peltier)



Sublimation de glace carbonique (CO₂)



Dans presque tous les cas, le froid est produit par des machines à compression mécanique de vapeur

In most cases, cold is produced by using vapor compression machines

HCFC

HFC

Ozone

Energie

NH3

CO2

Changement climatique

Climate change



Environnement



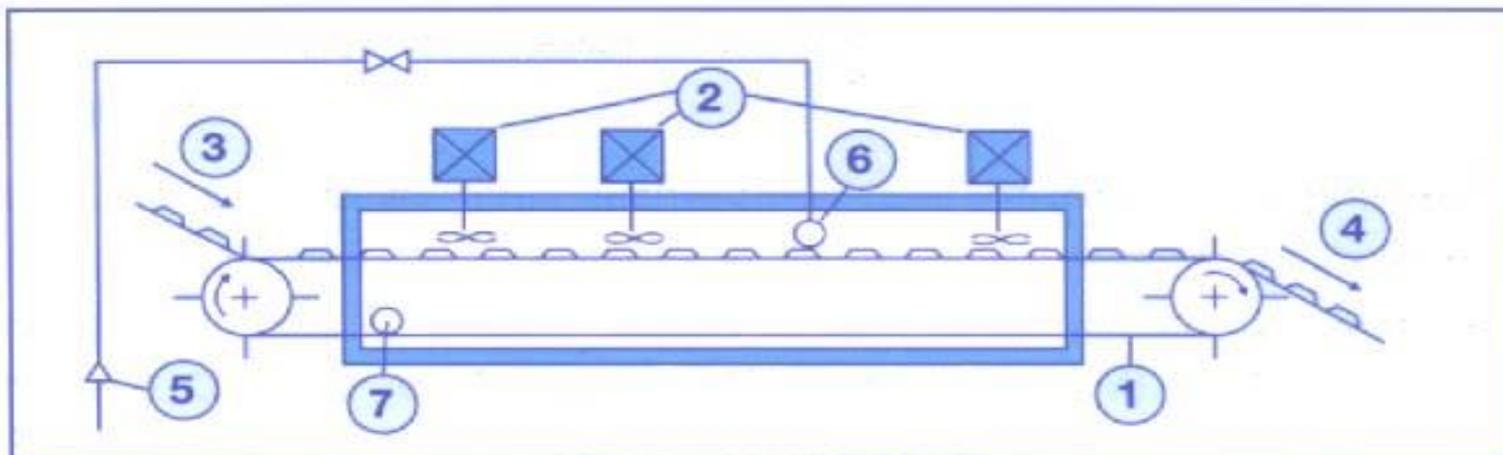
Qualification des opérateurs et des entreprises
Training and qualification

Acceptabilité des consommateurs
Consumers acceptance

Cout d'investissement et d'exploitation
Total Cost of Ownership

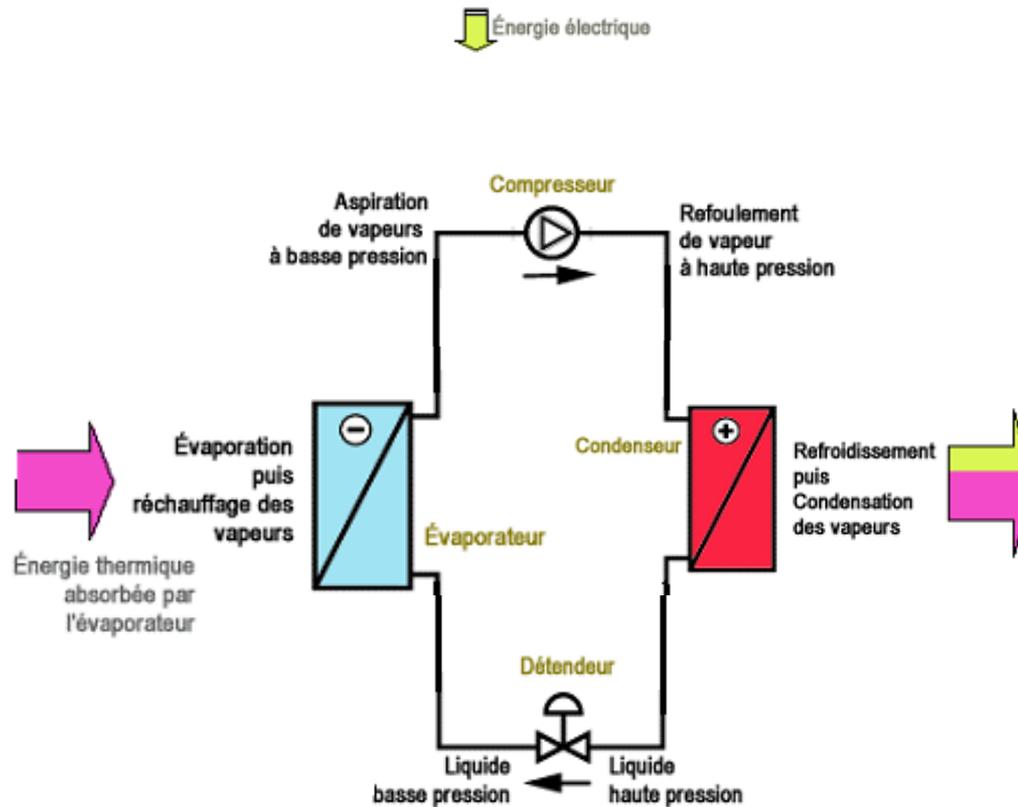
► 4 Système à changement de phase

- Système ouvert: surgélateurs à azote liquide



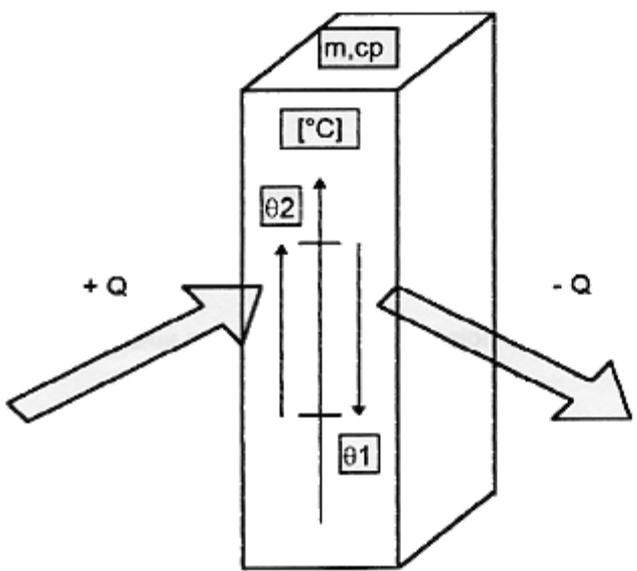
1- Bande porteuse • 2- Ventilateurs • 3- Entrée des produits • 4- Sortie des produits
5- Arrivée d'azote liquide • 6- Pulvérisation d'azote • 7- Evacuation d'azote gazeux

- **Système fermé: Machine frigorifique à fluide liquéfiable.**



5 Calorimétrie

Chaleur sensible.



$$Q = m \cdot cp \cdot \Delta\theta$$

avec
 $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$
 (f = final, i = initial)

cp = chaleur massique de l'eau
 = Q si m = 1
 et $\Delta\theta = 1$)

cpw = 4,18 pour l'eau.
 cpa = 1 pour l'air.

Remarque :

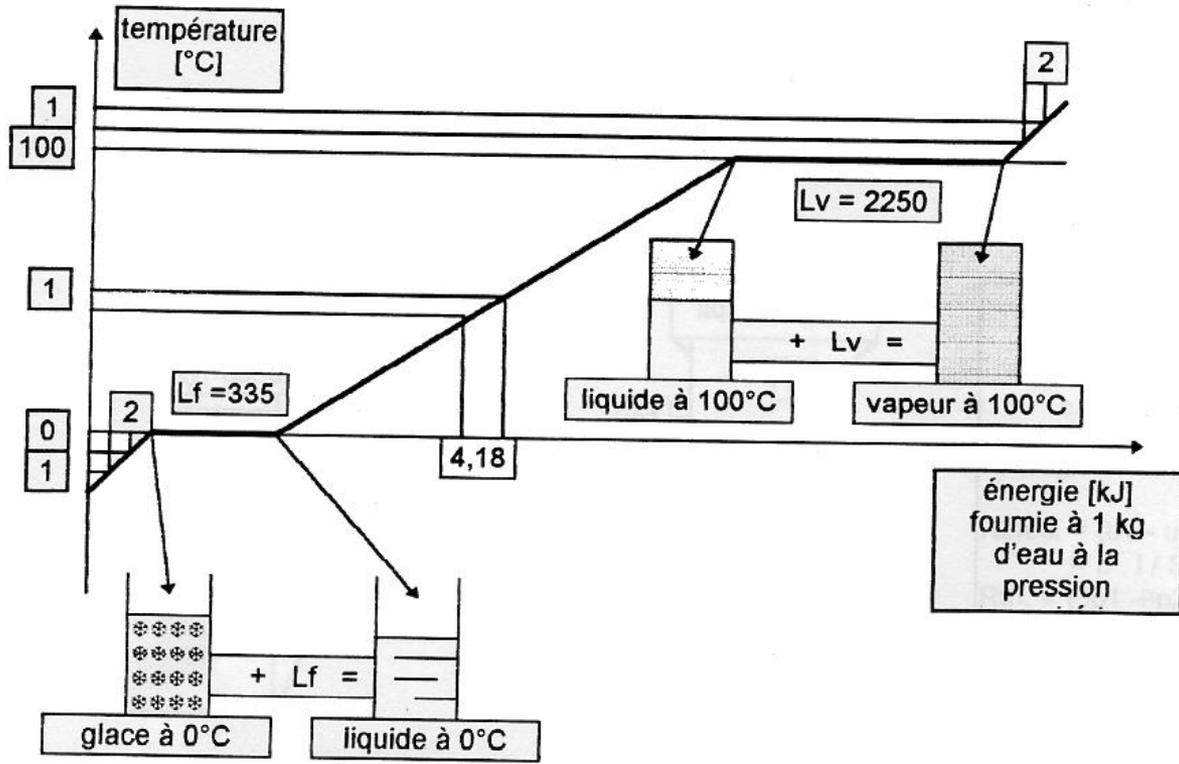
1°) si chauffage.
 $\theta_f = \theta_1$ et $\theta_i = \theta_2 \Rightarrow \Delta\theta > 0 \Rightarrow \underline{Q > 0}$

si refroidissement.
 $\theta_f = \theta_2$ et $\theta_i = \theta_1 \Rightarrow \Delta\theta < 0 \Rightarrow \underline{Q < 0}$

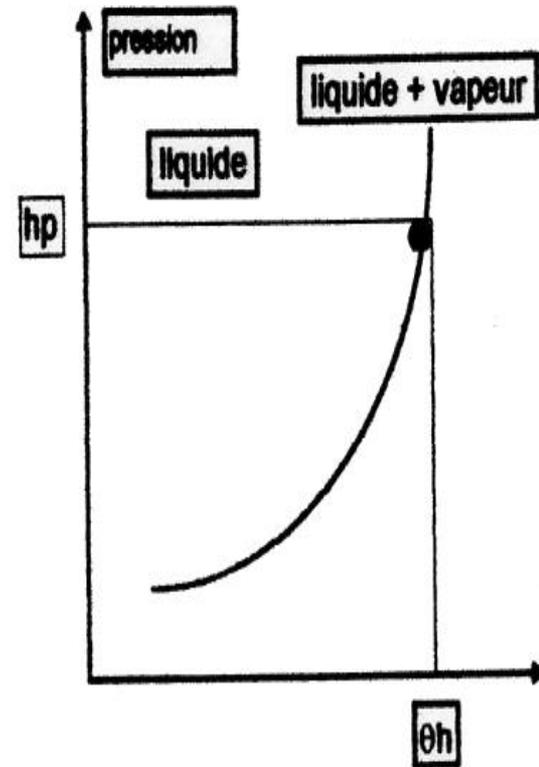
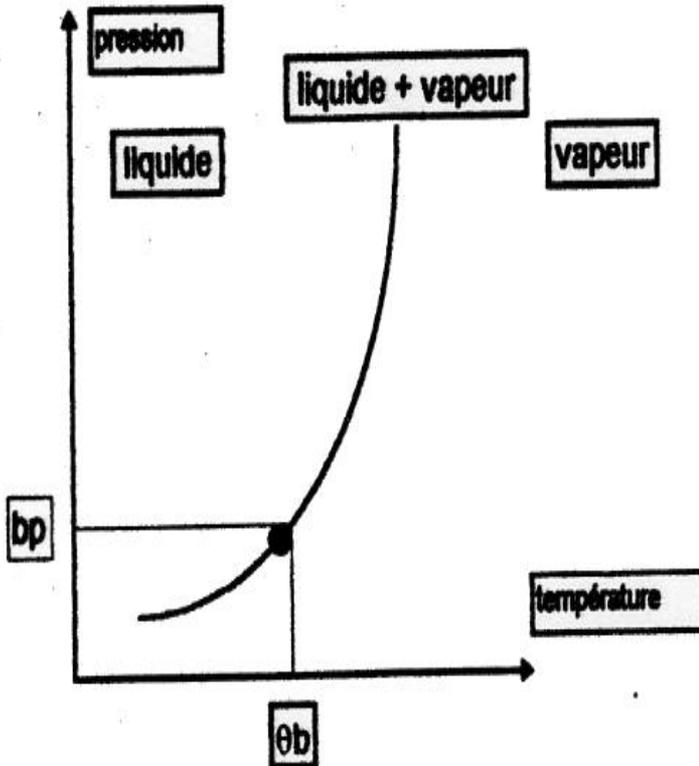
2°) si déplacement de matière, notion de débit massique (qm) qm = m / t
 conséquence :

$$P = qm \cdot cp \cdot \Delta\theta \quad \text{car } Q / t = P$$

Chaleur latente

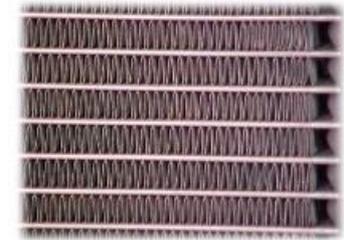


Relation pression température: tension de vapeur saturante



6 Particularité d'une machine frigorifique

Problème d'échange thermique



Problème de mécanique des fluides





giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Quelles alternatives au froid mécanique ?
Do some alternatives to mechanical cold exist ?

Leur utilisation envisageable (en particulier en ASS) ?

Their use in food supply chain is it possible (especially in SSA) ?

- Froid évaporatif
- Froid solaire
- Le stockage de froid.
- Autres alternatives
- Evaporative cooling
- Solar refrigeration
- Cold storage
- Rupture technologies

Le froid évaporatif

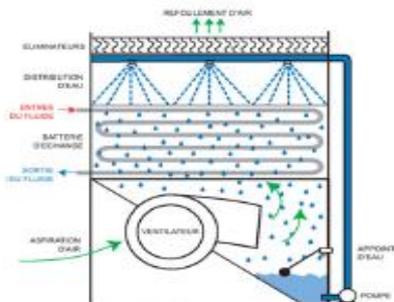
Evaporative cooling

Principe :

Faire évaporer de l'eau dans l'air sec produit (beaucoup) de froid
(2 500 kJ kg⁻¹ d'eau évaporée)

Water evaporation in dry air produce cold (2 500 kJ kg⁻¹)

Utilisé pour les tours de refroidissement, la présentation des feuillus à la vente et dans certains cas comme aide au refroidissement des carcasses
Used in cooling towers, display of vegetables and in some cases as an help for rapid cooling of carcasses



Condenseur évaporatif
Evaporative condenser



Brumisation des salades
Vegetable mist chilling



Brumisation des carcasses de porc
Pork carcasses mist chilling

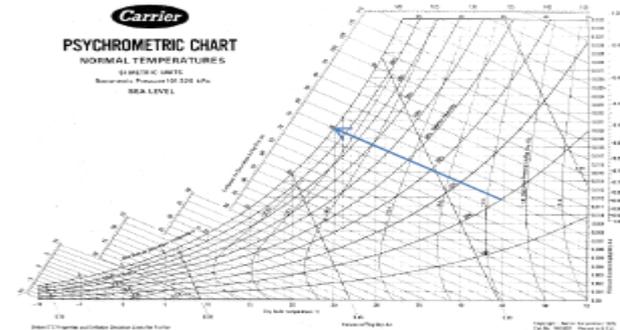
Le froid évaporatif

Evaporative cooling

Limites / limits

Les niveaux de températures atteintes restent loin des niveaux de températures attendus en agro alimentaire

Obtained temperature levels are very far from the expected temperature required for food preservation



Température (°C)	Humidité (%)	Eau vaporisée (g / kg d'air)	Temp. Finale (°C)
45	20	8,31	25,2
45	90	0,82	43,2
30	20	5,88	15,7
30	90	0,6	28,5

Le froid évaporatif Evaporative cooling

Conclusion :



- Le froid évaporatif ... pour une chaîne rafraîchie (pas du froid) ... peut-être quelques jours de DPC gagnés?
Evaporative cooling for a refreshed supply chain (not a cold chain) ... possibly some days of saved shelf life ?
- Efficacité à démontrer (humidités élevées, températures médianes) sur les produits d'origine végétale
Efficiency to be demonstrated (high relative humidity, medium temperature) on fruit and vegetable
- Inenvisageable pour les produits d'origine animale.
Impossible to envisage on meat products



Le froid solaire Solar refrigeration



Solaire thermique conventionnel couplé à une machine à sorption (production de froid à partir de chaleur)
Conventional solar energy coupled with a sorption machine (cold production from an heating source)

Les bas niveaux de températures obtenus (70-90°C) limitent les performances de la machine ($\approx 10 \text{ m}^2$ de panneaux pour 1 kW frigo, (soit $\frac{1}{2}$ terrain de foot pour 100 kW)
The low temperature level obtained (70 – 90°C) limits the performances if the machine ($\approx 10 \text{ m}^2$ of panels to produce 1 kW refrigeration capacity)

... Avec le problème de la gestion de l'intermittence de la production.
... with the question about the management of the intermittence of the production

Le froid solaire

Solar refrigeration



Solaire à concentration (toujours couplé à une machine à sorption)

Focused beam solar energy (coupled with a sorption machine)

Température de régénération élevés (200 – 250°C, voire plus)

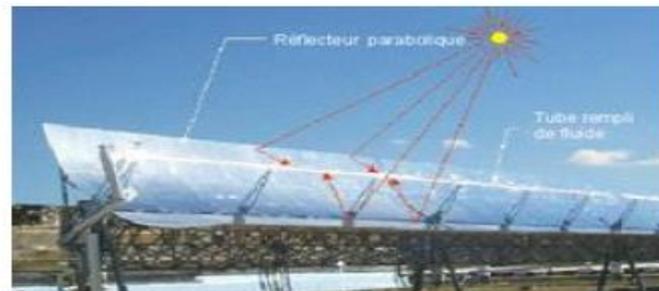
Highest regeneration temperature (200 -250°C, even over)

⇒ Meilleurs rendements

... mais très sensibles à la météo (nébulosité) et à l'intermittence de la production

⇒ Better efficiencies

...but very sensitive to the meteorological conditions (clouds) and to the intermittence of the production



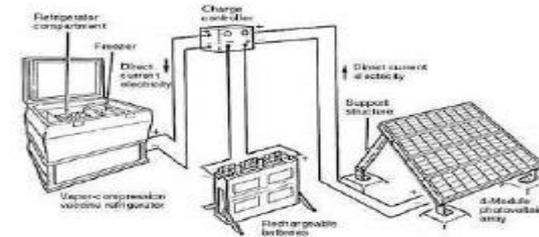
Le froid solaire

Solaire photovoltaïque Photovoltaic

TBT (12 V) ou BT (220 V)

Relativement moins sensibles à la nébulosité
Less sensitive to the clouds

Gestion de l'intermittence de la production
Management of intermittence of the production



Cout investissement
(surtout pour TBT)
Surface des panneaux

Investment costs
Surface of photovoltaic panels





giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Le froid solaire Solar refrigeration

Conclusion

- Quelques applications intéressantes
Some interesting applications
- Actuellement réservé aux petites puissances
At present, reserved for small applications
- La gestion de l'intermittence de la production complexifie le problème et nécessite le recours au stockage d'énergie (elec, froid, ...)
Management of the intermittence of the production requires storage facilities (electricity, cold, ...)

Le stockage de froid Cold storage

Matériaux à haute inertie thermique High thermal inertia materials



Idée / basics

- Faire tourner les machines de froid lorsque l'énergie est disponible
Run the refrigeration machines while energy is available (and/or cheap)
- Stocker le froid dans des matériaux spécifiques (MCP)
Store the produced cold inside adequate materials (PCM)
 - Glace écaillée (dry ice)
 - Bacs à eau glacée (water ice)
 - Coulis de glace (ice slurries)
 - Coulis d'hydrate (hydrates slurries)
 - MCP encapsulés (encapsulated PCM)
- Utiliser le froid selon besoins
Restore cold when you need it

} Lab. domain

Le stockage de froid Cold storage

Matériaux à haute inertie thermique High thermal inertia materials

- ⇒ **Technicité**
Technicity
- ⇒ **Couts d'investissement (x2 à x4)**
Investement costs
- ⇒ **Gestion des stocks de froid**
Storage management



Herse de bac à glace
Ice on tube cold storage device



Silo de stockage de coulis
(40 kWh m⁻³)
Ice slurry storage silo

Le stockage de froid Cold storage



Stockage de froid basse température Low temperature cold storage

Night wind project again ...

Idée / basics

- Faire tourner les machines de froid lorsque l'énergie est disponible
Run the refrigeration machines while energy is available (and/or cheap)
- Stocker le froid dans des chambres froides (négatives) en laissant la température descendre plus bas que nécessaire (-35 / -38°C)
Store cold into the cold room (negative temperature), decreasing the temperature much lower than necessary (-35 / -38°C)
- Laisser les températures dériver (à la hausse) lorsque l'énergie n'est pas disponible
Let the temperature gently increase while energy is not available



giz
Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (DI) GmbH

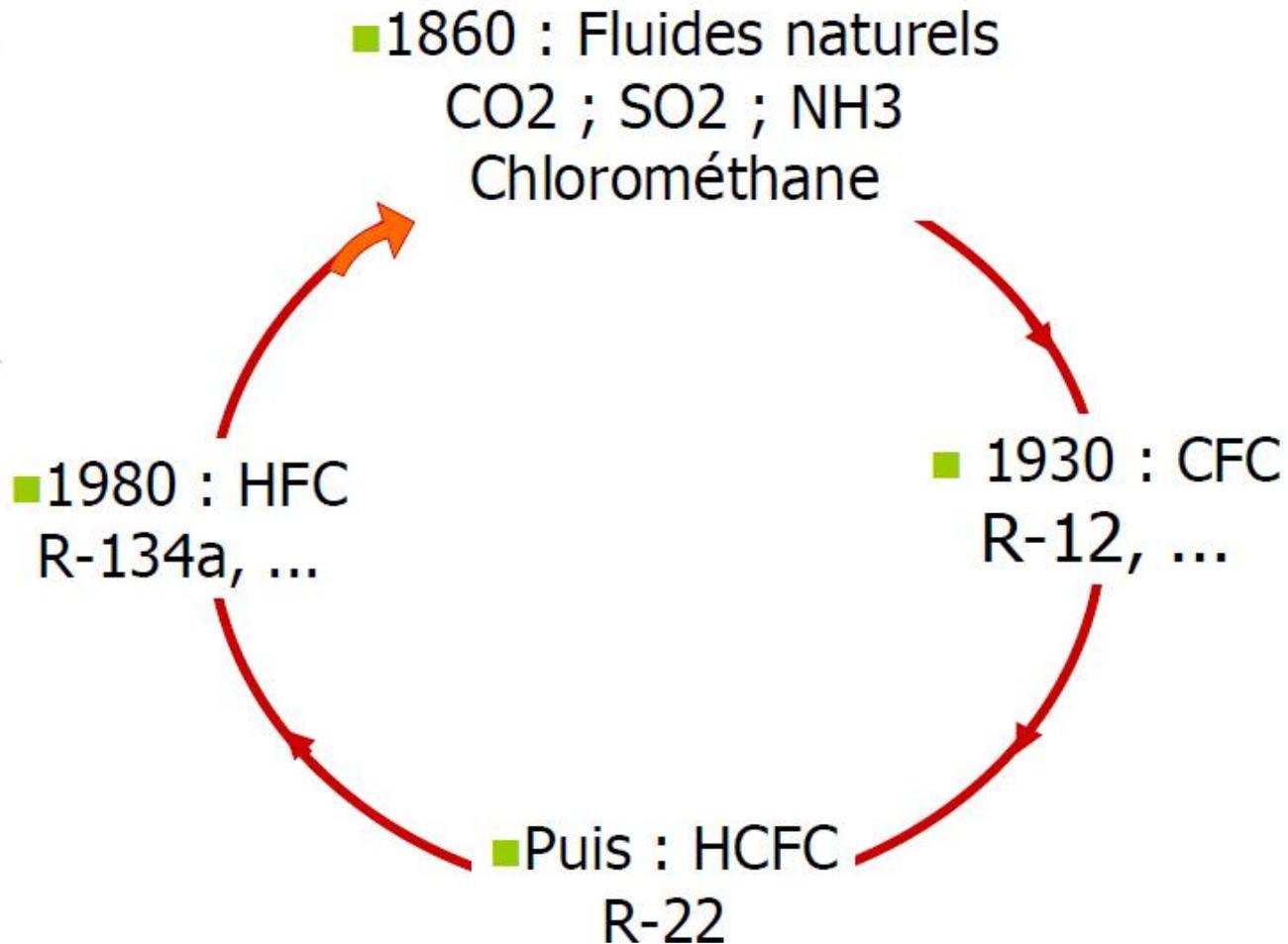


Le stockage de froid Cold storage

Conclusion

- Pour stocker le froid, il faut en produire.
Cold storage requires cold production at first
- Des couts d'investissements (x 2 à x 4) et d'exploitation (+ 10 à + 20%) qui ne peuvent se justifier que sur des contraintes de cout et de disponibilité de l'énergie.
Investment costs (x 2 up to x4) and running expenses (+10 up to +20%) to be justified regarding the cost and the availability of energy.
- De bonnes idées, dès lors que les capacités de production de froid existent et que l'énergie est intermittente (et/ou chère)
Some good ideas, as soon as refrigeration facilities already exist and the energy is intermittent (and/or expensive)

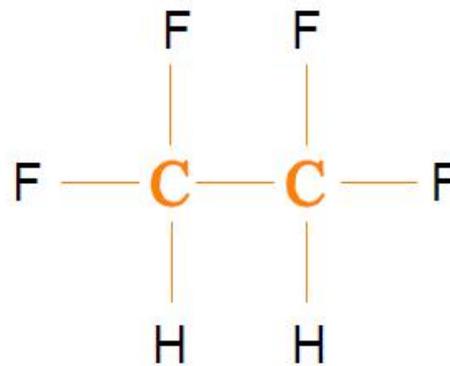
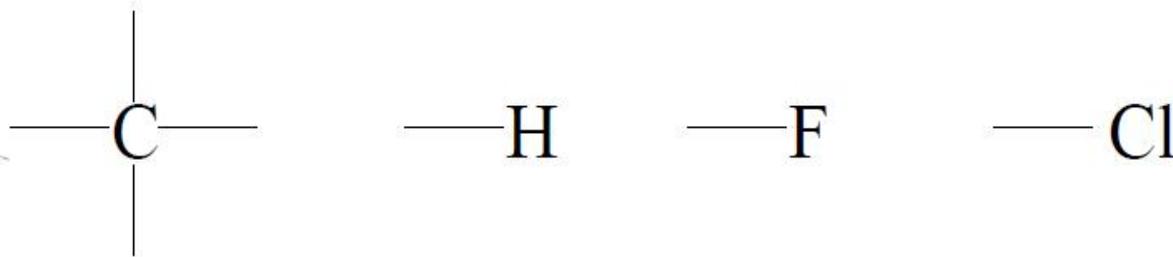
► Les frigorigènes



► Les frigorigènes

➡ Nomenclature

- Atomes : C, H, F, (Cl), Br,...





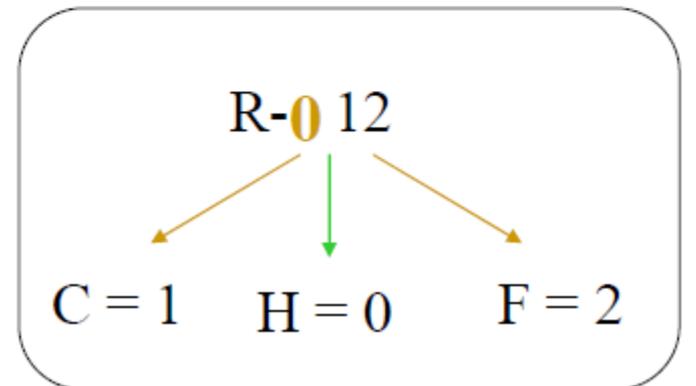
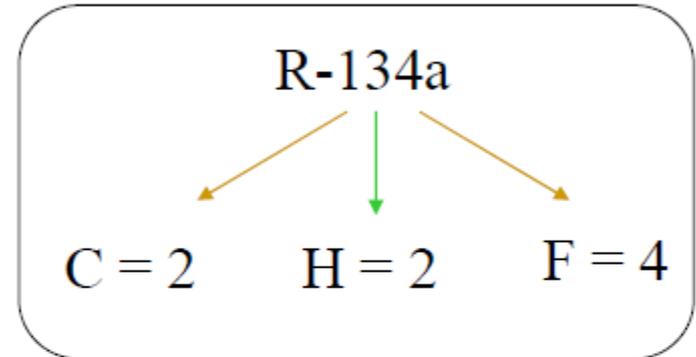
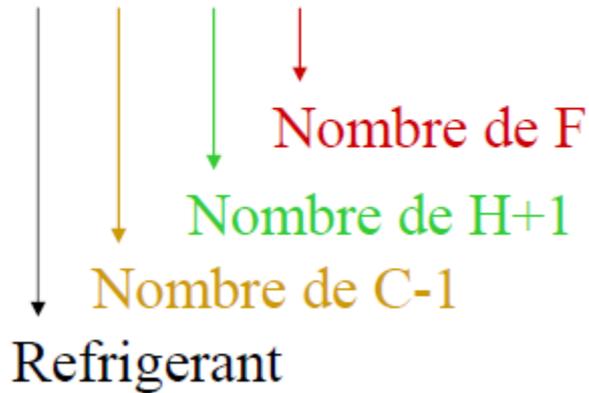
giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



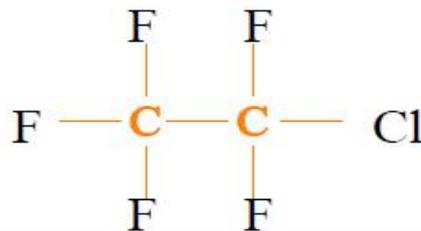
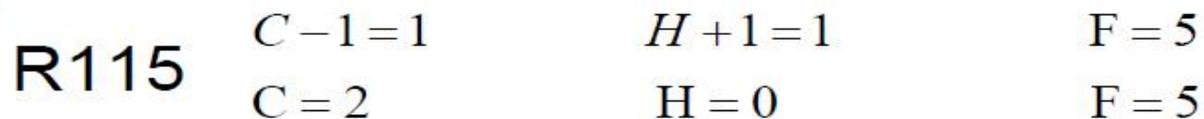
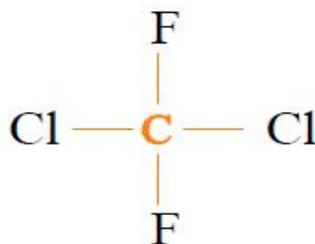
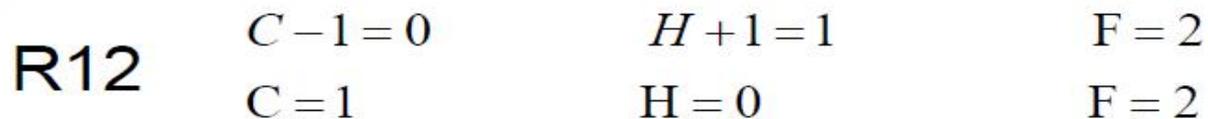
► Les frigorigènes

➡ Nomenclature

- C ; H ; F ; Cl
- R X Y Z



► Exemples



► Les frigorigènes

➡ Les composés inorganiques (Série 700)

La règle consiste à rajouter la masse molaire du fluide à près le chiffre 7

NH_3 : M = 14 + 3

R-717

H_2O : M = 2 + 16

R-718

CO_2 : M = 12 + 32

R-744

NH_3 (60%)+Diméthyléther (40%) : M = 12 + 32

R723

Applications	Remarques	Fluides existants	Fluides alternatifs
Froid domestique	<ul style="list-style-type: none"> • nécessité de l'amélioration des compresseurs • mise en place de nouveaux lubrifiants 	R12	R134a R600a (isobutane)
Froid commercial	<ul style="list-style-type: none"> • petites et moyennes puissances 1 à 10 kW • froid positif 	R12 R502 R22	R134a, R404a R404a R404a, R134a
Procédés agro-alimentaires et les autres procédés industriels	problème de surcoût pour l'utilisation de l'ammoniac	ammoniac R22 R502	ammoniac R404a
Groupes refroidisseurs d'eau			
P < 10 kW		R22	ammoniac
100 kW < P < 1 MW		R22	R407c, R410a, R404a
P > 1 MW		R22	pas de remplaçant R134a
Climatisation AIR/AIR	Changement du lubrifiant	R22	R410a, R407c, R134a



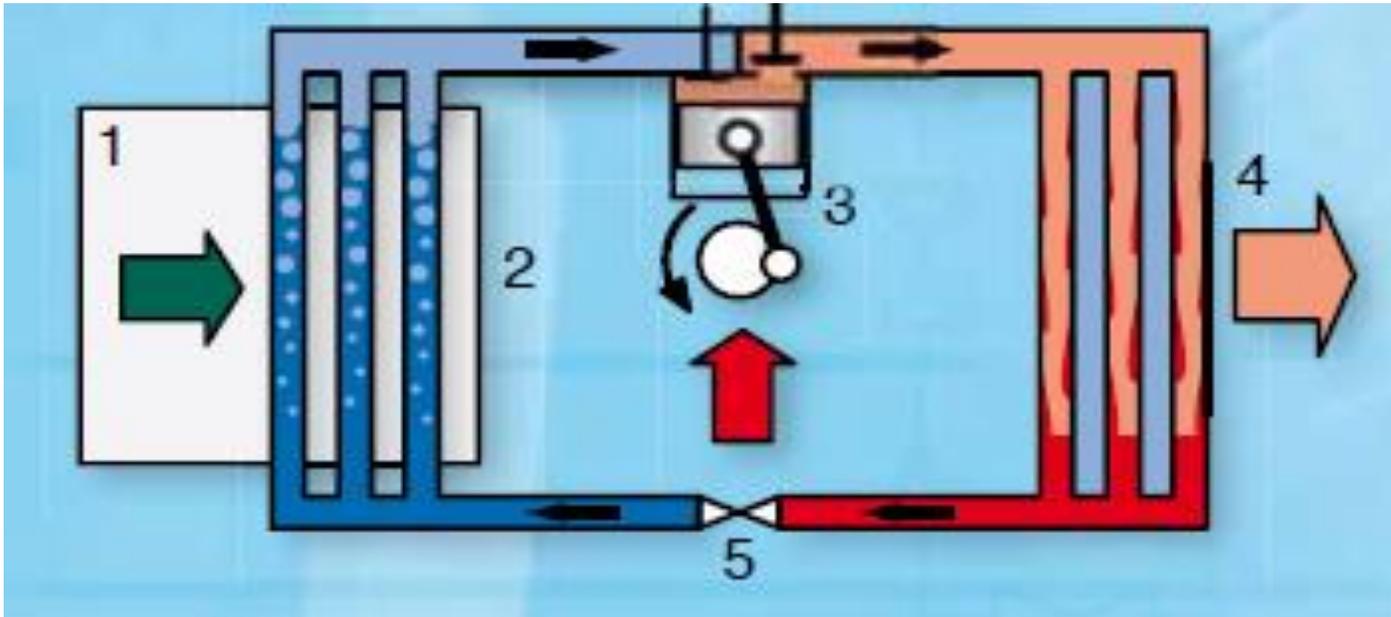
PRINCIPES DE LA PRODUCTION DU FROID

Différents types de la production du froid

- ▶ Installation frigorifique à compression
- ▶ Installation frigorifique à gaz froid (principe de Stirling)
- ▶ Installation frigorifique à absorption
- ▶ Production du froid thermoélectrique (élément Peltier)
- ▶ Générateur de froid à Vortex

INSTALLATION FRIGORIFIQUE A COMPRESSION

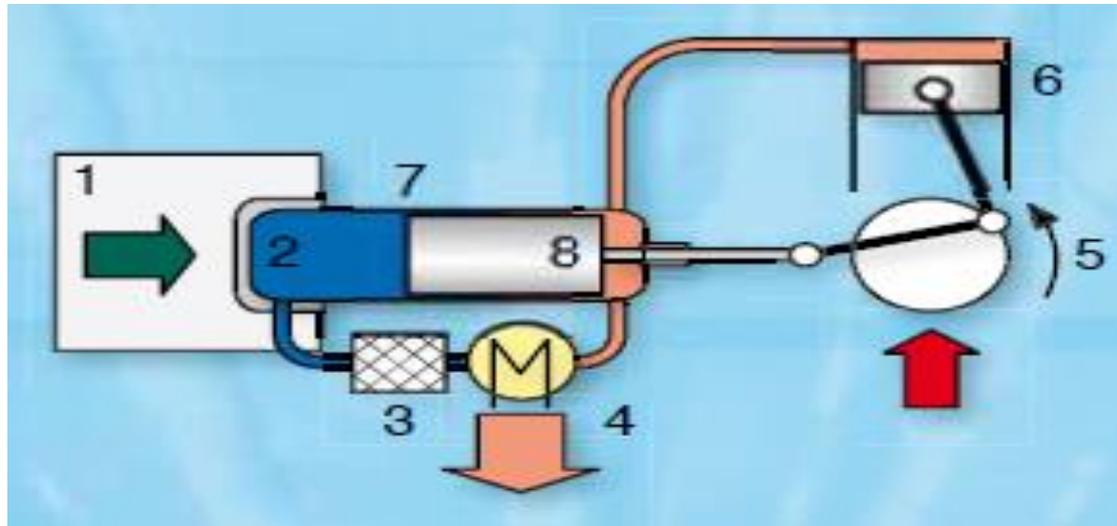
- ▶ L'installation frigorifique à compression est l'installation qui est la plus fréquemment utilisée pour la production du froid. Ici on met à profit l'effet consistant en ce que l'évaporation d'un liquide s'accompagne d'une forte absorption de chaleur. Lors de la condensation de la vapeur, la chaleur est de nouveau émise.



- ▶ Dans le cas le plus simple, une installation frigorifique à compression se compose d'un évaporateur **2** installé dans la pièce devant être refroidie **1**, d'un compresseur **3**, d'un condenseur **4** et d'un élément d'expansion **5**.

INSTALLATION FRIGORIFIQUE A GAZ FROID

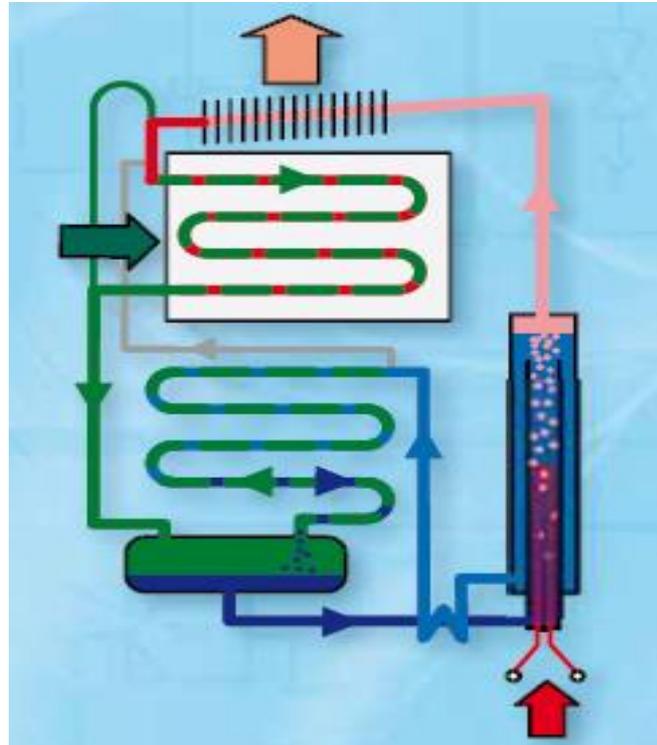
- ▶ L'installation frigorifique à gaz réfrigérant opérant selon le principe de Stirling est utilisée pour produire des températures très basses. On peut l'utiliser pour la condensation de l'air ou le refroidissement de caméras à infrarouge.
- ▶ L'installation frigorifique à gaz froid correspond au moteur Stirling connu, sauf que le sens de la rotation est inversé. Ainsi le sens du passage du cycle est inversé et une machine motrice devient une machine productrice de travail comme pompe à chaleur.



- *L'installation frigorifique à gaz froid se compose d'un cylindre moteur 6 et d'un cylindre de refoulement 7. Dans le cylindre moteur, le gaz de travail (très souvent de l'hélium) est tantôt comprimé tantôt étendu. Le gaz chaud comprimé émet sa chaleur dans l'échangeur de chaleur 4. Lors de l'expansion, le gaz se refroidit et absorbe sur le côté froid 2 du cylindre de refoulement de la chaleur de la pièce devant être refroidie 1. Le piston de refoulement 8 et les pistons moteurs 6 sont déplacés en un déphasage correspondant par une commande manivelle 5. Le récupérateur 3 augmente le rendement.*

INSTALLATION FRIGORIFIQUE A ABSORPTION

- ▶ Dans le cas d'une installation à absorption, on utilise de l'ammoniaque (NH_3) comme agent réfrigérant. Comme dans une installation frigorifique à compression, l'ammoniaque liquide s'évapore dans un évaporateur, se chargeant de chaleur. Dans un absorbeur, l'ammoniaque en forme de vapeur est ensuite dissoute dans de l'eau. La solution ammoniacale est chauffée, de telle sorte que se dégage de l'ammoniaque sous forme de vapeur. Dans un condenseur, la vapeur ammoniacale est de nouveau condensée pour en faire de l'ammoniaque liquide.



- vapeur d'ammoniaque*
- ammoniaque liquide*
- solution d'ammoniaque pauvre*
- solution d'ammoniaque riche*
- hydrogène*
- hydrogène et vapeur d'ammoniaque*

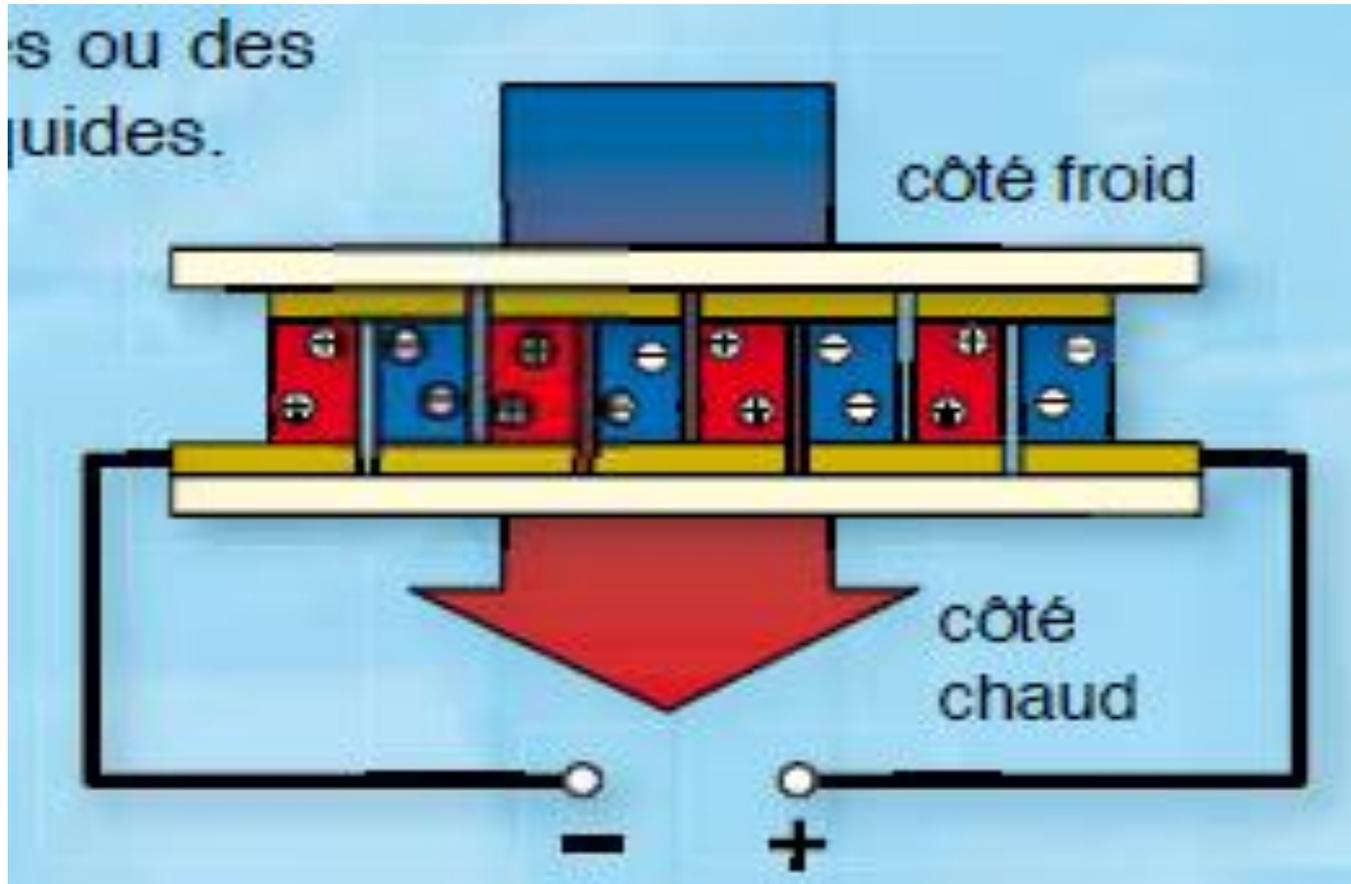


giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



INSTALLATION FRIGORIFIQUE THERMOELECTRIQUE

- ▶ Les installations frigorifiques thermoélectriques opèrent avec l'effet Peltier. Ce mode de fonctionnement correspond à l'inversion du fonctionnement du thermocouple que l'on connaît de la mesure de la température. Dans le cas de l'élément Peltier, on utilise un matériau semiconducteur spécial.
- ▶ On peut obtenir des températures très basses, le rendement diminuant cependant fortement avec une augmentation de la différence de température.



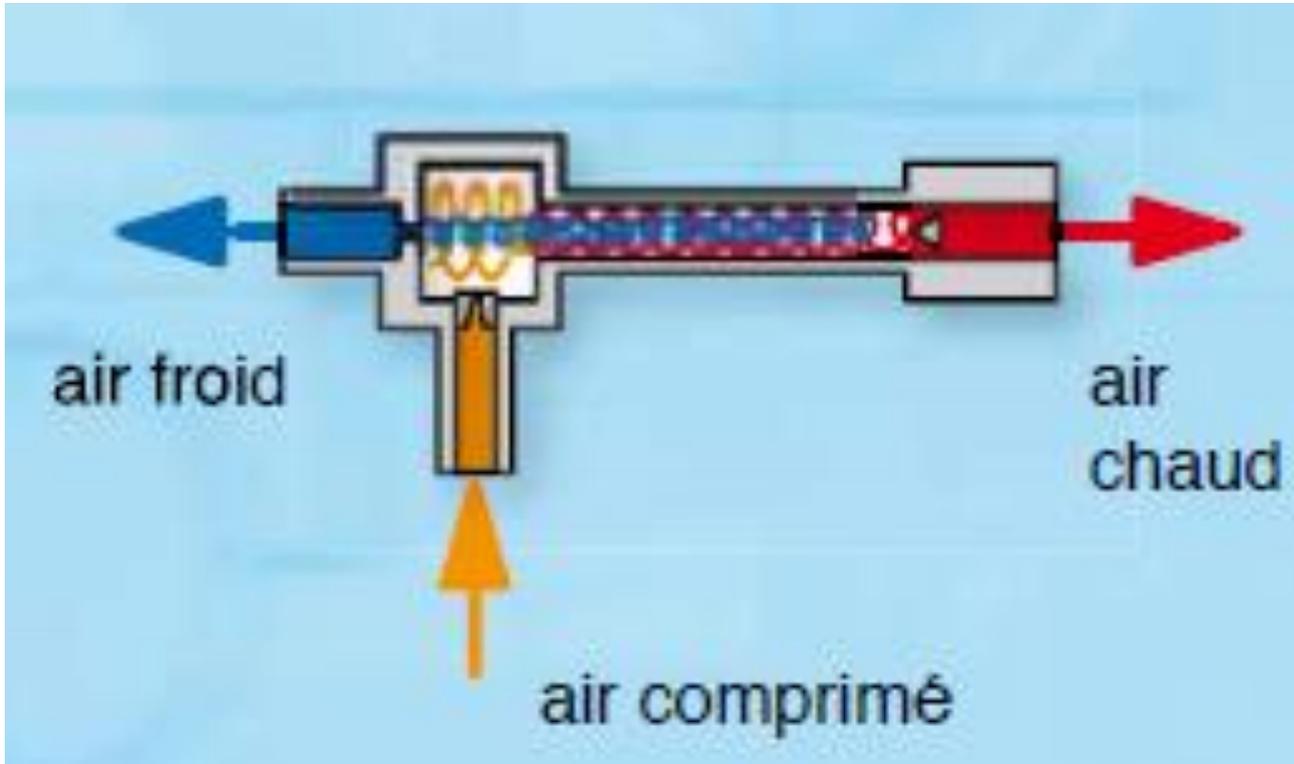


giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



GENERATEUR DE FROID A VORTEX

- ▶ Le générateur de froid à Vortex fait partie des machines frigorifiques exceptionnelles. Ici on produit un flux d'air froid et chaud à partir d'un flux d'air comprimé venant de la température ambiante. L'air comprimé entre de manière tangentielle dans une chambre à Vortex et ici, il est pris dans une rotation rapide. Au centre du Vortex, il se forme un flux d'air froid, alors que la couche extérieure du Vortex se réchauffe. L'air froid est retiré au centre et peut servir au refroidissement.





giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Évaluer l'efficacité de la production frigorifique



giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



- ▶ L'efficacité de la production frigorifique
- ▶ Le bilan énergétique annuel
- ▶ Le diagnostic d'une installation existante
- ▶ La rentabilité énergétique des interventions de maintenance
- ▶ L'analyse de la puissance frigorifique installée
- ▶ L'intérêt d'une récupération de chaleur au condenseur
- ▶ La technique du free-chilling peut-elle s'appliquer ?
- ▶ Y a-t-il intérêt à placer un stockage de froid ?



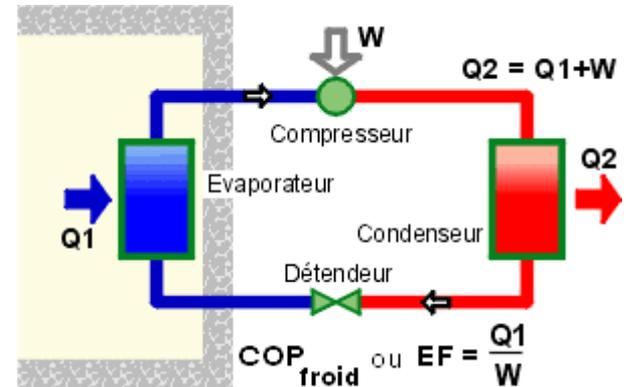
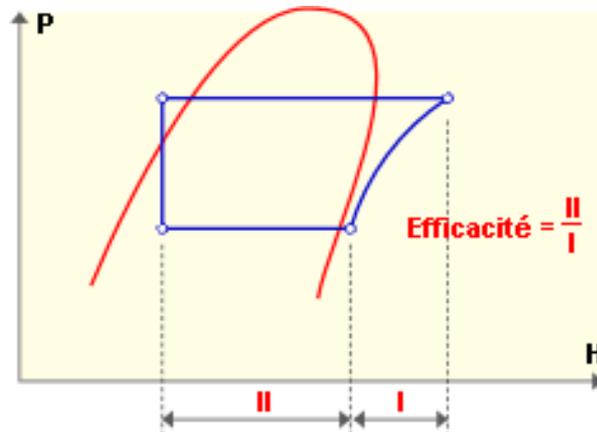
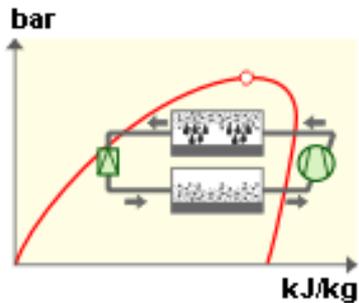
giz
Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



L'efficacité de la production frigorifique

- ▶ De l'analyse du fonctionnement thermodynamique de la machine frigorifique, on déduit son efficacité énergétique instantanée ou COP. C'est le rapport entre la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur et la quantité d'énergie électrique totale absorbée par l'installation, soit principalement le compresseur mais également les équipements annexes (ventilateurs, pompes de circulation d'eau, ...).

- ▶ On trouve dans les catalogues des valeurs de COP de l'ordre de 2,5 à 5. Plusieurs méthodes d'évaluation de la performance énergétique d'un groupe de froid sont disponibles dont la lecture des puissances sur la plaque signalétique et la mesure des différences de température aux échangeurs.



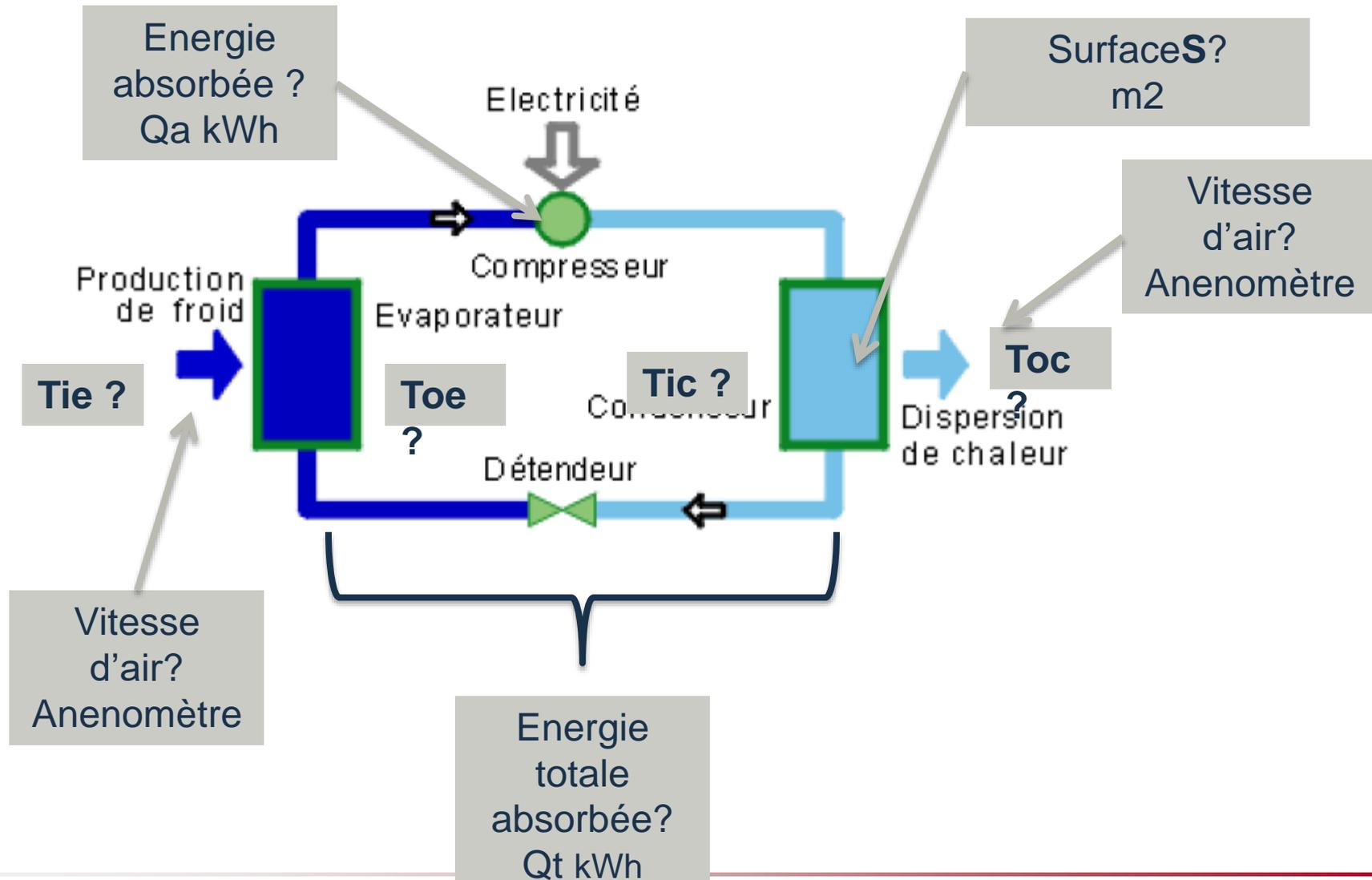
Quelle valeur de COP atteindre ?

Type d'équipement	COP min. recommandé (kW _r /kW _e)
Climatiseurs de fenêtre	2,8
Split systèmes	
- Jusqu'à 4 kW _r	2,8
- Supérieur à 4 kW _r	3
Conditionneurs d'air monobloc	
<i>A refroidissement par air</i>	
- Jusqu'à 10 kW _r	2,5
- Supérieur à 10 kW _r	2,9
<i>A refroidissement par eau</i>	3,5
Groupes de production d'eau glacée à pistons	
<i>A refroidissement par air</i>	
- Jusqu'à 100 kW _r	3
- Supérieur à 100 kW _r	3
<i>A refroidissement par eau</i>	
- Jusqu'à 10 kW _r	3,7
- Supérieur à 10 kW _r	4
Groupes de production d'eau glacée à vis	
<i>A refroidissement par air</i>	4,5
<i>A refroidissement par eau</i>	
- Jusqu'à 800 kW _r	4,6
- Supérieur à 800 kW _r	5
Groupes de production d'eau glacée centrifuges	
<i>A refroidissement par air</i>	
- Jusqu'à 800 kW _r	3,8
- Supérieur à 800 kW _r	3,8
<i>A refroidissement par eau</i>	
- Jusqu'à 800 kW _r	4,5
- Supérieur à 800 kW _r	4,7

Conditions standard pour climatiseurs, splits et systèmes monoblocs à refroidissement par air (standard ARI 510) : conditions intérieures = 27° C, 50% HR ; conditions extérieures = 35° C bulbe sec et 24° C bulbe humide.

Conditions standard pour groupes de production d'eau glacée à refroidissement par eau (standard ARI 550-92) : température départ / retour eau glacée = 6,7° C / 12,2° C ; température entrée/sortie eau de condensation = 29,4° C / 35,0° C.

Comment mesurer le COP



COP

- Puissance condenseur

$$Q_c = 1.2 \times S \times V \times (T_{sc} - T_{ec}) \text{ [kW]}$$

- Puissance consommée

$$= Q_c / t \text{ [kW]}$$

- Puissance totale

$$= Q_t / t \text{ [kW]}$$

- Puissance évaporateur, COP_{froid} and COP_{chaud} peuvent facilement être calculés .

Le bilan énergétique annuel

- ▶ Si l'estimation ponctuelle du COP de la machine frigorifique n'est déjà pas simple, réaliser le bilan énergétique annuel de l'appareil est vraiment complexe.
- ▶ Qui consomme de l'énergie ?
 - le compresseur C_c ,
 - les auxiliaires permanents C_p (ventilateurs, pompes, etc.),
 - les auxiliaires non permanents C_{np} (résistances de carter, etc.),
 - le dégivrage éventuel C_d ;
 - les pertes en réseau qui augmentent les besoins de froid, donc la durée de fonctionnement du compresseur (consommation intégrée dans c_c).



Le diagnostic d'une installation existante

- ▶ Les signes de surconsommation énergétique d'une installation frigorifique :
 - L'augmentation des temps de fonctionnement du compresseur, dont les causes sont :
 - soit le manque de fluide frigorigène,
 - soit l'encrassement des échangeurs (condenseur et évaporateur),
 - soit encore le mauvais état du compresseur.

Le placement d'un compteur horaire de fonctionnement sur l'alimentation du compresseur est un petit investissement qui permettra de détecter une dérive de consommation.



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



**BUREAU
VERITAS**

- La diminution de la température d'évaporation, dont la cause principale est l'encrassement des échangeurs.
- L'augmentation du nombre de démarrages pour les petites installations (compresseurs hermétiques des split-systems par exemple) ou du nombre de cylindres ou de compresseurs en service. Ceci est généralement dû à un encrassement du condenseur, à des fuites de réfrigérant ou à une mauvaise alimentation de réfrigérant liquide des détendeurs.



giz
Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



BUREAU
VERITAS

Les tests à effectuer

- Soit à donner des indications sur un fonctionnement anormal de l'installation (mesure du courant absorbé en fonctionnement continu et comparaison avec le courant nominal, comptage des heures de fonctionnement, mesure du débit de l'eau de la tour de refroidissement et du débit d'eau glacée,...).
- Soit à vérifier **l'efficacité énergétique de l'installation frigorifique**, c'est-à-dire le rapport entre la puissance électrique absorbée et la puissance frigorifique fournie.

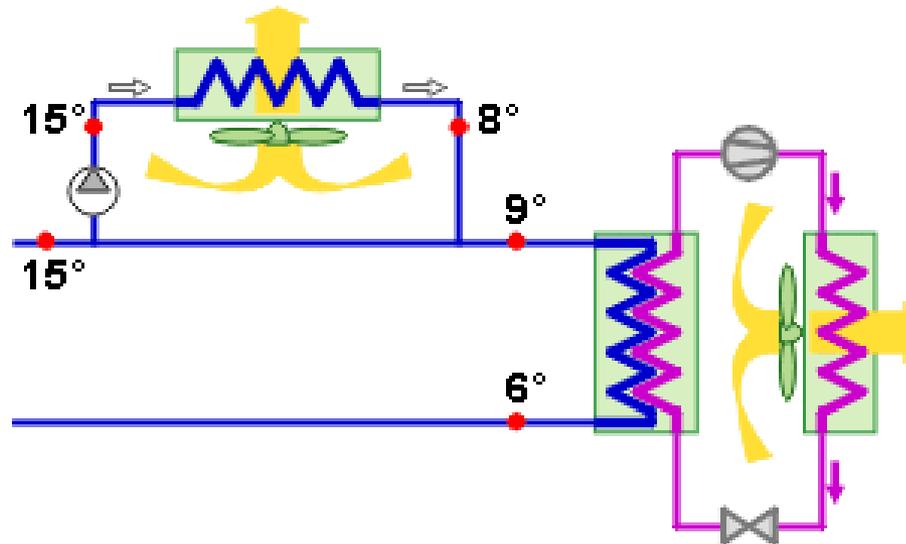


L'intérêt d'une récupération de chaleur au condenseur

- ▶ Une machine frigorifique extrait la chaleur excédentaire du bâtiment et la rejette à l'extérieur.
- ▶ Si des besoins de chauffage (de locaux, d'eau chaude sanitaire, ...) sont présents simultanément dans le bâtiment, il semble alors logique de tenter de récupérer la chaleur sur le condenseur de la machine frigorifique.
- ▶ le système DRV (Débit de Réfrigérant Variable) dispose d'une version avec récupération d'énergie apte à réaliser ce type de transfert.

La technique du free-chilling peut-elle s'appliquer ?

- ▶ Lorsque la température extérieure descend sous les ... 12° ...10° ..., l'eau est directement refroidie par l'air extérieur et la machine frigorifique est mise à l'arrêt



Y a-t-il intérêt à placer un stockage de froid ?

► Deux techniques sont possibles :

- insérer une bâche d'eau glacée dans le circuit (sorte de très grand ballon tampon),
- créer un stock de glace la nuit et la faire fondre en journée afin de refroidir l'eau glacée.



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



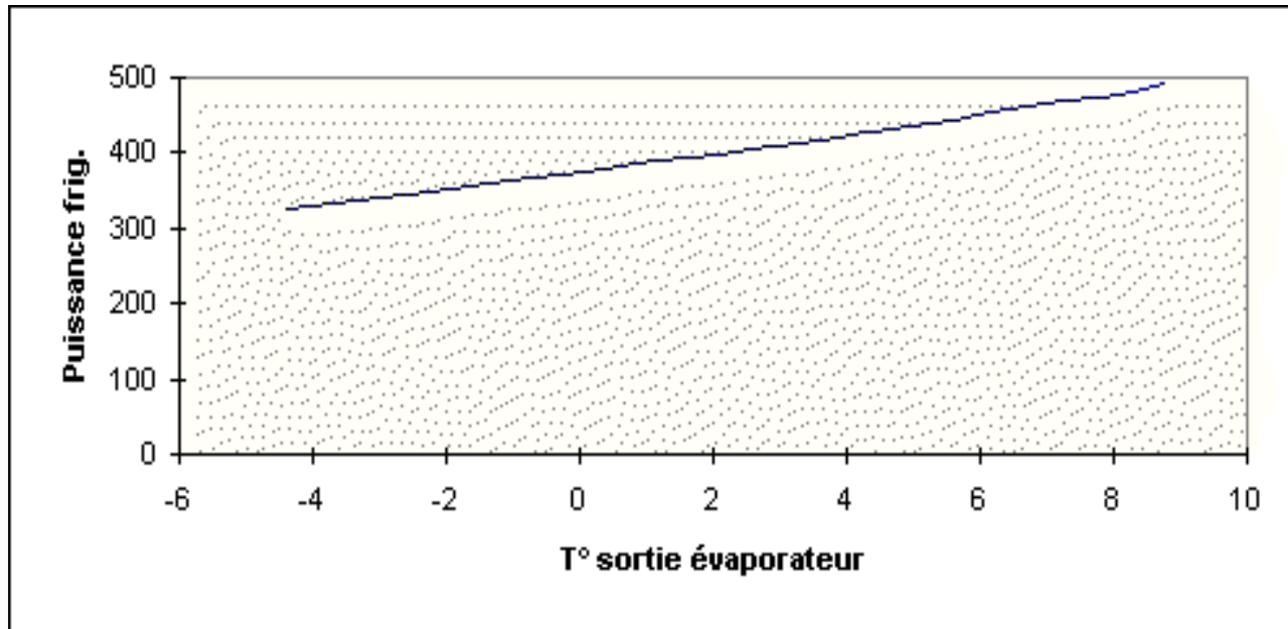
L'intérêt d'un stockage de froid

► Diminution de la facture électrique

- Le kWh frigorifique produit la nuit et/ou en dehors des heures de pointe revient nettement moins cher.
- Si la réserve de froid est utilisée au moment de la pointe horaire du bâtiment, les compresseurs peuvent être délestés, ce qui permet de réelles économies financières sur le coût de la pointe.

- Mais lorsque la machine frigorifique "fait de la glace", la température à l'évaporation descend. Elle travaille avec un moins bon rendement que lors du régime normal de préparation de l'eau glacée ! Ceci est partiellement contrebalancé par le fait que la température de condensation va également pouvoir diminuer, suite aux températures plus fraîches de la nuit.
- La puissance de la machine frigorifique descend à 60 % ... 70 % de sa valeur nominale lorsqu'elle prépare de l'eau glacée.

- Par exemple, voici l'évolution pour une machine particulière : la puissance lors de la charge de nuit est donc réduite à $324 \text{ kW} / 458 \text{ kW} = 71 \%$ de la valeur nominale.





► Diminution de la puissance frigorifique installée

- Pour les nouvelles installations, il y aura diminution de la puissance frigorifique installée, par étalement de la charge dans le temps, et donc diminution de l'investissement initial en machines frigorifiques et équipements annexes.
- Pour les installations existantes, on peut augmenter la charge frigorifique sans augmentation de la puissance électrique installée (c'est intéressant pour des bâtiments en rénovation dont on souhaite augmenter l'équipement bureautique, sans devoir augmenter la puissance du transformateur).



Réduction de l'encombrement des condenseurs/tours de refroidissement en toiture

- ▶ C'est un avantage lié à l'absence de placement d'une machine frigorifique supplémentaire, mais il faut prévoir la place du stockage lui-même...
- ▶ Le stockage thermique est volumineux et sera donc généralement limité à une part de la consommation journalière.





giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



► Réserve stratégique de froid en cas de rupture de la machine frigorifique

- possibilité d'un secours partiel (quelques heures seulement...) en cas de panne de la machine frigorifique ou d'interruption de la fourniture d'énergie électrique, seules les pompes étant alimentées par le groupe de secours. C'est une sécurité parfois recherchée pour les salles ordinateur ou télécommunication.

La rentabilité d'un stockage de glace

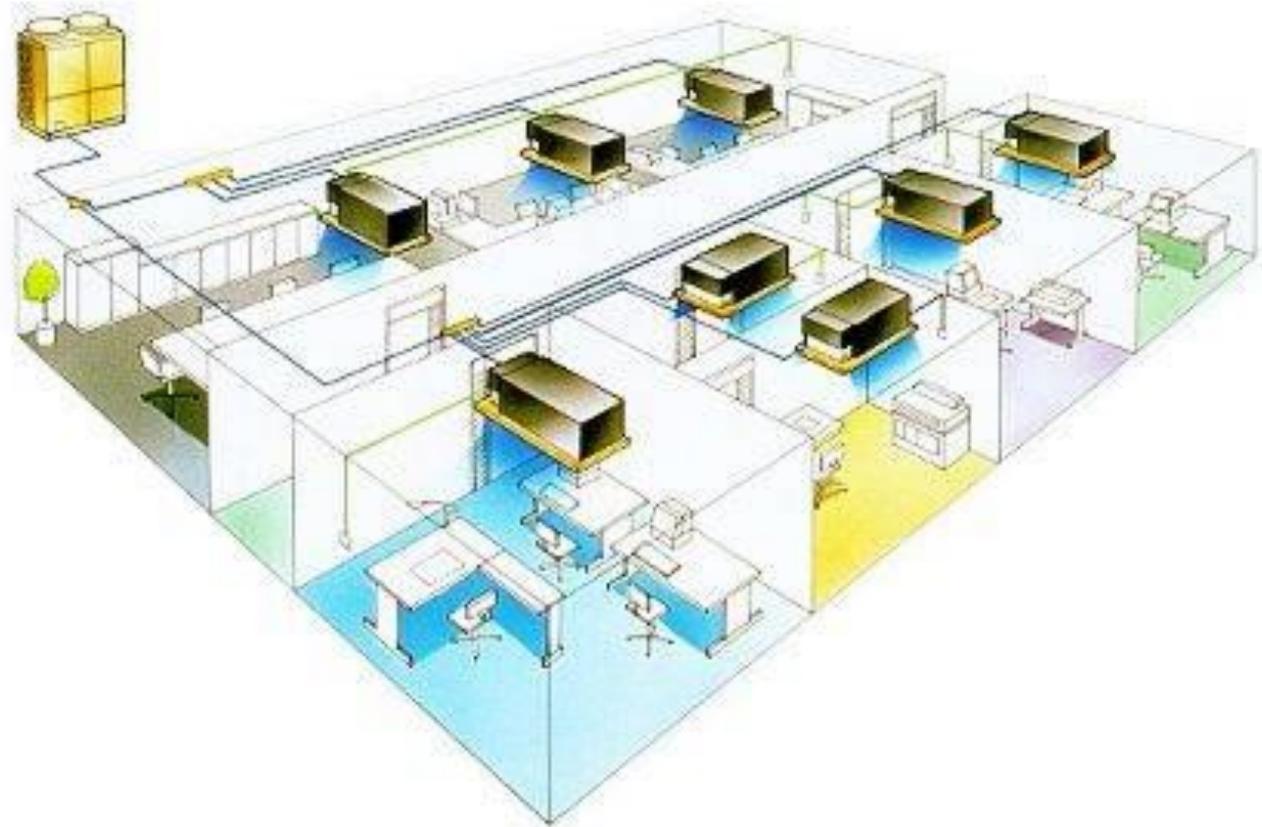
- ▶ La rentabilité d'un stockage de glace s'établit par le rapport entre le surcoût au niveau de l'installation frigorifique et l'économie financière réalisée.
- ▶ **Le surcoût** est estimé entre 20 et 30 % de l'installation frigorifique initiale. Cette estimation comprend :
 - Les bacs à glace : on peut compter 350 Dhs/kWh de stockage pour une petite installation de 2 000 kWh, 300 Dhs/kWh pour une installation de 5 000 kWh, 220 Dhs/kWh pour une belle installation de 10 000 kWh.
 - Les équipements annexes : pompes, échangeurs,...
 - L'installation de régulation plus complexe pour la gestion des cycles charge-décharge.
 - La déduction du prix de la machine frigorifique que l'on a pu économiser.



DRV

- ▶ On connaissait le principe de la "détente directe" (l'évaporateur de la machine frigorifique refroidit directement l'air dans le caisson de traitement d'air). Cette fois, on réalise la détente directe dans chaque local puisque le fluide réfrigérant est transporté jusqu'à l'échangeur du local qui sert d'évaporateur ! Ce n'est ni l'air ni l'eau qui circule dans les conduits, mais bien du fluide réfrigérant.

- ▶ A partir d'une unité extérieure, on peut alimenter jusqu'à 32 unités intérieures

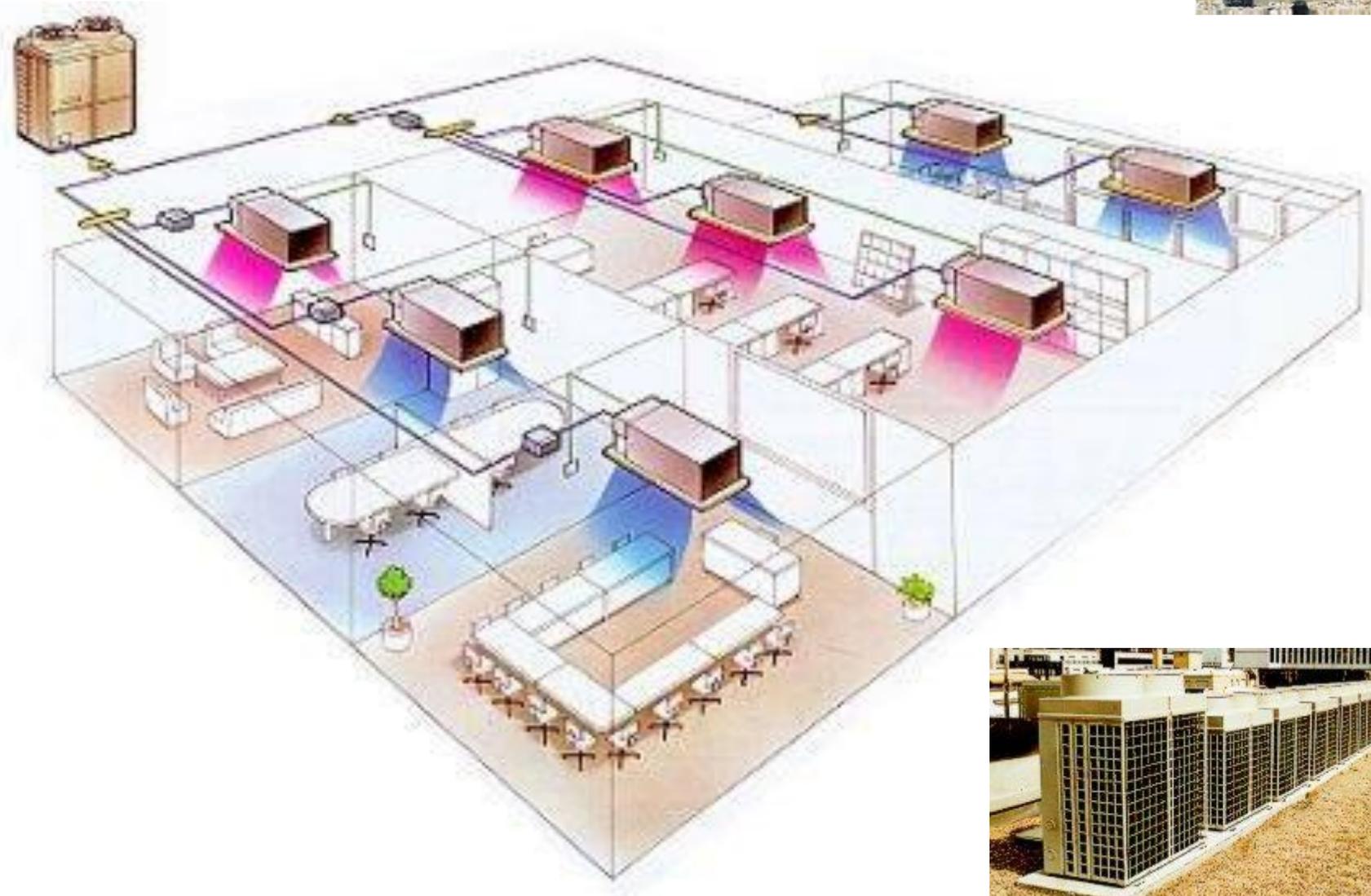




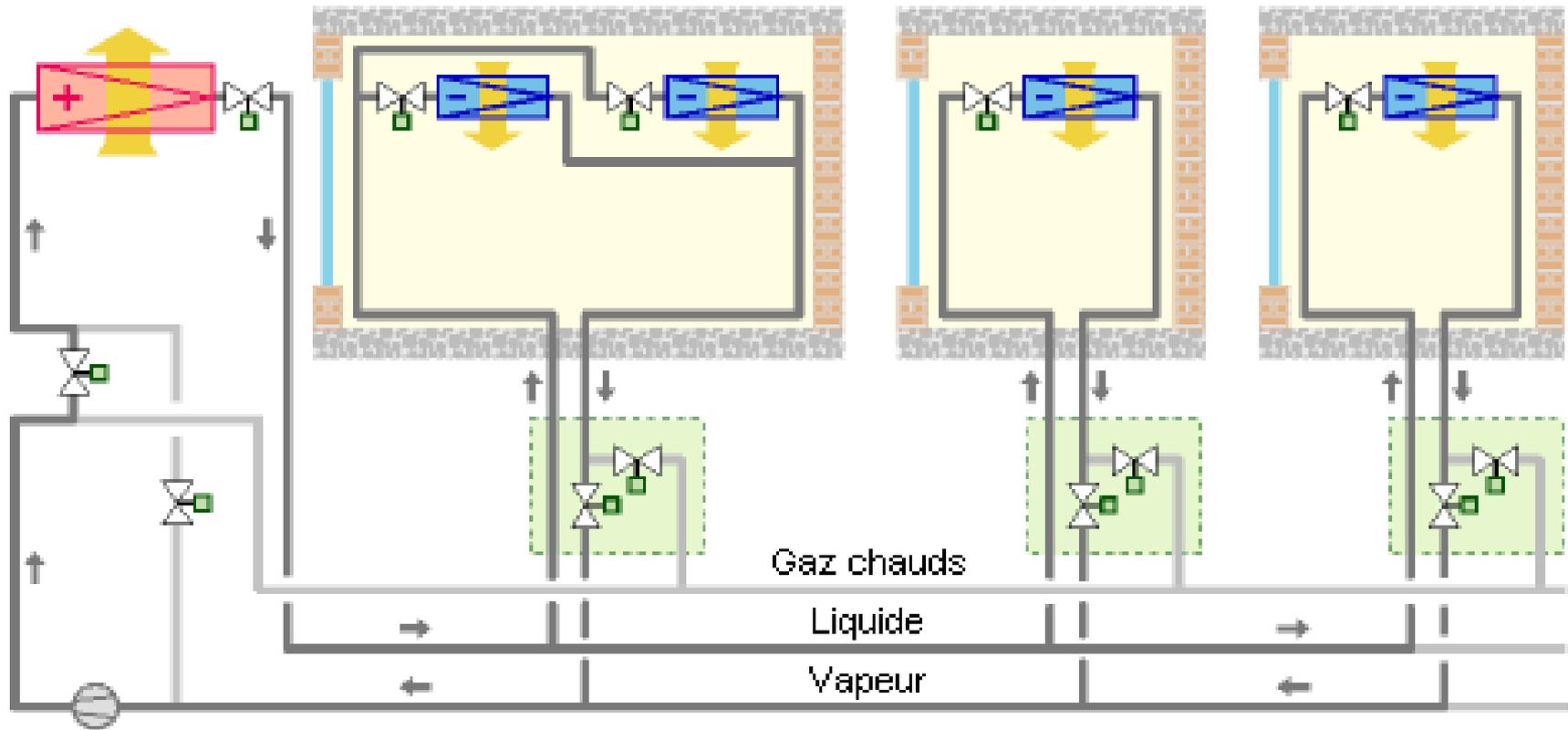
giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



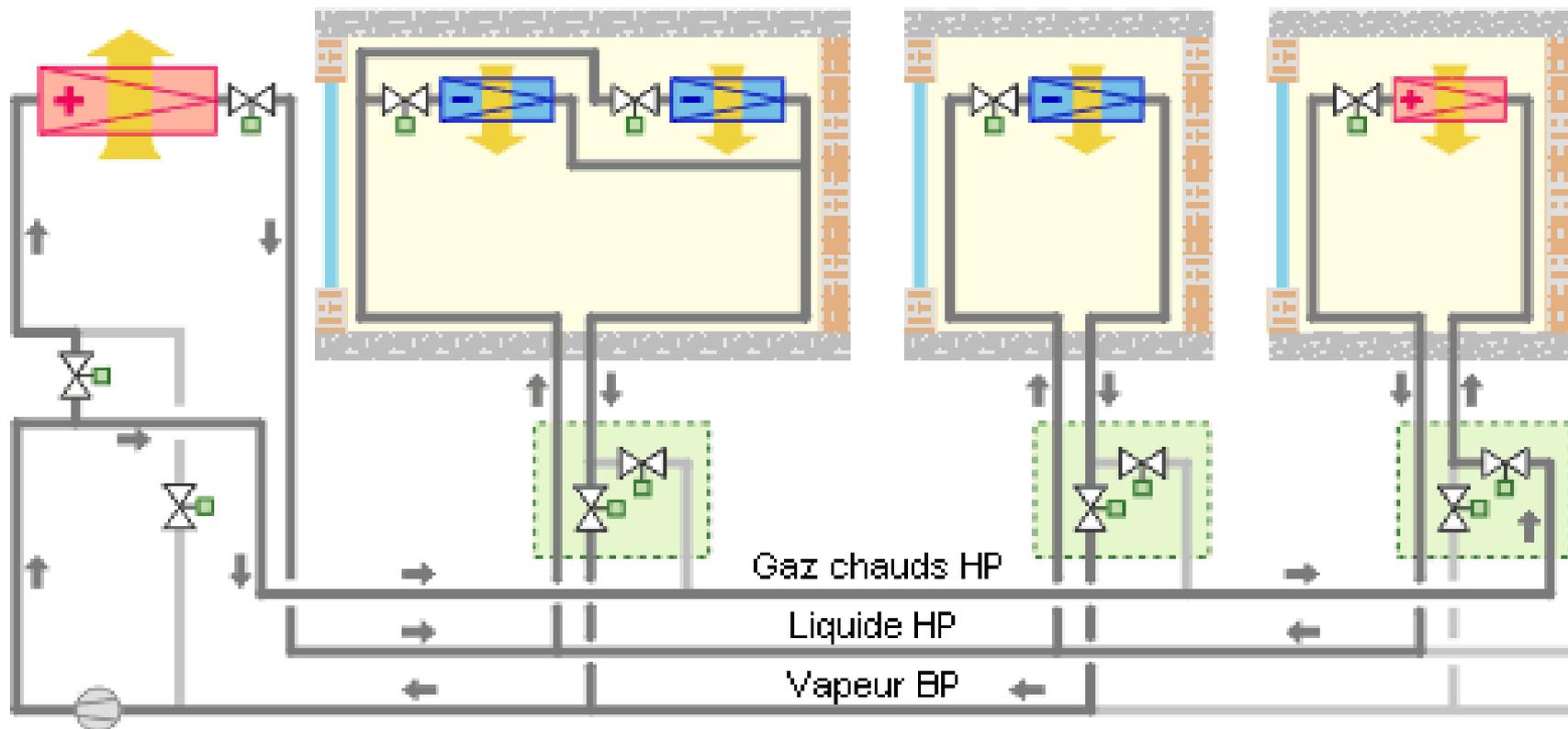
Froid et chaud simultanément



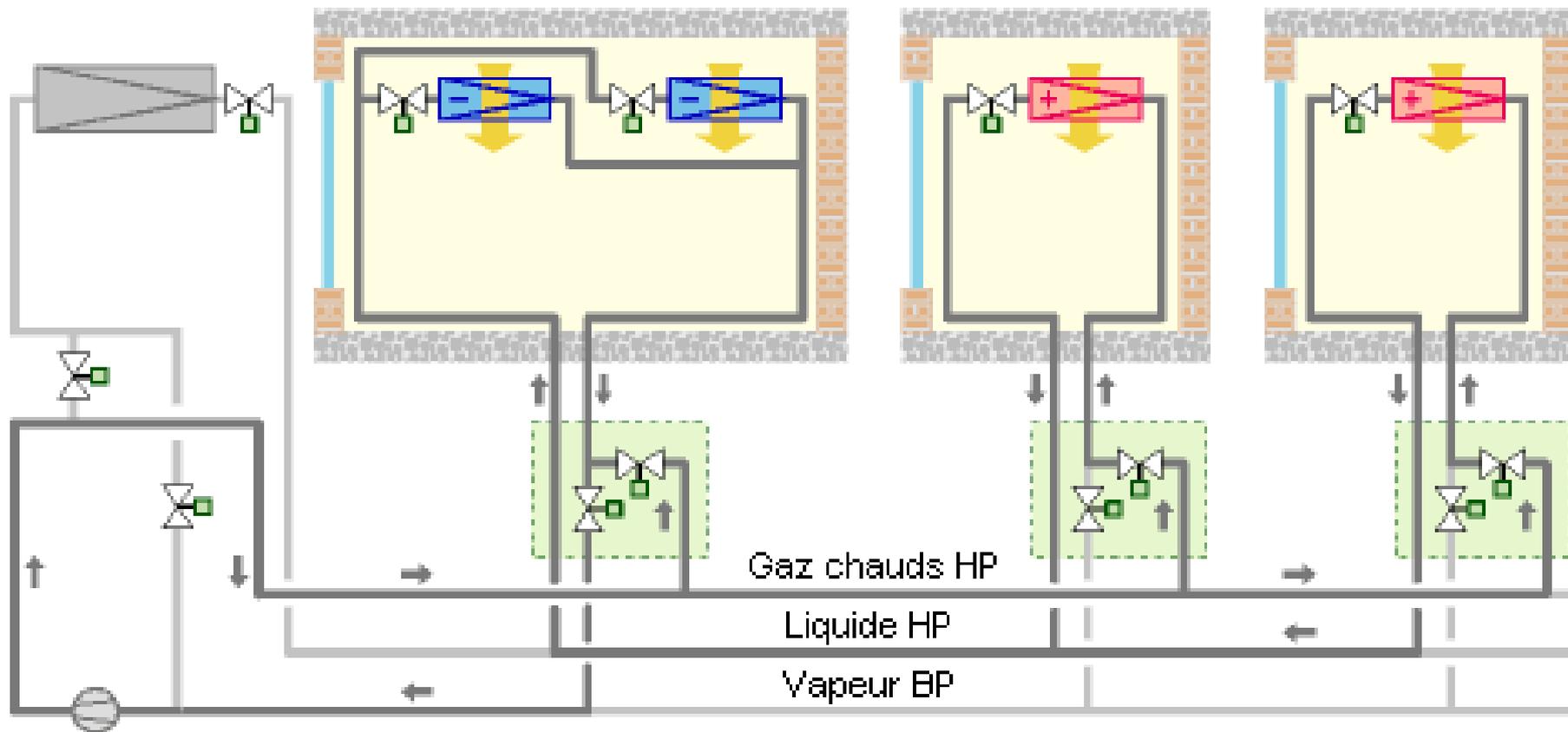
Froid seul



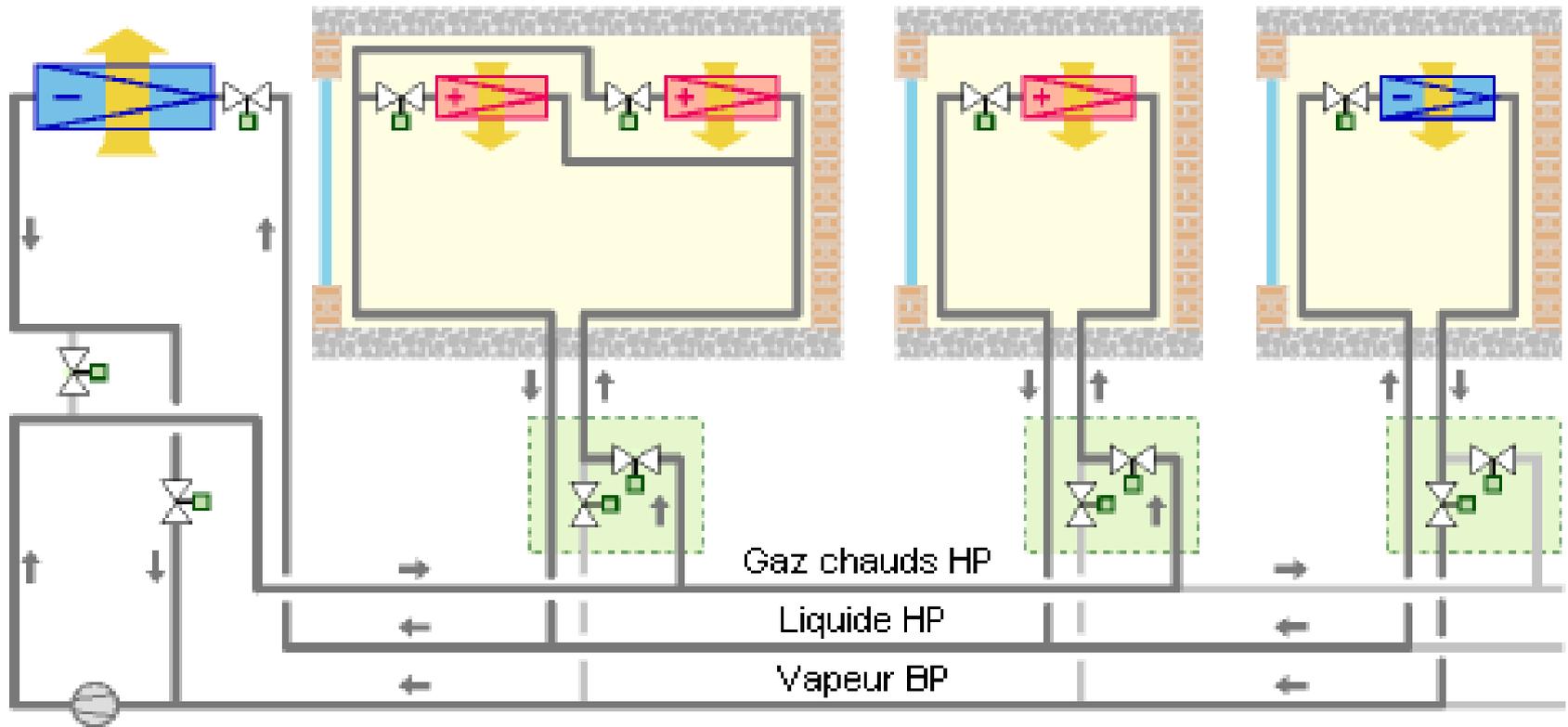
Froid majoritaire



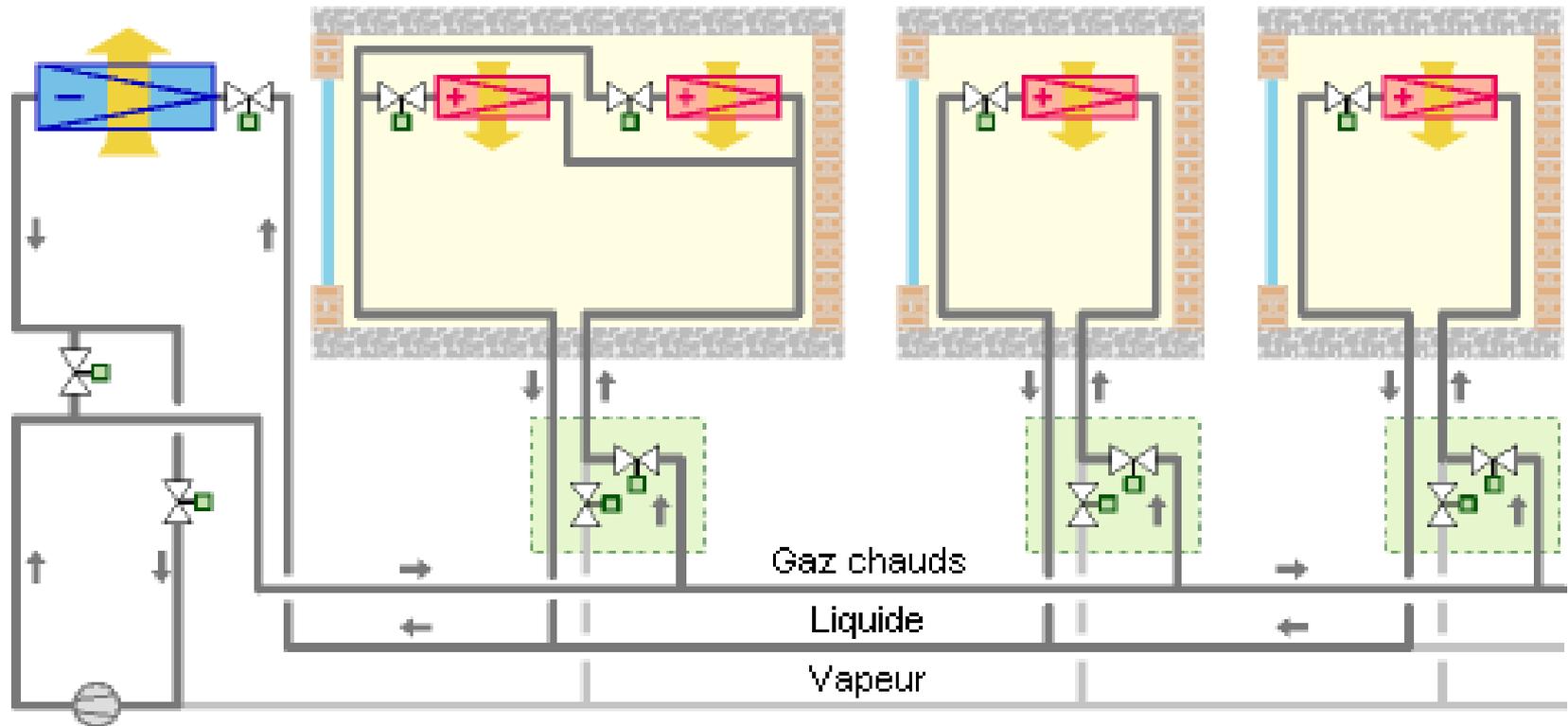
Equilibré



Chaud majoritaire



Chaud seul





COP (EXEMPLE)

Demande intérieure		Consommation compresseur	Rapport des puissances	"COP" équivalent
froid	chaud			
10 kW	-	2,58	100%	3,9
7,5 kW	2,5 kW	1,24	48%	8,1
5 kW	5 kW	1,18	46%	8,4
2,5 kW	7,5 kW	1,7	66%	5,8
-	10 kW	1,96	76%	5,1

R717

Ref: R. Döring, Klima+Kälte ingenieur Ki-Extra 5, 1978

DTU, Department of Energy Engineering
s in [kJ/(kg K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.J.H. Knudsen, 13-08-27

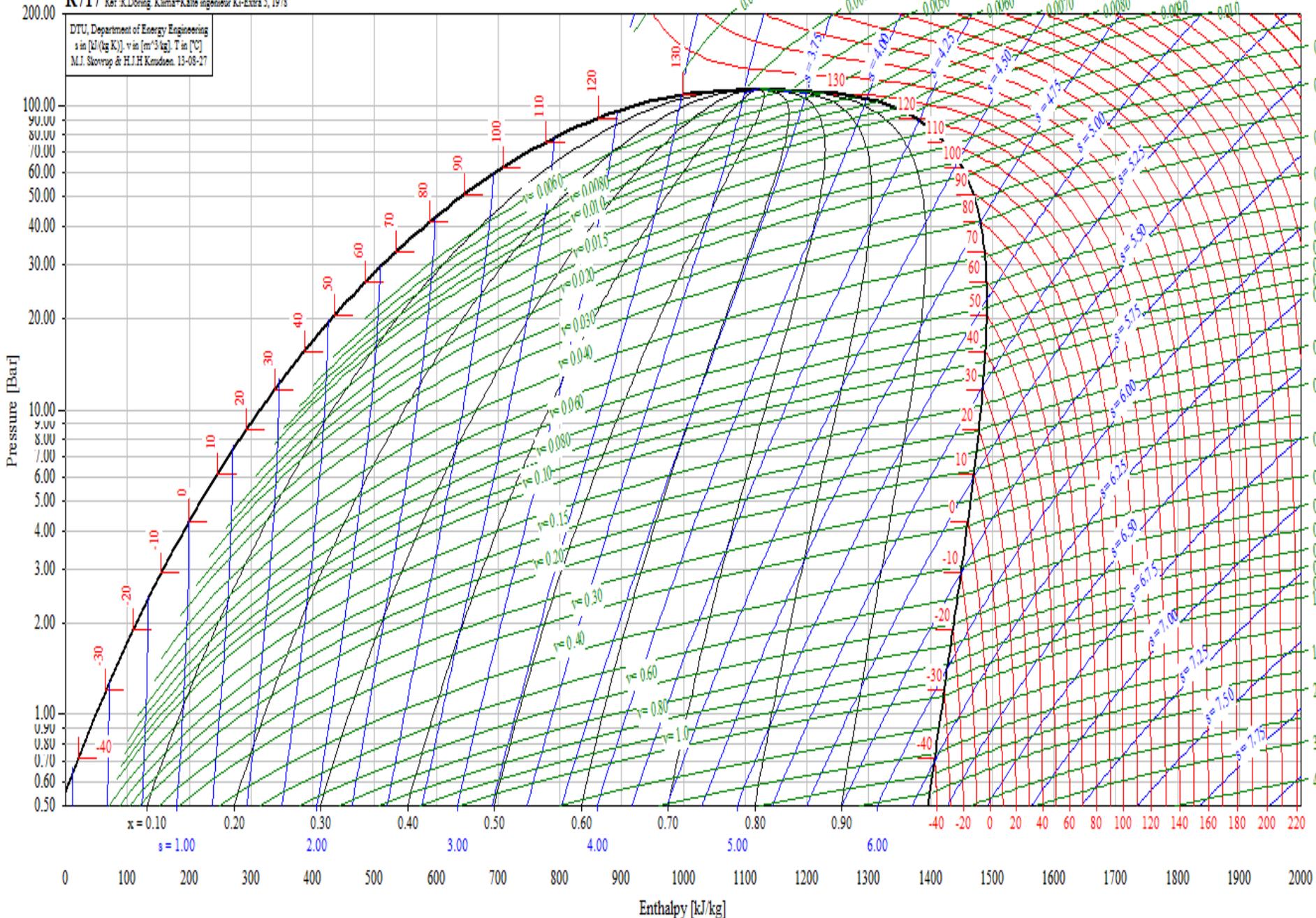
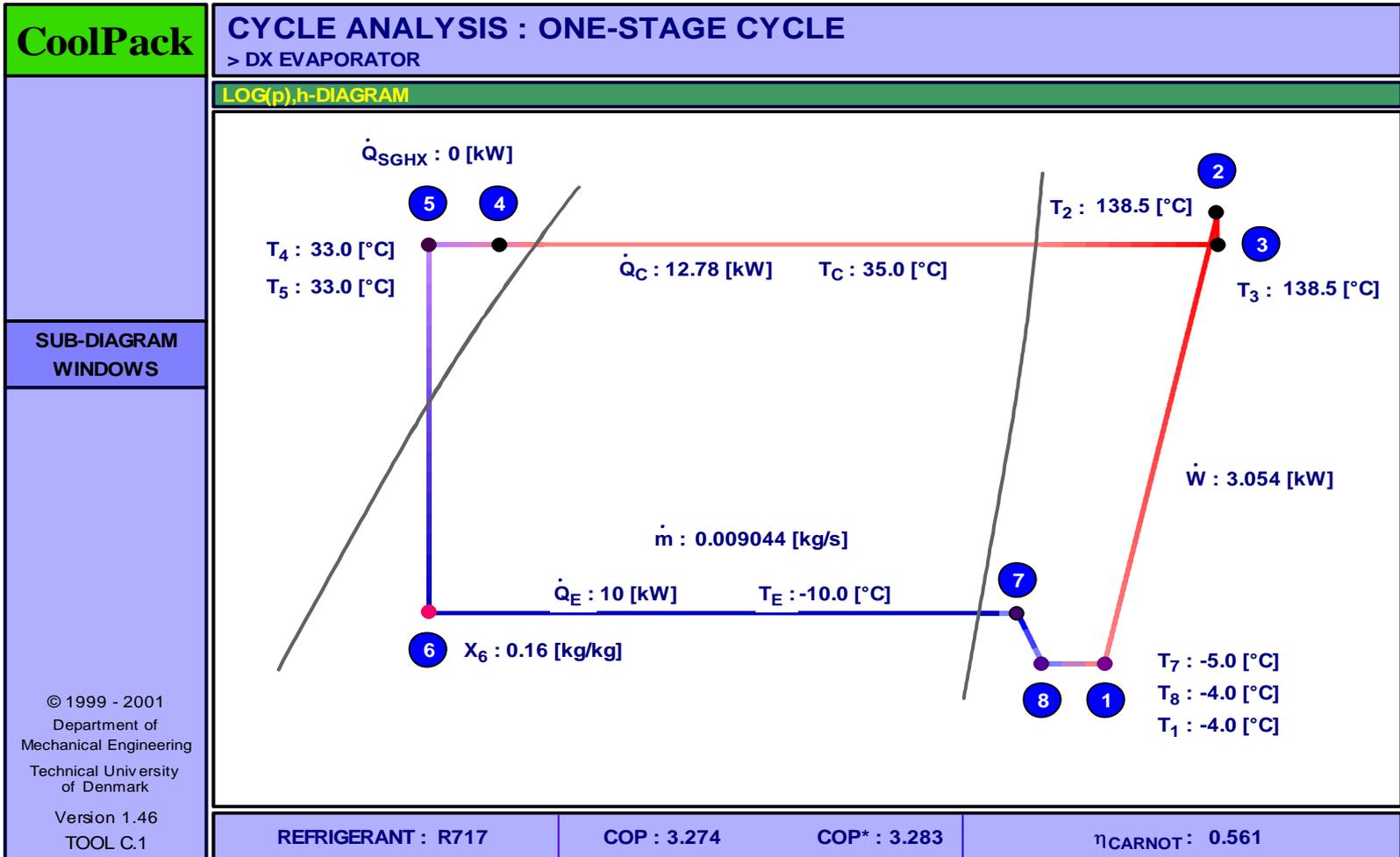


Diagramme P - Enthalpie



CoolPack	ENERGY ANALYSIS: ONE-STAGE SYSTEM		
	> DX EVAPORATOR AND STEPWISE VARIABLE COMPRESSOR CAPACITY		
	SYSTEM DIAGRAM		
	<p> $T_6 : -5.0 [^{\circ}\text{C}]$ $T_7 : 12.9 [^{\circ}\text{C}]$ $T_1 : 15.0 [^{\circ}\text{C}]$ $T_2 : 70.7 [^{\circ}\text{C}]$ SUCTION LINE SGHX COMPRESSOR $\dot{W} : 36.81 [\text{kW}]$ $\dot{m} : 0.8559 [\text{kg/s}]$ $\dot{Q}_{\text{SGHX}} : 0 [\text{kW}]$ EVAPORATOR CONDENSER $T_E : -10.00 [^{\circ}\text{C}]$ $T_C : 35.00 [^{\circ}\text{C}]$ $\dot{Q}_E : 100.00 [\text{kW}]$ $\dot{Q}_C : 147.2 [\text{kW}]$ $X_5 : 0.4 [\text{kg/kg}]$ $T_4 : 32.4 [^{\circ}\text{C}]$ $T_3 : 33.6 [^{\circ}\text{C}]$ </p>		
All values in this window correspond to the original situation (A) as defined in the process diagram window.			
SUB-DIAGRAM WINDOWS			
OTHER VERSIONS			
© 1999 - 2001 Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark Version 1.46 TOOL E.2	REFRIGERANT : ??	COP : 2.716	COP* : 3.142
	$\eta_{\text{CARNOT}} :$		



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



L'EVALUATION DES COÛTS GLOBAUX D'EXPLOITATION

- ▶ EFFICACITE ENERGETIQUE DU SYSTEME
- ▶ CONSOMMATION ENERGETIQUE ANNUELLE D'UNE INSTALLATION
- ▶ L'ENERGIE FRIGORIFIQUE
- ▶ ENTRETIEN MAINTENANCE
- ▶ COUT GLOBAL D'EXPLOITATION
- ▶ EXEMPLE

EFFICACITE ENERGETIQUE DU SYSTEME

- Dans un système frigorifique classique à compression de vapeur, les pertes énergétiques se répartissent comme suit :
 - 45 à 50 % pour le compresseur,
 - 35 à 40 % pour les échangeurs,
 - 10 à 15 % pour le détendeur et annexe.

Energie absorbée = Energie Théorique Requise + Pertes Energétiques

- ▶ L'efficacité théorique **Eth** du cycle idéal de Carnot est une référence absolue et universelle pour apprécier la performance d'une machine thermodynamique, tel un compresseur frigorifique.
- ▶ L'efficacité théorique d'une machine frigorifique idéale est donnée par l'expression fondamentale :

$$Eth = T_o / (T_c - T_o)$$

- T_o = température absolue de la source froide (évaporateur)
- T_c = température absolue de la source chaude (condenseur)

- L'efficacité théorique correspond au rapport de la puissance frigorifique produite P_o à la puissance énergétique minimale qui serait absorbée par une machine idéale (sans pertes), aux températures T_o et T_c des sources chaude et froide correspondantes.

$$Eth = P_o / P_{th}$$

- Cette puissance absorbée minimale n'est jamais atteinte pour une machine réelle, car les pertes internes à combattre absorbent une importante puissance additionnelle.

- **Efficacité réelle**

- L'efficacité réelle E_r d'un compresseur frigorifique est exprimée par le rapport de la puissance frigorifique produite P_o à la puissance énergétique P_w réellement absorbée par le compresseur frigorifique dans les conditions d'opération.

$$E_r = P_o / P_w \quad (P_w > P_{th})$$

- Le rendement de Carnot du compresseur N_c est le rapport de l'efficacité réelle E_r à l'efficacité théorique maximale E_{th} du compresseur frigorifique:

$$N_c = P_{th} / P_w$$

Coefficient de performance d'une installation

- ▶ Le coefficient de performance réel est le rapport de l'énergie frigorifique fournie à l'énergie incidente.

CONSOMMATION ENERGETIQUE ANNUELLE D'UNE INSTALLATION

- Les éléments consommant de l'énergie dans une installation frigorifique sont les suivants :
 - Le compresseur C_c ,
 - Les auxiliaires permanents C_p ,
 - Les auxiliaires non-permanents C_{np} ,
 - Les pertes en réseau qui augmentent les besoins de froid donc la durée de fonctionnement du compresseur (cette consommation est intégrée dans C_c),
 - Le dégivrage C_d qui augmente les besoins de froid en produisant de la chaleur à l'évaporateur, perte qu'il faudra compenser par un fonctionnement supplémentaire du compresseur en cycle froid,
- La consommation globale annuelle de l'installation est la somme des consommations de tous les éléments cités ci-dessus.

Consommation annuelle du compresseur

- ▶ La puissance frigorifique (Q_0) et la puissance absorbée (P_a) d'un compresseur varient suivant les températures d'évaporation et de condensation.
- ▶ Les hypothèses de calcul sont les suivants :
 - Les besoins frigorifiques sont répartis en n valeurs de puissance BF_j ,
 - BF besoin frigorifique maximum,
 - i est l'indice de régime de fonctionnement,
 - j est l'indice de besoin de froid.

► Taux de fonctionnement

$$T_{fij} = BF_j / Q_{oi}$$

- Q_{oi} = puissance frigorifique produite sous le régime i , exprimée en kW

► Nombre d'heure de fonctionnement

$$h_{cij} = n_{hij} * BF_j / (RPF_{ij} * Q_{oi})$$

- n_{hij} = nombre d'heure d'utilisation pour un besoin en froid Bf_j , sous le régime i exprimé en heures
- RPF_{ij} = rendement de production de froid sous le régime i



giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



► Consommation partielle pour un besoin de froid Bfj

$$C_{cij} = P_{ai} * h_{cij}$$

- P_{ai} = puissance électrique absorbée sous le régime i, exprimée en kW

► Consommation annuelle du compresseur

$$C_c \text{ (kW)} = \sum \sum C_{cij}$$

EXEMPLE

- ▶ " L'installation fonctionne toute l'année avec des besoins maximum de froid (Besoin de Froid = BF) de 10 kW. Pour simplifier, on répartira la puissance frigorifique par pas de 1 kW.

Exemple de répartition sur l'année des besoins de froid et des temps de fonctionnement à chaque régime (en heures)

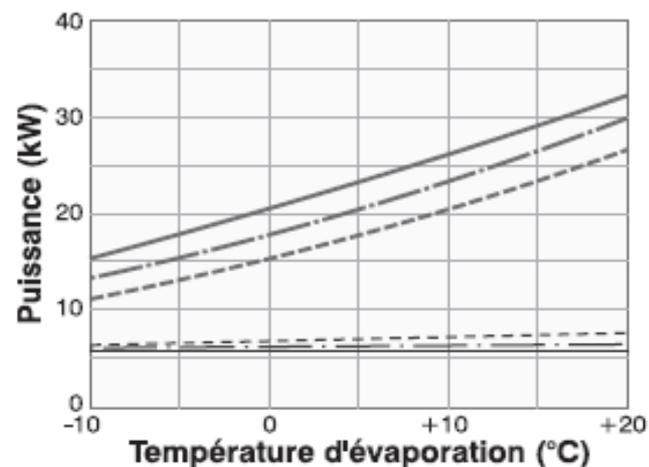
BF - Besoin de Froid (kW)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
durée totale heures	800	150	200	150	100	700	500	300	260	200
durée heures condensation 50°	600	100	130	700	300	200	100	-	-	-
durée heures condensation 40°	200	400	500	600	400	300	200	80	60	50
durée heures condensation 30°	-	100	200	200	300	200	200	220	200	150

8760 h

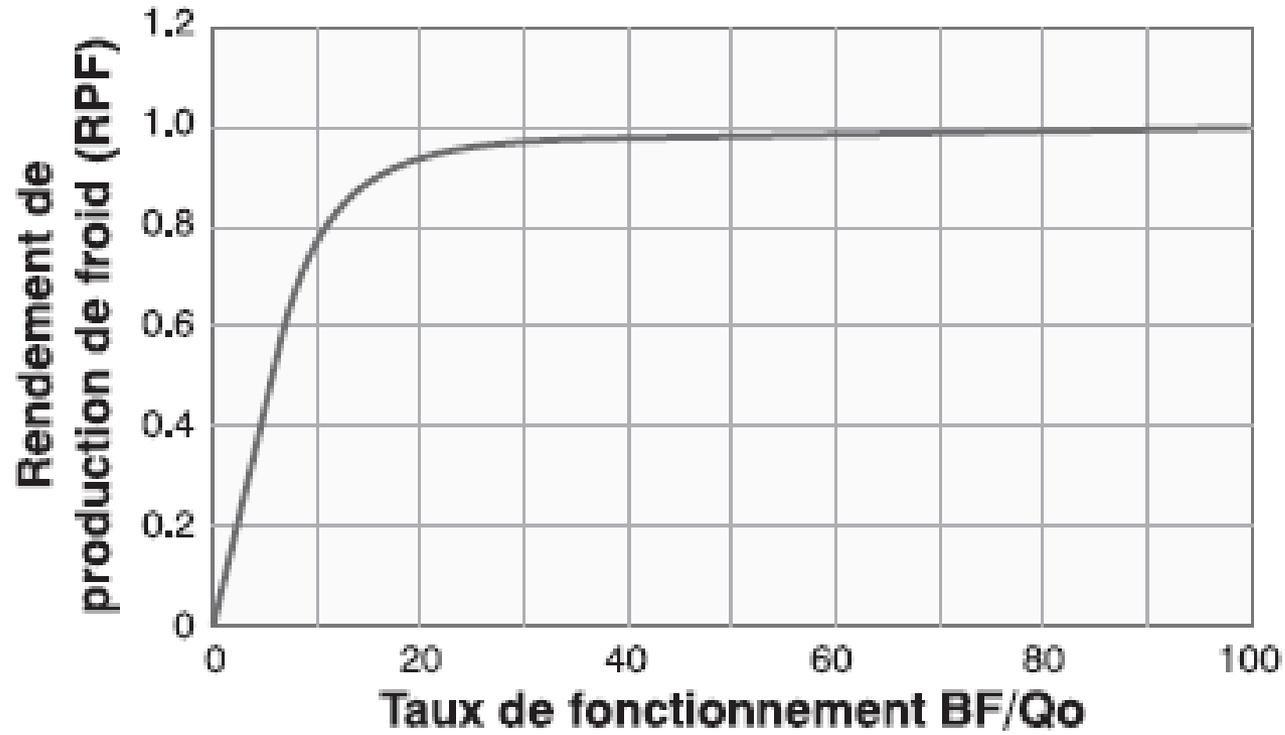
- ▶ Par exemple, l'installation a fonctionné durant 400 heures à 6 kW-froid, avec une température de condensation de 40° C.

► Consommation du compresseur

- *La puissance frigorifique et la puissance absorbée d'un compresseur varient suivant les températures d'évaporation et de condensation. La figure ci-dessous illustre ces variations pour notre exemple. La puissance frigorifique au régime extrême -10/+50° C est de 11 kW.*



- Qo frigorifique cond = 30°C
- - - Qo frigorifique cond = 40°C
- - - - Qo frigorifique cond = 50°C
- - - - - W absorbée cond = 50°C
- W absorbée cond = 40°C
- W absorbée cond = 30°C



- *Ainsi, l'installation étudiée doit assurer pendant 50 heures une puissance froid de 1 kW lorsque la condensation se produit à 40° C. La figure précédente prévoit à ce régime 13,2 kW frigorifique.*
- *Le taux de fonctionnement sera de 1 kW/ 13,2 kW, soit 8 %. Mais à un tel taux de charge, le rendement de production de froid est de 80%. Si bien que le temps de fonctionnement réel sera de:*

$$50 \text{ heures} \times 1 \text{ kW} / (0,80 \times 13,2 \text{ kW}) = 5 \text{ heures}$$

- *La consommation totale annuelle du compresseur est égale à la somme de toutes les consommations partielles, aux divers régimes.*



Besoin de Froid - BF (kW)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Régime - 10/50										
<i>Nbre heures utilisat. nh</i>	600	1000	1300	700	300	200	100			
<i>Puissance frigo Qo kW</i>	11	11	11	11	11	11	11			
<i>Taux fonct. %</i>	90%	82%	73%	64%	55%	45%	36%			
<i>Rendement RPF</i>	100%	100%	100%	99%	99%	98%	98%			
<i>Puissance absorbée kW</i>	6	6	6	6	6	6	6			
<i>Heures fonct. hc</i>	545	818	945	445	164	92	37			
<i>Consommation C_c kWh</i>	3270	4908	5670	2670	984	552	222			
Régime - 10/40										
<i>Nbre heures utilisat. nh</i>	200	400	500	600	400	300	200	80	60	50
<i>Puissance frigo Qo kW</i>	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2
<i>Taux fonct. %</i>	76%	68%	61%	53%	45%	38%	30%	23%	15%	7,5%
<i>Rendement RPF</i>	100%	99%	99%	99%	98%	98%	97%	95%	91%	80%
<i>Puissance absorbée kW</i>	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
<i>Heures fonct. hc</i>	152	275	306	321	185	116	62	19	10	5
<i>Consommation C_c kWh</i>	851	1542	1713	1800	1039	649	347	107	56	28
Régime - 10/30										
<i>Nbre heures utilisat. nh</i>		100	200	200	300	200	200	220	200	150
<i>Puissance frigo Qo kW</i>		15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
<i>Taux fonct. %</i>		59%	53%	46%	39%	33%	26%	20%	13%	6,5%
<i>Rendement RPF</i>		99%	99%	98%	98%	97%	95%	92%	89%	75%
<i>Puissance absorbée kW</i>		5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
<i>Heures fonct. hc</i>		60	106	94	121	68	55	47	30	13
<i>Consommation C_c kWh</i>		317	563	498	640	359	294	250	157	70

Calcul de la consommation annuelle du compresseur

- ▶ *En additionnant toutes les consommations partielles, on trouve pour notre exemple:*

$$**C_c = 29\,556\text{ kWh/an}**$$

- ▶ *De la même manière, le temps total de fonctionnement annuel du compresseur est égal à la somme des temps de fonctionnement partiels aux divers régimes:*

$$**h_c = 5\,091\text{ heures}**$$



giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Consommation des auxiliaires permanents

- ▶ *Comme leurs noms l'indiquent, ces auxiliaires consommateurs d'énergie fonctionnent en permanence.*
- ▶ *Dans notre exemple, le ventilateur de l'évaporateur fonctionne en permanence, soit 8.760 heures par an.*
- ▶ *Il absorbe 500 W et va donc consommer par an:*

$$**C_p = 0,5 kW \times 8.760 h = 4.380 kWh/an**$$



giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Auxiliaires non permanents

- *Ce sont les auxiliaires asservis au fonctionnement du compresseur (ventilateur de condenseur, vanne magnétique départ liquide, résistance de carter, etc.)*
- *Pour notre exemple, le ventilateur de condenseur absorbe 300 W et est asservi au compresseur. La bobine de l'électrovanne absorbe 10 W. Le compresseur comporte en outre une résistance de carter (non régulée) qui consomme 20 W quand le compresseur est à l'arrêt.*
- *Nous avons vu que le compresseur fonctionnait 5.091 heures par an. Les auxiliaires non permanents vont donc consommer:*

$$C_{np} = (0,3 + 0,01) \times 5.091 + 0,02 \times (8.760 - 5.091)$$

$$C_{np} = 1.651 \text{ kWh/an}$$

Dégivrage

- ▶ *Estimer sans observation les consommations d'un dégivrage n'est pas chose toujours facile car leur fréquence est très variable. Pour notre exemple, nous estimerons en moyenne quatre dégivrages par jour de 15 minutes (0,25 heure) à l'aide d'une résistance électrique de 6 kW, ce qui conduit à une consommation annuelle de:*

$$Cd = 6 \times 0,25 \times 365 \times 4 = 2.188 \text{ kWh/an}$$



giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Récapitulation des consommations annuelles

- *La consommation totale annuelle est égale à la somme des consommations de tous les composants de l'installation soit:*

$$C = 29.556 + 4.380 + 1.651 + 2.188 = 37.775 \text{ kWh/an}$$

Quelle efficacité énergétique ?

- Déterminons l'énergie froid utilisée sur l'année. Il suffit d'intégrer les besoins de froid sur l'année, donc de totaliser les produits des besoins frigorifiques par le temps, pour les 3 régimes de marche.

Besoin de froid -BF (kW)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Nombre d'heures régime- 10/50°C	600	1000	1300	700	300	200	100			
Nombre d'heures régime- 10/40°C	200	400	500	600	400	300	200	80	60	50
Nombre d'heures régime- 10/30°C		100	200	200	300	200	200	220	200	150
TOTAL heures	800	1500	2000	1500	1000	700	500	300	260	200
BF x heures kWh	8000	1350	1600	1050	6000	3500	2000	900	520	200



giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



- ▶ *L'énergie froid annuelle nécessaire est la somme des chiffres de la dernière ligne du tableau soit:*

$$EF_{\text{annuel}} = 61.120 \text{ kWh}$$

- ▶ *L'efficacité énergétique moyenne annuelle de l'installation frigorifique est le rapport entre l'énergie froid produite et l'énergie électrique consommée soit, pour notre exemple:*

$$EE_{\text{moy}} = 61.120 / 37.775 = 1,62$$



- *Plus l'installation sera performante, bien réglée, et bien entretenue et plus ce coefficient sera élevé, ce qui veut donc dire tout simplement que moins l'installation sera gourmande en énergie électrique.*
- *Remarque: ce coefficient E_{Emoy} de **1,62** correspond à une installation frigorifique (“ froid négatif ”) et pas une installation de climatisation puisque la température d'évaporation est de -10° C.*
- *Généralement, une installation de climatisation aura une température d'évaporation positive, et le E_{Emoy} dépassera 3 pour la saison.*
- *On notera également qu'aux USA toute installation de climatisation ayant un E_{emoy} inférieur à 2,9 sur la saison, est interdite.*



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (giz) GmbH



LE CHOIX D'UN CLIMATISEUR DE LOCAL

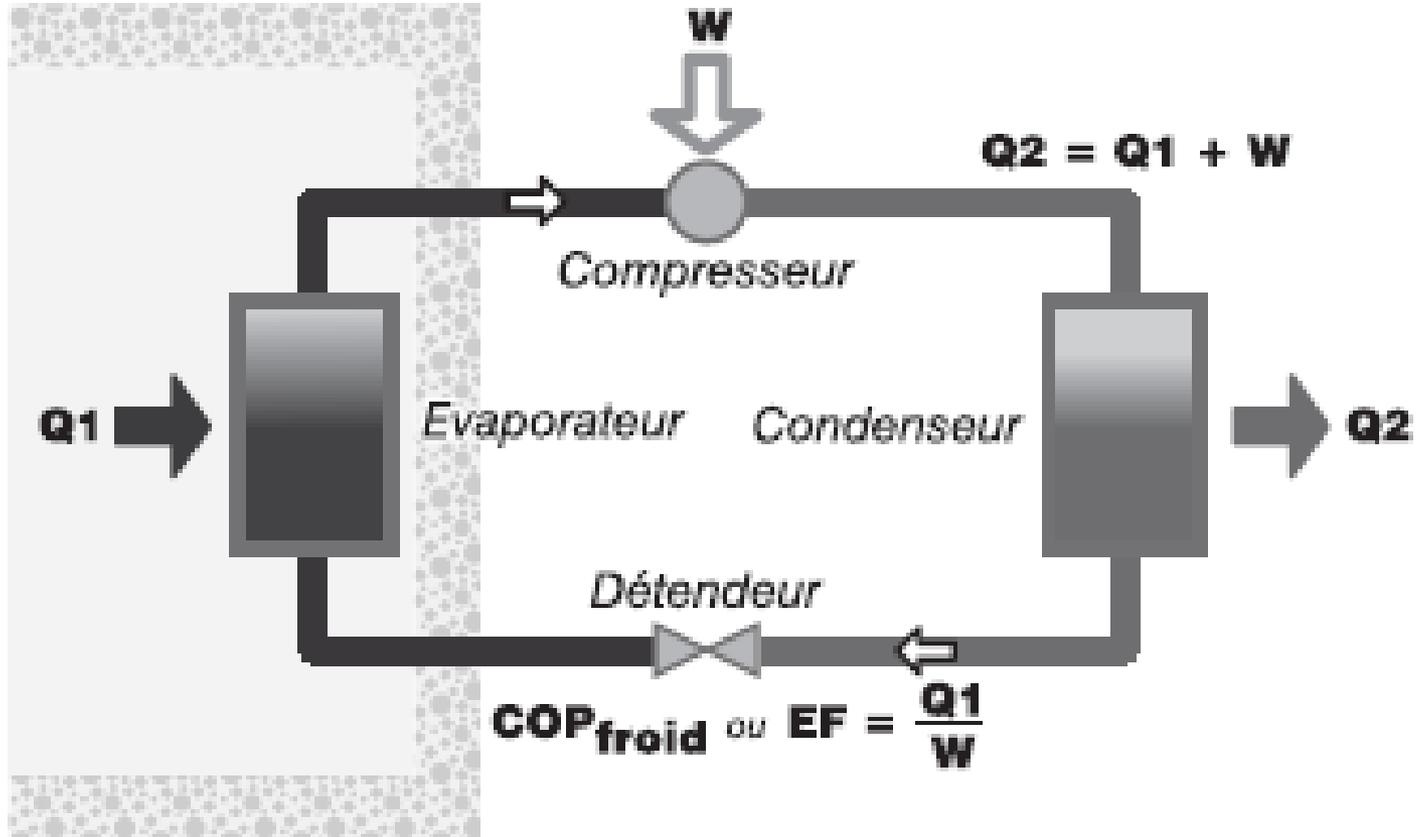
- Une installation de qualité répondra à plusieurs exigences telles que : un coût d'exploitation limité, un degré de déshumidification de l'air limité, un faible niveau sonore et une absence de courants d'air.
- Pour répondre à ces principes, il faudra examiner : la configuration de l'appareil, son efficacité frigorifique, sa réversibilité éventuelle, la qualité acoustique de l'ensemble, la disposition de l'évaporateur dans le local, l'emplacement de l'unité extérieure, la régulation du climatiseur, etc....



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

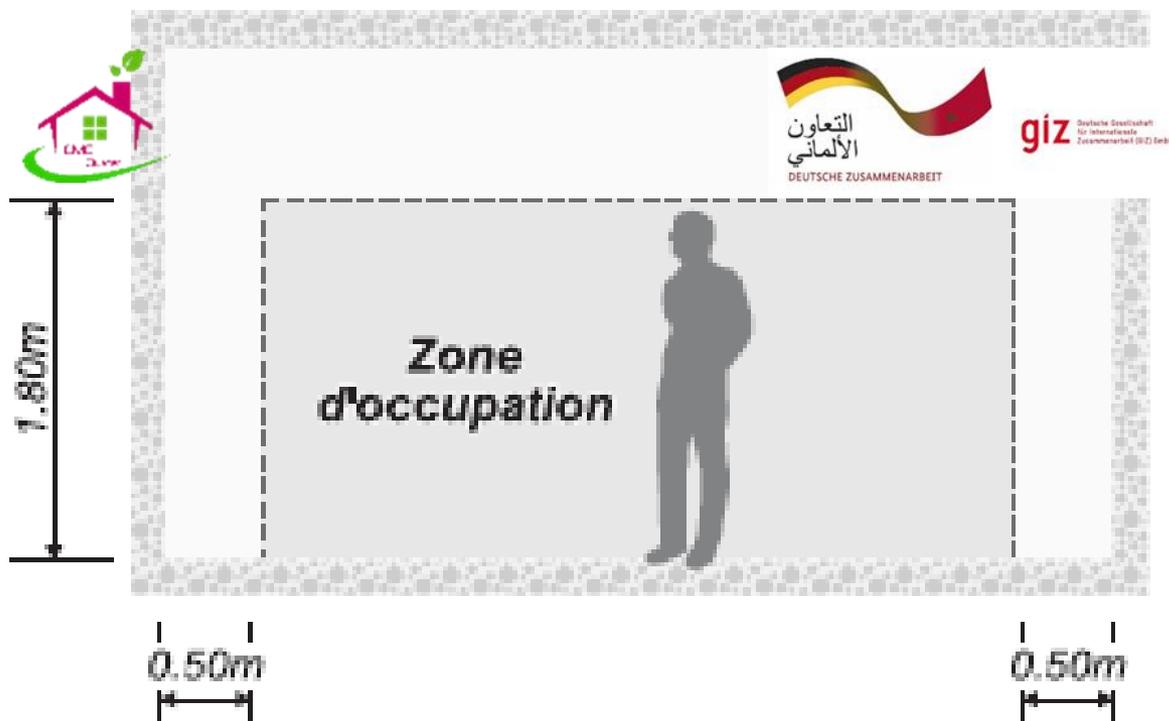


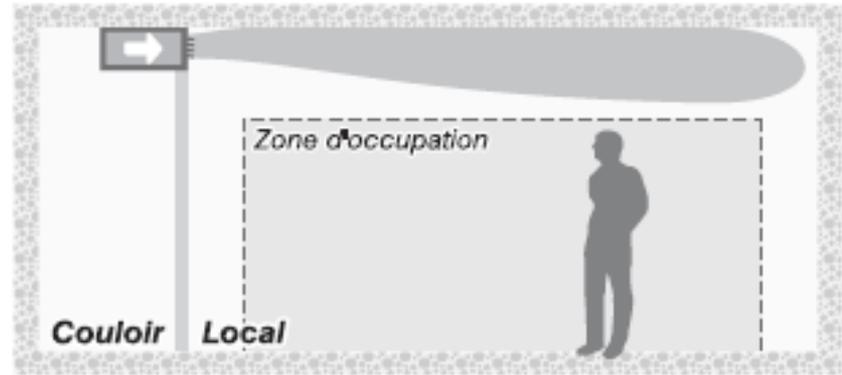
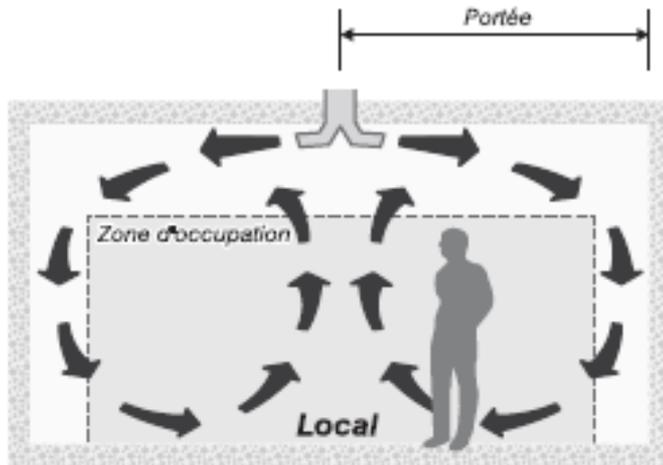
- ▶ Deux facteurs vont conditionner l'efficacité énergétique du climatiseur :
 - L'efficacité frigorifique du compresseur
 - Le mode de régulation de l'appareil (emplacement de la sonde d'ambiance, régulation du compresseur, régulation du condenseur)
- ▶ Un climatiseur est énergiquement efficace s'il demande peu d'énergie électrique au compresseur pour atteindre une puissance frigorifique donnée.



Choix de la position de la bouche de soufflage ou du climatiseur

► Zone d'occupation dans un local de bureau







giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Emplacement de l'unité extérieure

► Erreurs à ne pas commettre :

- Placer le condenseur dans une zone fortement ensoleillée
- Placer le condenseur face aux vents dominants
- Placer le condenseur sur une toiture non accessible
- Placer le condenseur au sol près de parterres
- Détruire l'esthétique du bâtiment
- Oublier l'importance de l'entretien



La régulation du condenseur

- Certains locaux à charges internes importantes (par exemple, les salles informatiques) doivent être climatisés en période sèche, mais aussi en période plus froide. Dans ce cas, lorsque la température de l'air extérieur diminue, la capacité de refroidissement du condenseur augmente.
- Paradoxalement, cette situation perturbe le fonctionnement correct de l'évaporateur et entraîne une perte de puissance de ce dernier. Le confort dans le local n'est alors plus assuré. A l'extrême, le pressostat basse pression de sécurité de l'appareil peut commander l'arrêt de l'installation.
- Pour remédier à ce problème, il faut que la puissance du condenseur soit régulée en fonction de la température extérieure. Si la température de l'air diminue, le débit d'air doit aussi diminuer afin de conserver un échange constant.

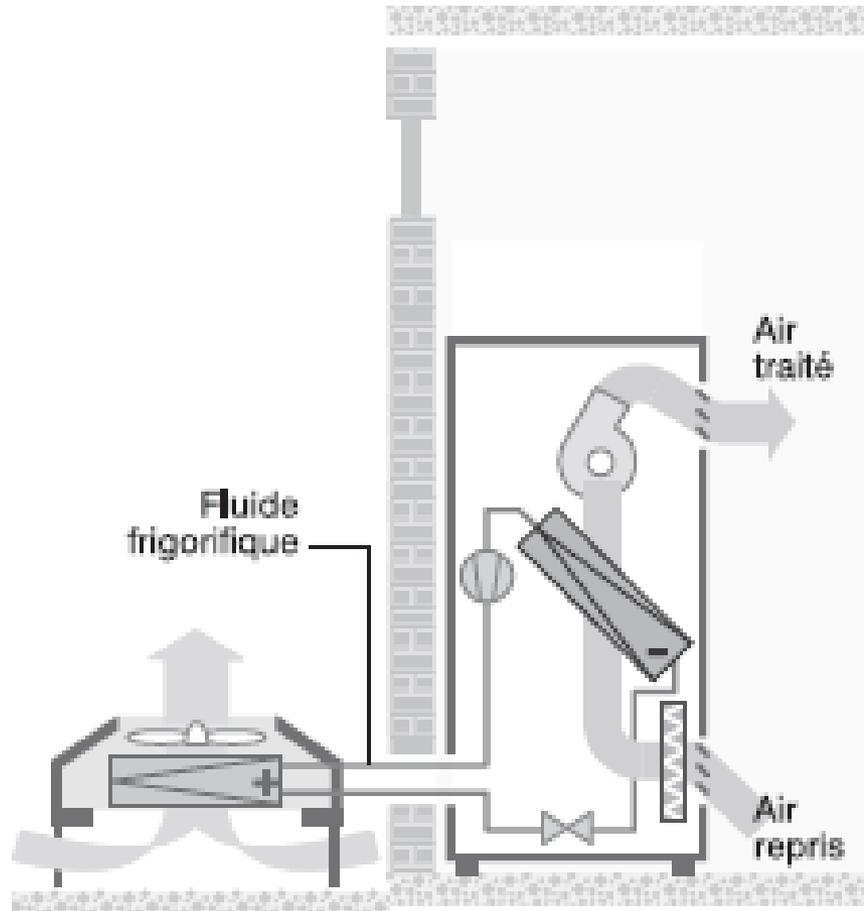


giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

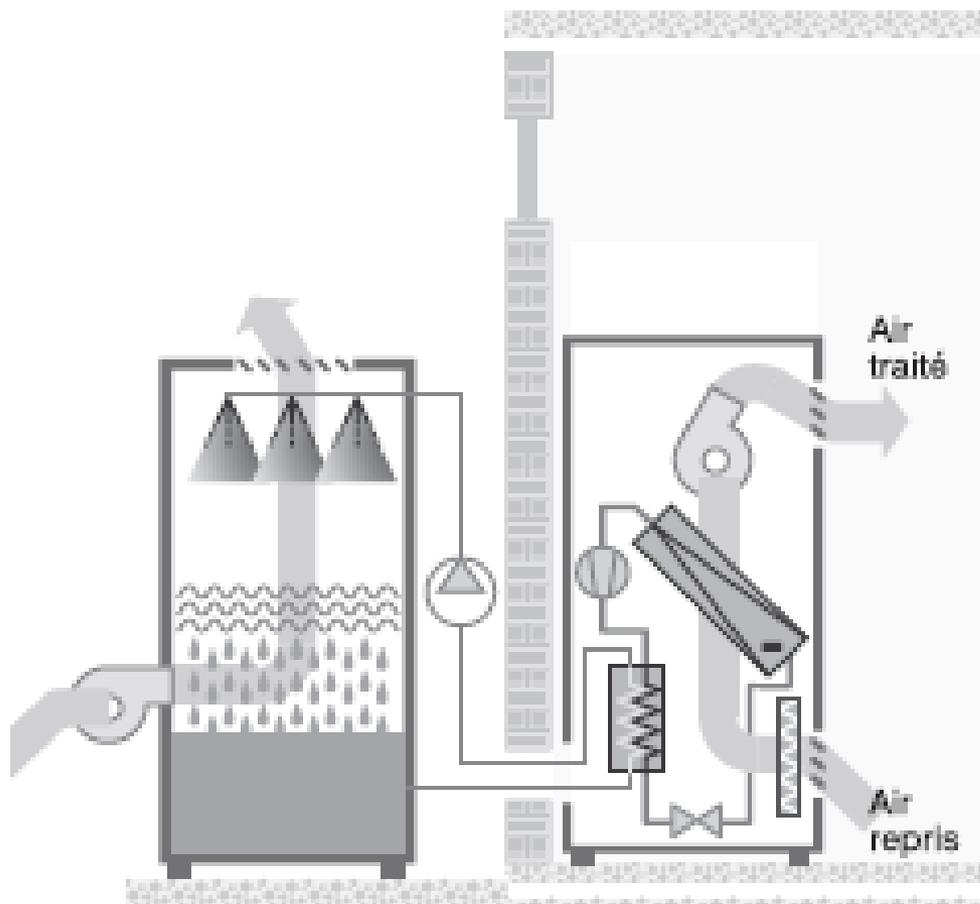


- Ainsi un climatiseur devant fonctionner pour des températures extérieures inférieures à 17° C doit être équipé d'une variation de la vitesse du ventilateur de condenseur : au minimum, le fonctionnement du ventilateur sera commandé en tout ou rien. Idéalement la vitesse sera modulée, soit en continu, soit par paliers.
- La diminution de vitesse du ventilateur est alors commandée par un pressostat ou un thermostat placé sur le condenseur. La puissance d'échange de celui-ci est ainsi maintenue constante quelle que soit la saison.

Armoire de climatisation avec condensateur à l'extérieur



Climatiseur - Armoire à condenseur refroidi par un circuit d'eau pulsée



Dry cooler ou aérorefroidisseur

