

Chapitre IV

Cycle de réfrigération



**Ce support de cours est en sa 1ère version
toute suggestion ou avis de la part des lecteurs
(en particulier des étudiants) est la bienvenue**

Introduction

Un domaine d'application important de la thermodynamique est la réfrigération. Celle-ci consiste à transférer de la chaleur d'un milieu froid vers un milieu chaud. On parle alors de production de froid.

Une machine thermodynamique qui produit un tel effet est dite *machine frigorifique*. Elle fonctionne selon un cycle thermodynamique dit *cycle de réfrigération*. Il existe plusieurs types de cycles de réfrigération, le plus fréquent parmi ces cycles est le cycle à compression de vapeur qui sera étudié dans ce présent chapitre.

I- Digramme enthalpique

I- Digramme enthalpique

Le fluide de travail d'une machine frigorifique est appelé *fluide frigorigène ou réfrigérant*. Les fluides frigorigènes les plus utilisés sont les chlorofluorocarbones ou CFC. Plusieurs CFC sont utilisés, parmi lesquels citons CCl_2F_2 ou R-12 ou encore CHClF_2 ou R-22.

Depuis la fin des années 1990, il a été communément admis que les CFC sont responsables de l'augmentation du rayonnement ultra-violet sur terre par la destruction de la couche d'ozone.

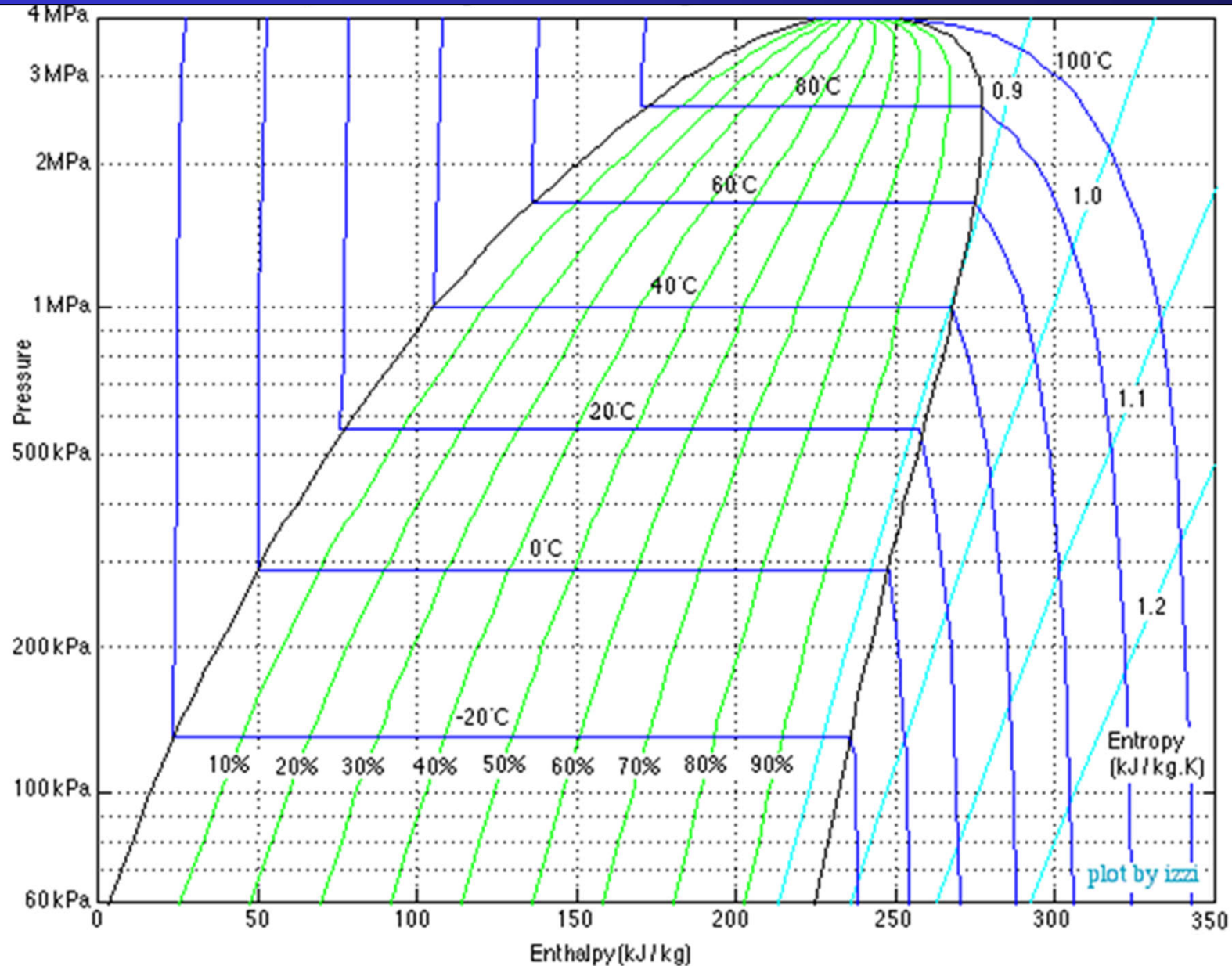
I- Digramme enthalpique

Il a alors été destiné au niveau mondial de remplacer progressivement les CFC par d'autres réfrigérants moins néfastes pour l'environnement. Parmi ces réfrigérants, les hydrogéo-fluoro-carbones tels que le $C_2H_2F_4$ ou R-134a. Pour déterminer les propriétés d'un fluide frigorigène, on peut utiliser soit les tables de chaque réfrigérant ou alors utiliser les abaques. L'abaque le plus utilisé pour la réfrigération est l'abaque dit *diagramme enthalpique*.

I- Digramme enthalpique

Il s'agit d'un diagramme thermodynamique avec pour abscisse l'enthalpie et pour ordonnée la pression. Ce diagramme est parfois appelé diagramme de Mollier. Ce diagramme permet de suivre l'évolution de la pression, de l'enthalpie, de la température, de l'entropie, du volume massique et du mélange liquide-vapeur (titre) d'un fluide frigorigène dans une machine frigorifique. Le diagramme enthalpique du réfrigérant R-134a est présenté sur la figure ci dessous.

I- Digramme enthalpique



II- Cycle de réfrigération idéal

II- Cycle de réfrigération idéal

Une machine frigorifique a pour but de faire passer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude. Pour ce faire, cette machine consomme du travail.

Le schéma d'une machine frigorifique est donnée sur la figure ci-dessous.

Elle est constituée d'un compresseur, d'un condenseur, d'un évaporateur et d'une soupape de détente. L'évaporateur est plongé dans un réservoir constituant la source froide. Le condenseur est plongé dans un réservoir constituant la source chaude.

II- Cycle de réfrigération idéal

Ces différents éléments sont reliés par une tuyauterie dans laquelle circule le fluide frigorigène.

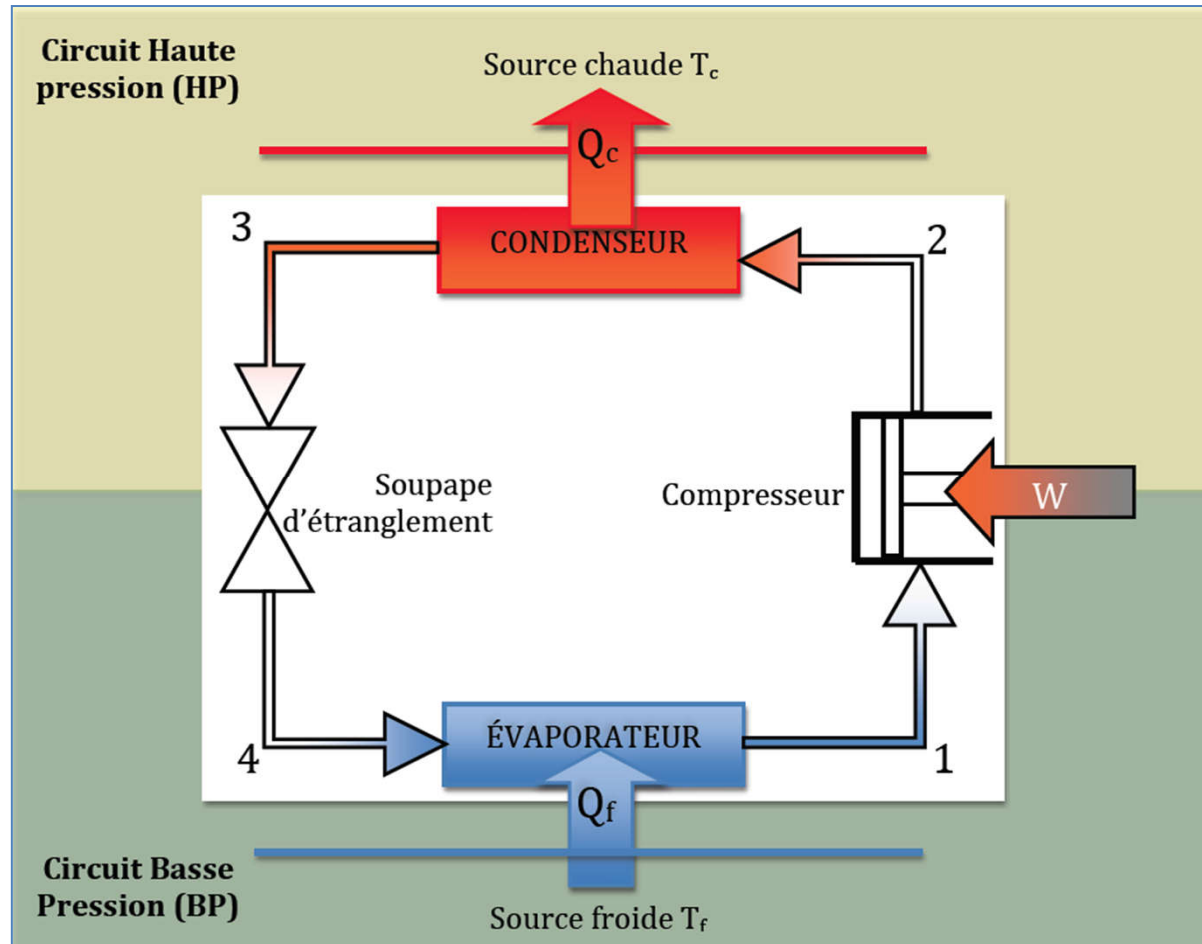
Ce fluide subit un changement de phase liquide-vapeur alternativement dans l'évaporateur et dans le condenseur.

Ce qui lui permet d'aller chercher la chaleur dans la source froide (changement de phase endothermique liquide-vapeur dans l'évaporateur) pour ensuite la restituer à la source chaude (changement de phase exothermique vapeur-liquide dans le condenseur).

II- Cycle de réfrigération idéal

Ainsi, le compresseur comprime le fluide frigorigène, qui est sous forme vapeur saturée à son entrée, il est ensuite envoyé dans le condenseur où il se liquéfie. Le détendeur permet de détendre le fluide frigorigène liquide provenant du condenseur qui est ensuite envoyé vers l'évaporateur où il s'évapore.

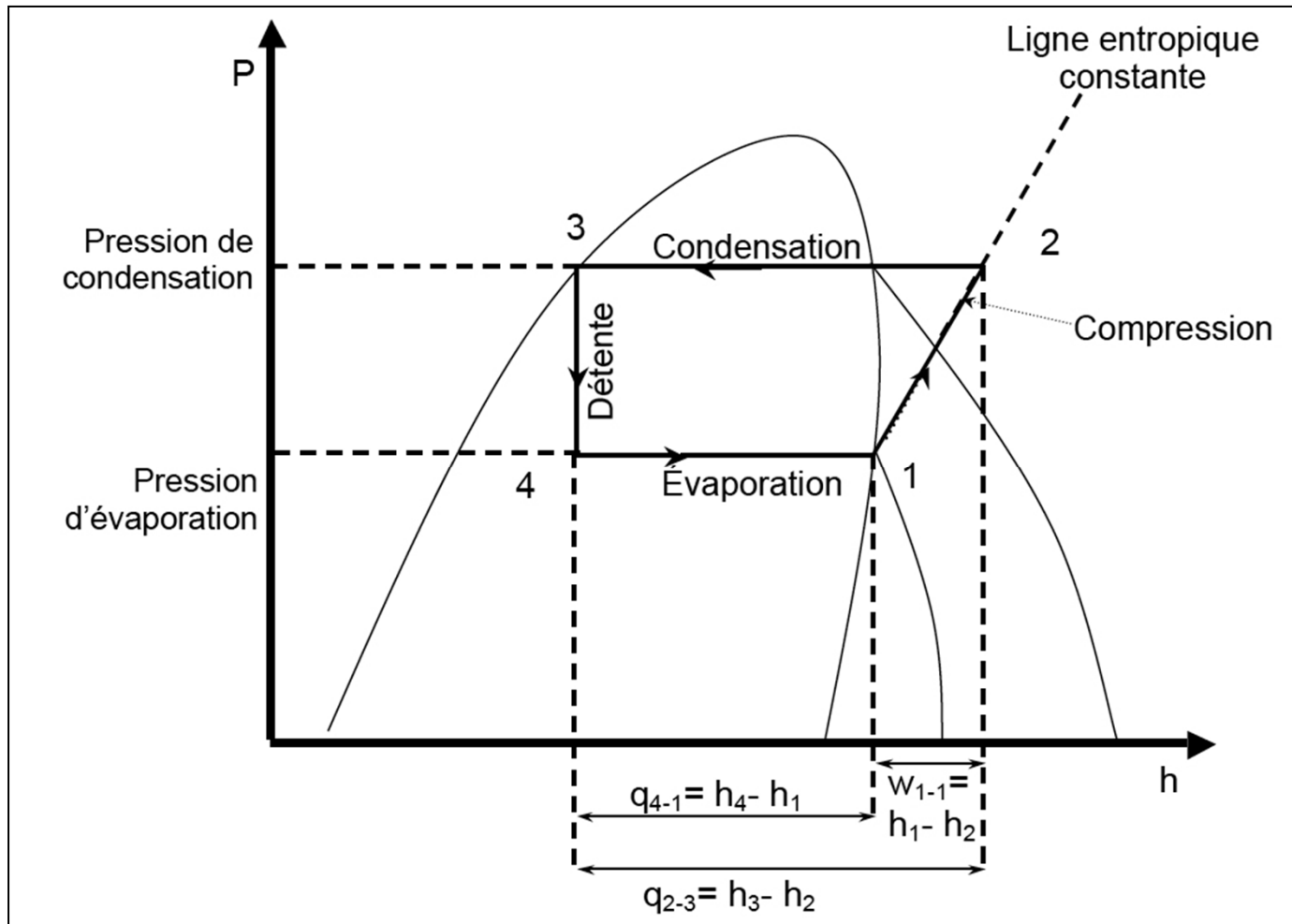
II- Cycle de réfrigération idéal



II- Cycle de réfrigération idéal

Le cycle 1-2-3-4 de fonctionnement réversible de cette machine est représenté dans le diagramme enthalpique $P-h$, figure ci-dessous. Ce cycle est constitué de 2 isobares HP (haute pression) et BP (basse pression), d'une isentropique et d'une isenthalpique. les points du cycle sont représentés sur le schéma de la machine. Ce cycle comprend 4 transformations:

II- Cycle de réfrigération idéal



II- Cycle de réfrigération idéal

1-2: Compression isentropique :

le fluide frigorigène qui circule dans la machine entre dans le compresseur sous forme de vapeur saturée (1) et y est comprimé de *BP* à *HP*.

2-3 : Condensation :

le fluide frigorigène entre dans le condenseur en (2) sous forme de vapeur surchauffée à haute pression. Il se condense et cède la chaleur Q_{out} à la source chaude.

II- Cycle de réfrigération idéal

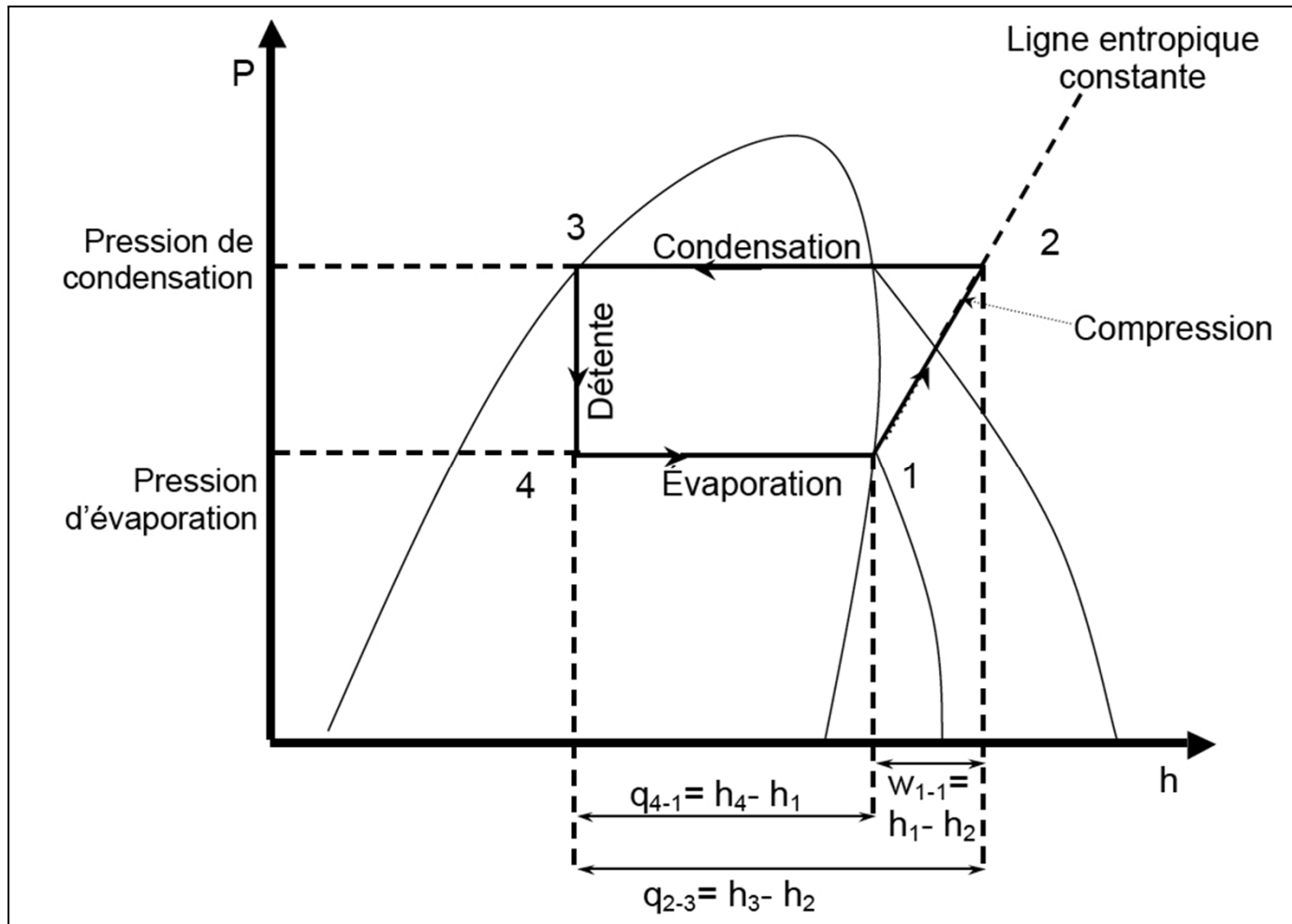
3-4: Détente isenthalpique :

le fluide frigorigène qui est à l'état de liquide saturé (3) est envoyé dans un détendeur où il subit une détente de *Joule-Thomson*. Sa pression est alors abaissée de *HP* à *BP*.

4-1: Evaporation :

le fluide frigorigène qui est à l'état de mélange 'liquide+vapeur' (4) passe dans l'évaporateur où il s'évapore en enlevant la chaleur Q_{in} à la source froide.

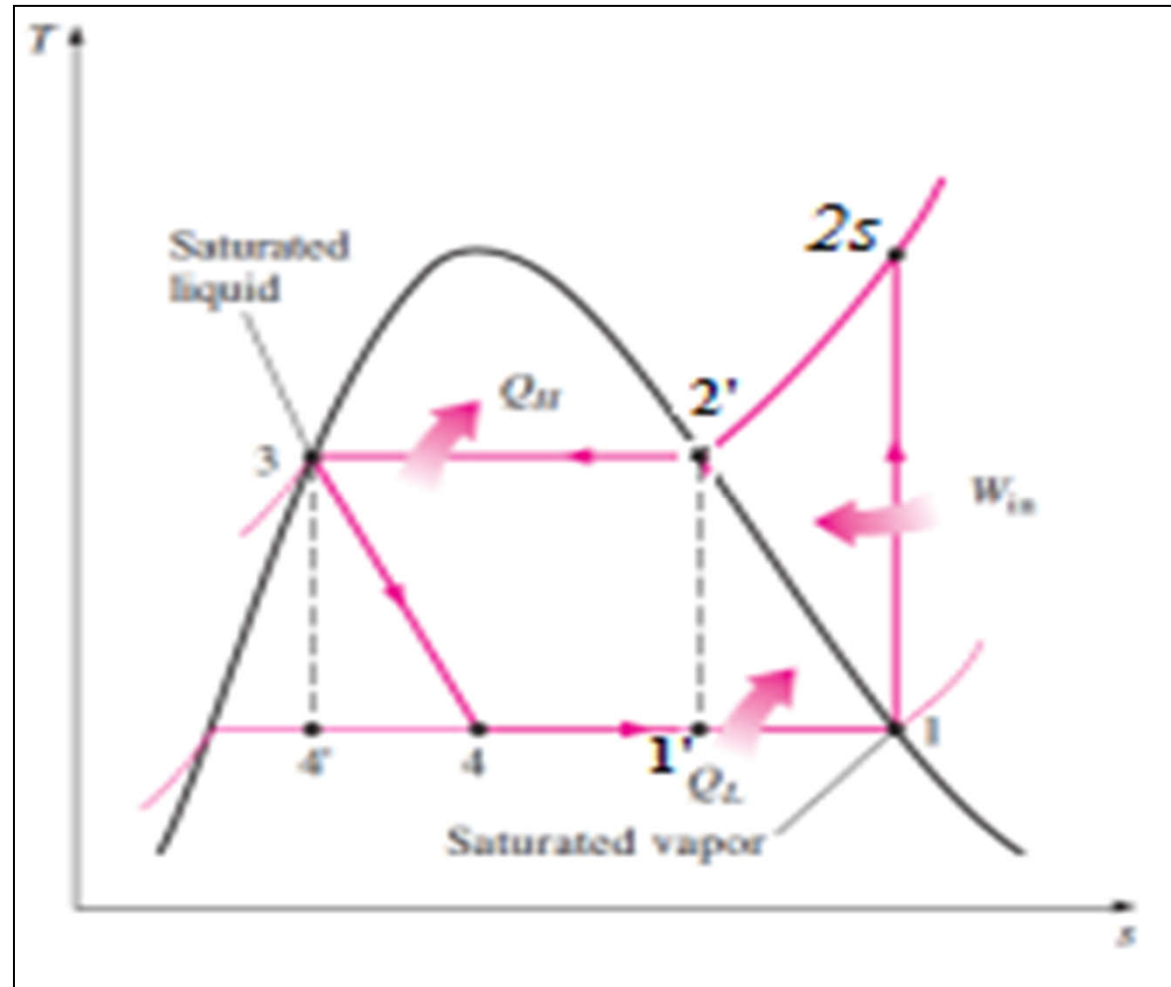
II- Cycle de réfrigération idéal



II- Cycle de réfrigération idéal

Le cycle idéal de réfrigération par compression de vapeur est représenté sur le diagramme $T-s$ de la figure ci-dessous (cycle 1-2s-3-4). Sur cette figure est aussi représenté le cycle de *Carnot* (cycle (1'-2'-3-4')). Ce cycle correspond au maximum d'efficacité d'une machine frigorifique (comme l'énonce le second principe de la thermodynamique). Cependant comme pour les cycles de puissance, le cycle de Carnot n'est pas pratique pour une machine frigorifique pour les raisons suivantes:

II- Cycle de réfrigération idéal



II- Cycle de réfrigération idéal

La compression 1'-2' dans le cycle de *Carnot* est effectuée sur un mélange de liquide et de vapeur. La compression de ce mélange n'est pas pratique car le liquide endommage le compresseur en entraînant la corrosion des aubes de celui-ci. C'est pour cette raison que dans la pratique le fluide frigorigène est amené à l'état de vapeur saturé 1 avant d'être comprimé 1-2s. Cette compression est dite *compression sèche*.

II- Cycle de réfrigération Idéal

- La détente isentropique 3-4' n'est pas pratique car il s'agit de détendre du liquide saturé. La détente d'un tel fluide dans une turbine ne présente pas d'avantage, étant donné le faible rendement de la turbine opérant à ses conditions. En plus des problèmes de corrosion occasionnés par la présence du liquide dans la turbine. C'est pour cette raison que dans la pratique, on réalise cette détente dans une soupape d'étranglement. Cette dernière est isenthalpique (détente de *Joule-Thomson*). La transformation correspondante est 3-4.

III- Analyse thermodynamique

III- Analyse thermodynamique

Pour une machine frigorifique à compression de vapeur, en supposant un fonctionnement réversible selon le cycle idéal de réfrigération et en négligeant les variations des énergies cinétique et potentielle, nous allons appliquer les bilans thermodynamiques aux différents composants de cette machine (compresseur, évaporateur, condenseur et détendeur).

Chaque composant a une seule entrée et une seule sortie, le bilan de masse s'écrit donc: $\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$

Où \dot{m} est le débit du fluide frigorigène dans la machine.

III- Analyse thermodynamique

- Compresseur :

Dans le compresseur le fluide frigorigène reçoit le travail ($\dot{W}_C > 0$). En supposant une compression adiabatique, les bilans d'énergie et d'entropie s'écrivent:

$$h_2 - h_1 = \frac{\dot{W}_C}{\dot{m}} \quad \text{et} \quad s_2 = s_1$$

- Évaporateur :

Dans l'évaporateur le fluide frigorigène reçoit la chaleur ($\dot{Q}_{in} > 0$) de la source froide. Le bilan d'énergie s'écrit donc :

$$h_1 - h_4 = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}$$

III- Analyse thermodynamique

- Condenseur :

Dans le condenseur le fluide frigorigène cède la chaleur à la source chaude. Le bilan d'énergie s'écrit donc :

$$h_3 - h_2 = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}$$

- Détendeur :

Dans le détendeur le fluide frigorigène subit une détente de *Joule-Thomson*. Autrement dit son enthalpie est constante. Le bilan d'énergie du détendeur s'écrit donc :

$$h_4 = h_3$$

III- Analyse thermodynamique

- Efficacité du cycle :

Une machine frigorifique produit de la chaleur (\dot{Q}_{out}) et du froid (\dot{Q}_{in}). Elle consomme du travail (\dot{W}_C). La performance de cette machine est mesurée par son efficacité (encore appelé coefficient de performance *COP*). L'expression de cette efficacité dépend de l'utilisation de la machine. On distingue ainsi 2 types d'utilisation:

III- Analyse thermodynamique

- Machine refroidissante

Ce type de machine est utilisée pour refroidir un local (réfrigérateur ou climatiseur). On met l'évaporateur de la machine dans ce local et le condenseur à l'extérieur du local. La machine va donc enlever la chaleur \dot{Q}_{in} du local. L'efficacité de la machine frigorifique refroidissante est :

$$\beta_{Machine, refroidissante} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{W}_C} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

III- Analyse thermodynamique

- Machine chauffante

Ce type de machine est utilisée pour chauffer un local (pompe à chaleur). On met le condenseur de la machine dans ce local et l'évaporateur à l'extérieur du local. La machine va donc fournir la chaleur \dot{Q}_{out} au local.

L'efficacité de la machine frigorifique chauffante est :

$$\beta_{Machine,chauffante} = -\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{W}_C} = \frac{h_3 - h_2}{h_2 - h_1}$$

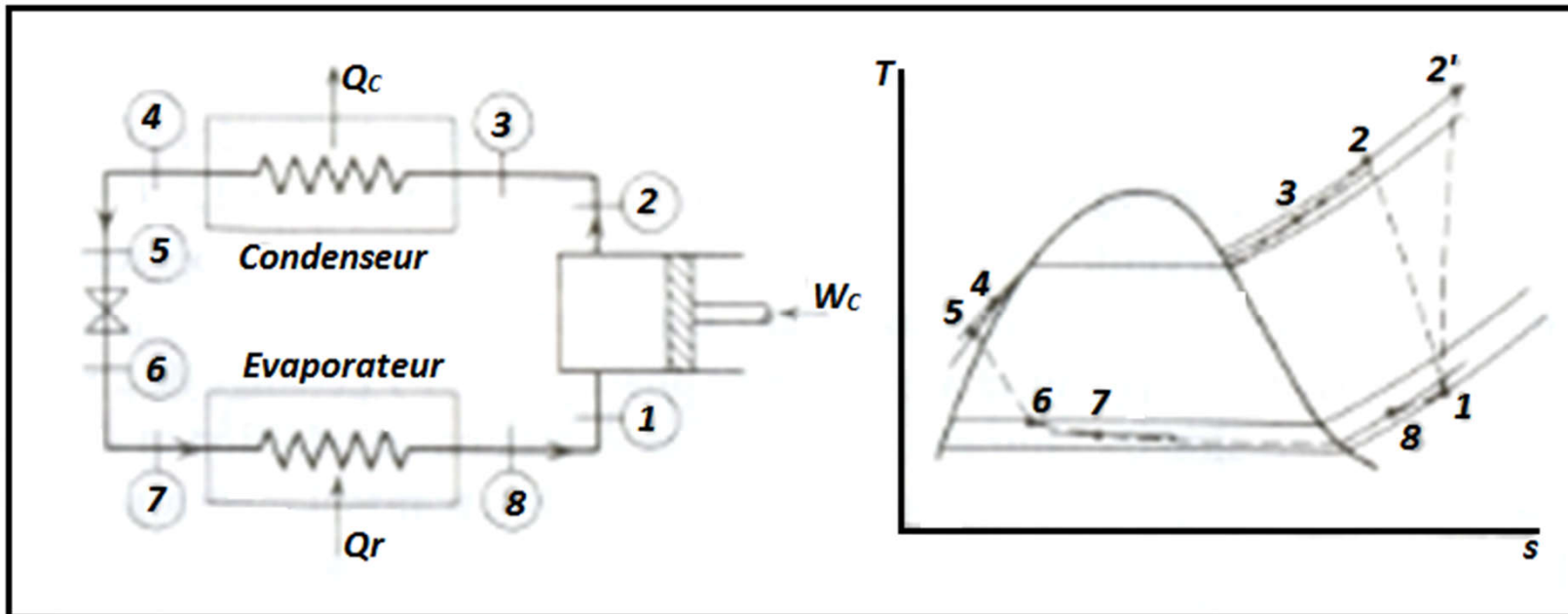
III- Analyse thermodynamique

- Cycle de réfrigération réel

Le cycle réel d'une machine frigorifique diffère quelque peu du cycle idéal du fait des échanges de chaleur avec le milieu ambiant et des chutes de pression associées à l'écoulement du fluide.

Le cycle réel est représenté sur la figure ci dessous.

III- Analyse thermodynamique



III- Analyse thermodynamique

-La vapeur qui entre dans le compresseur est habituellement surchauffée. Pendant la compression, il se produit de l'irréversibilité ainsi qu'un échange de chaleur avec le milieu ambiant dont le sens dépend de la température du réfrigérant et de celle de milieu ambiant. Par conséquent, l'entropie est susceptible d'augmenter ou de décroître pendant cette évolution : irréversibilité et apport de chaleur au réfrigérant entraînent une augmentation de l'entropie (processus 1-2'), tandis que la perte de chaleur par le réfrigérant cause une diminution de l'entropie (processus 1-2).

III- Analyse thermodynamique

- La pression du liquide à la sortie du condenseur est plus faible que la pression à l'entrée et la température du liquide sortant du condenseur est inférieure à la température de saturation (T_{sat}).
- La température à l'entrée de la soupape de détente est inférieure à la température à la sortie du condenseur. Ceci est dû à la perte de chaleur dans la tuyauterie, entre le condenseur et la soupape de détente (il s'agit d'un gain parce que le réfrigérant entre dans l'évaporateur avec une enthalpie plus faible, ce qui lui permet de capter plus de chaleur dans l'évaporateur).

III- Analyse thermodynamique

- Lorsque le réfrigérant passe dans l'évaporateur, il y a une chute de pression. Le réfrigérant peut être légèrement surchauffé à la sortie et, à cause de la chaleur acquise du milieu ambiant, la température augmentera dans la tuyauterie entre l'évaporateur et le compresseur. Cet échange est une perte parce qu'il augmente le travail du compresseur par suite de l'augmentation du volume massique du fluide qui y pénètre.