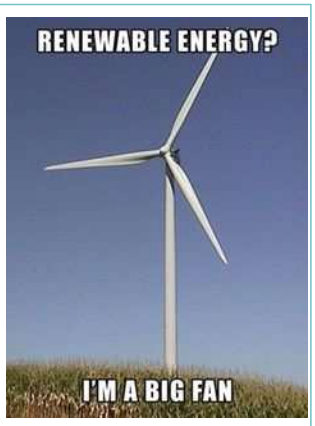
Chapitre E-6 Premier principe en système ouvert

A- Cadre
Système étudié
Surface de contrôle, volume de contrôle
Débit massique ou volumique
Comment définir un système fermé quand un fluide circule?
B- Premier principe en système ouvert
Description, grandeurs massiques
Travail d'admission et de refoulement (= « inutile »). Travail « utile »
Premier principe industriel, en énergie massique, en puissance
Exemples : compresseur, détendeur, échangeur thermique, turbine, tuyère
C- Diagramme (P,h) (= diagramme enthalpique ou de Mollier)
Allure générale, comparaison avec le diagramme de Clapeyron
Exemple d'un cycle frigorifique



A- Cadre

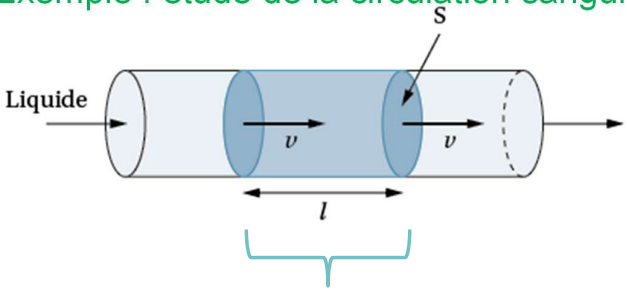
1-Système étudié

On étudie un **système fluide en écoulement** dans une machine thermodynamique. C'est donc un **système ouvert**, de la matière peut entrer et sortir.
On considère **une seule entrée et une seule sortie** : c'est le cas pratique le plus courant. On considère un **régime permanent** : il n'y a pas d'accumulation de matière dans le système, le débit d'entrée est égal au débit de sortie.

2- Volume de contrôle et surface de contrôle

Pour un système fermé : pas de problème pour définir l'intérieur et l'extérieur, les limites sont claires. En revanche, pour un système ouvert, c'est moins évident. On va définir une **surface de contrôle** fictive et fermée qui délimite le système étudié. L'intérieur de cette surface est le **volume de contrôle**.

Exemple : étude de la circulation sanguine dans un vaisseau cylindrique



Système étudié

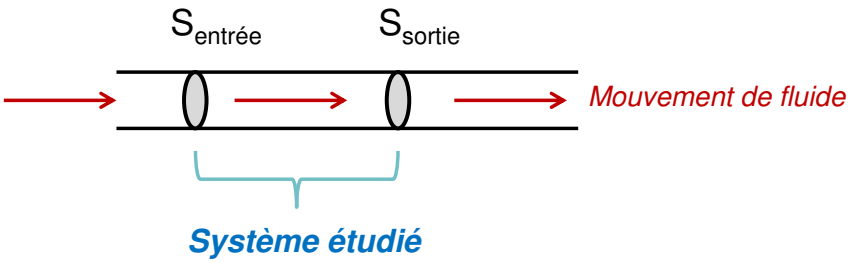
On peut choisir comme système la portion de fluide contenue entre les deux sections S indiquées sur le schéma, séparée par une longueur l

Exprimer la surface et le volume de contrôle en fonction de l et du rayon R du cylindre.

$S_{contrôle}$ =

$V_{contrôle}$ =

3- Mouvement de fluide dans le système



Il n'y a pas d'accumulation de fluide dans le système.
On note **dm** la masse de liquide qui circule pendant **dt**. C'est la même masse qui entre par $S_{entrée}$ et qui sort par S_{sortie}.

Le **débit massique** de fluide est

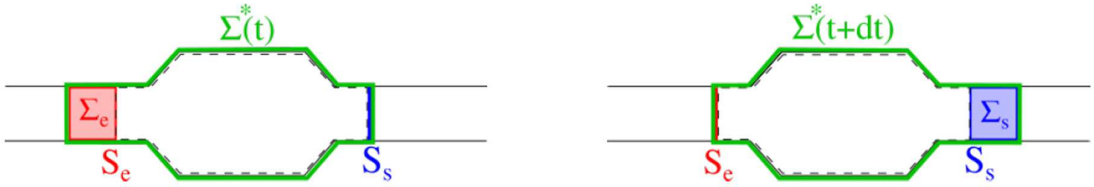
$$D_m = \frac{dm}{dt}$$ U.S.I. :

Le débit est donc la masse qui circule par unité de temps. On peut aussi l'appeler **flux de matière**.

Attention, on parle parfois aussi de **débit volumique** (ou « débit volume ») D_v exprimé par exemple en $m^{3.} s^{-1}$
Comment sont reliés les débits massique et volumique?

4- Comment utiliser les équations pour un système ouvert?

Problème : les lois de la thermodynamique ont été établies pour un système fermé. Pour les utiliser, il faut donc définir un système « fermé » à partir du système ouvert.
Soit Σ le système contenu dans le volume de contrôle choisi. Pour une transformation, on note Σ_e le fluide qui va entrer dans le volume de contrôle et Σ_s le fluide qui va en sortir. Le système Σ^* composé de $\{\Sigma + \Sigma_e\}$ au départ et $\{\Sigma + \Sigma_s\}$ à la fin est bien un système fermé.
Pour une transformation élémentaire :



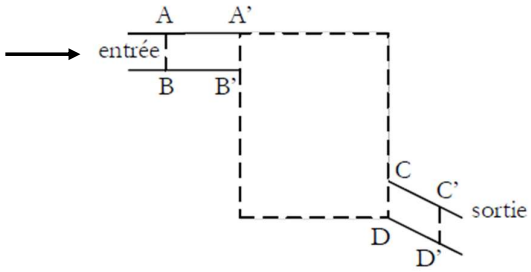
- A *t*, le système fermé est composé du système ouvert Σ plus la masse dm_e qui rentre dans Σ entre *t* et *t* + *dt*, notée Σ*e* : $\Sigma^*(t) = \Sigma + \Sigma e$
- A *t* + *dt*, le système fermé est composé du système ouvert Σ plus la masse dm_s qui sort de Σ entre *t* et *t* + *dt*, notée Σ*s* : $\Sigma^*(t + dt) = \Sigma + \Sigma s$

On peut appliquer au système Σ^* le premier principe

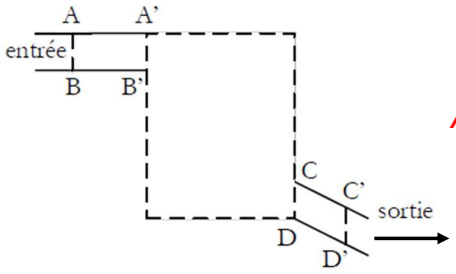
- Pour une transformation finie :
- Pour une transformation élémentaire :

B- Premier principe en système ouvert

1-Système étudié = fluide en écoulement, transformation élémentaire



À t : le fluide est contenu dans le volume ABCD



À t+dt : le fluide est contenu dans le volume A'B'C'D'

À savoir faire

Système :
On note dm la masse qui circule pendant dt, contenue dans les volumes dV_e à l'entrée et dV_s à la sortie. *A indiquer sur les schémas*
On se place en régime permanent, le débit massique de fluide est D_m=
On utilisera les **grandeurs massiques**

On rappelle les notations *et unités S.I.*:

Energie interne :	Énergie interne massique :
Enthalpie :	Enthalpie massique :
Transfert mécanique :	Transfert mécanique massique :
Transfert thermique :	Transfert thermique massique :

On note U_0 l'énergie interne du fluide dans le volume de contrôle A'B'CD

À t, U(t) = À t+dt, U(t+dt) =

➢ *Travail des forces pressantes :*

Il faut évidemment fournir au fluide un travail pour le faire simplement circuler, c'est à dire entrer puis sortir. Plus précisément :
Il faut un travail d'admission pour faire entrer le fluide à P_e, T_e : c'est l'équivalent d'un piston qui « pousse » le fluide à l'intérieur avec une pression P_e

$\delta W_{admission}$ =

Il faut aussi un travail de refoulement pour faire sortir le fluide à P_s, T_s : c'est l'équivalent d'un piston qui « tire » le fluide à l'intérieur avec une pression P_s

$\delta W_{refoulement}$ =

Total :

Ce travail est-il utile?
On peut donc décomposer le travail reçu par le système :

➢ *Application du premier principe en notant δW_u le travail utile*

2- A retenir : premier principe industriel

Premier principe en général :

En grandeur massique :

Dans le cas plus général où la vitesse du fluide et/ou son énergie potentielle macroscopique varient :

énergie cinétique massique : e_c =

énergie potentielle massique de pesanteur : e_p =

Premier principe dans le cas général d'un système ouvert : $\mathbf{\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = w_{utile} + q}$

Pour une transformation élémentaire, pendant dt :

3- Premier principe en termes de puissance

Pour avoir des puissances, il suffit de diviser par dt et multiplier par dm soit :

On note la puissance mécanique utile $\mathbf{P_{méca}}$

Et la puissance thermique $\mathbf{P_{th}}$

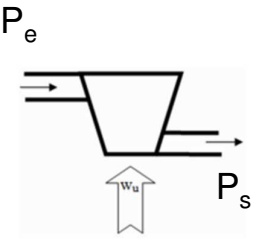
En utilisant le débit massique D_m , on obtient

$$\mathbf{D_m .(\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p) = P_{méca} + P_{th}}$$

unités

4- cas particuliers

❑ **Compresseur ou pompe** : élément permettant d'augmenter la pression d'un fluide : $P_s > P_e$ *(ex : alimentation d'un réseau d'eau)*



Dans ce cas, il n'y a pas de variation macroscopique d'énergie et le transfert thermique est généralement négligeable.

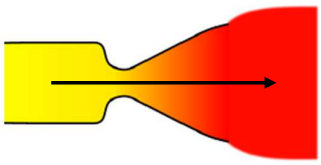
Alors : w_{utile} signe ?

❑ **Détendeur :** élément permettant d'abaisser la pression d'un fluide. Il n'y a pas de pièce mécanique mobile donc le fluide ne reçoit ni ne donne du travail. Il n'y a généralement pas de transfert thermique. Les variations d'énergie cinétique et potentielle sont négligeables. D'où $\Delta h \approx$

❑ **Turbine** : élément dans lequel le fluide met en mouvement une pièce mécanique mobile : w_{utile} *(Ex : production d'électricité)*

Dans ce cas, le fluide change de vitesse. En revanche, il n'y a pas de variation d'E_p macroscopique et pas de transfert thermique

❑ **Tuyère** : conduit de section variable permettant d'accroître la vitesse du fluide. Il n'y a pas de pièce mécanique mobile donc $w_{utile} \simeq$. La variation d'énergie potentielle est négligeable. Il n'y a pas de transfert thermique :



Comment varie la vitesse selon la section du tube?

Exprimer le débit massique dans une conduite de section S en fonction de la vitesse du fluide. En déduire une relation dans une conduite de section variable.

❑ **Echangeur :** élément dans lequel a lieu un échange thermique. C'est en pratique de la tuyauterie métallique (grande surface d'échange et paroi diathermes).

❑ **Évaporateur ou condenseur** : échangeur dans lequel a lieu un changement d'état du fluide. Pas de pièce mécanique mobile : $w_{utile} \simeq 0$.

Les variations d'énergie cinétique et potentielle macroscopiques sont négligeables. Signe du transfert thermique ?

Conclusion du §

En pratique, les transformations des processus industriels mettent en jeu un fluide qui subit des compressions/détentes/échanges de chaleur. Pour décrire ces transformations, les variables température T, pression P et titre en vapeur x sont évidemment nécessaires. L'enthalpie massique h est aussi fondamentale puisqu'on vient de voir qu'elle décrit les échanges d'énergie entre le système et l'extérieur.

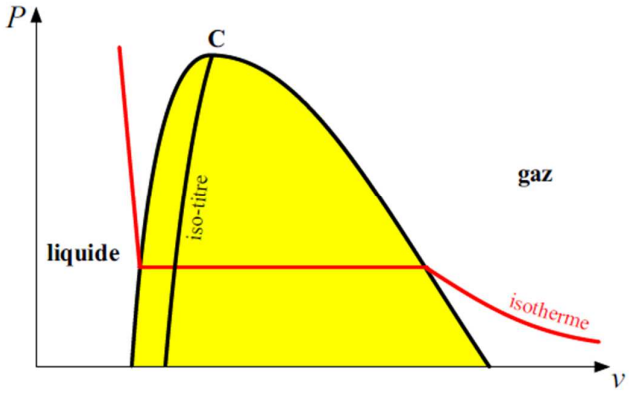
Le volume massique v est aussi utile pour dimensionner les conduits des machines thermiques car il est directement relié au débit massique Dm.

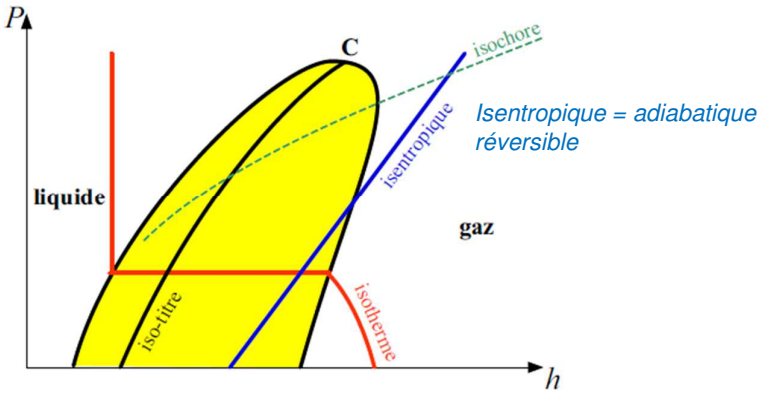
Pour passer des grandeurs massiques étudiées en détail au système réel, il suffit

C- Diagramme (P,h) d'un fluide réel (= diagramme de Mollier ou diagramme enthalpique)

1-Allure générale

Pour un fluide diphasé, on reporte la pression P en fonction de l'enthalpie massique h. On peut voir des analogies entre les diagrammes de Clapeyron (P,v) et le diagramme (P,h)



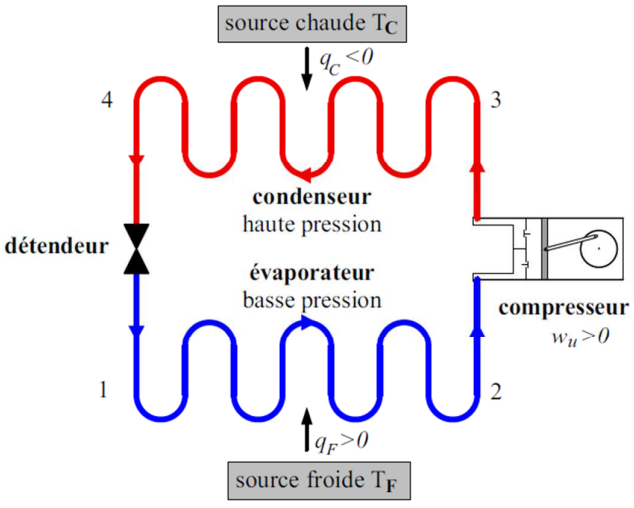


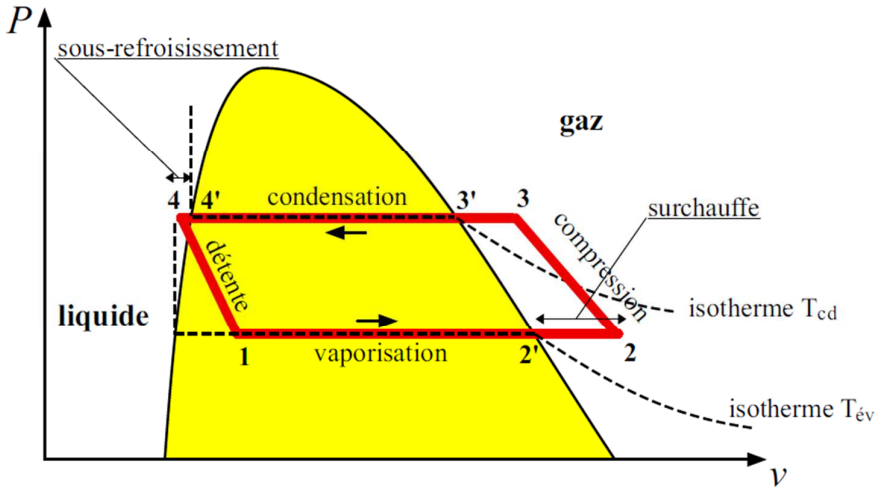
Isentropique = adiabatique réversible

Repérer le domaine diphasé sur ces diagrammes
Commenter l'allure des isothermes
A quoi correspond le point C?
Comment peut-on déterminer le titre x en vapeur?

Les diagrammes très détaillés des fluides réels sont disponibles.
Intérêt : pour une transformation, on peut reporter les points i et f sur ces diagrammes. On peut lire directement Δh et le relier selon les cas à w_{utile} ou q

2- Exemple d'un cycle frigorifique





Cycle :
1→2 : isobare. Vaporisation de **1** à **2'** puis chauffage de **2'** à **2** jusqu'à T_2
2→3 : adiabatique supposée réversible jusqu'à $T_3 > T_c$
3→4 : isobare.
4→1 : détente à enthalpie constante (isenthalpique). S'accompagne d'une vaporisation partielle
Le cycle est reporté sur le diagramme enthalpique suivant, pour le fluide $CH_2F\text{-}CF_3$

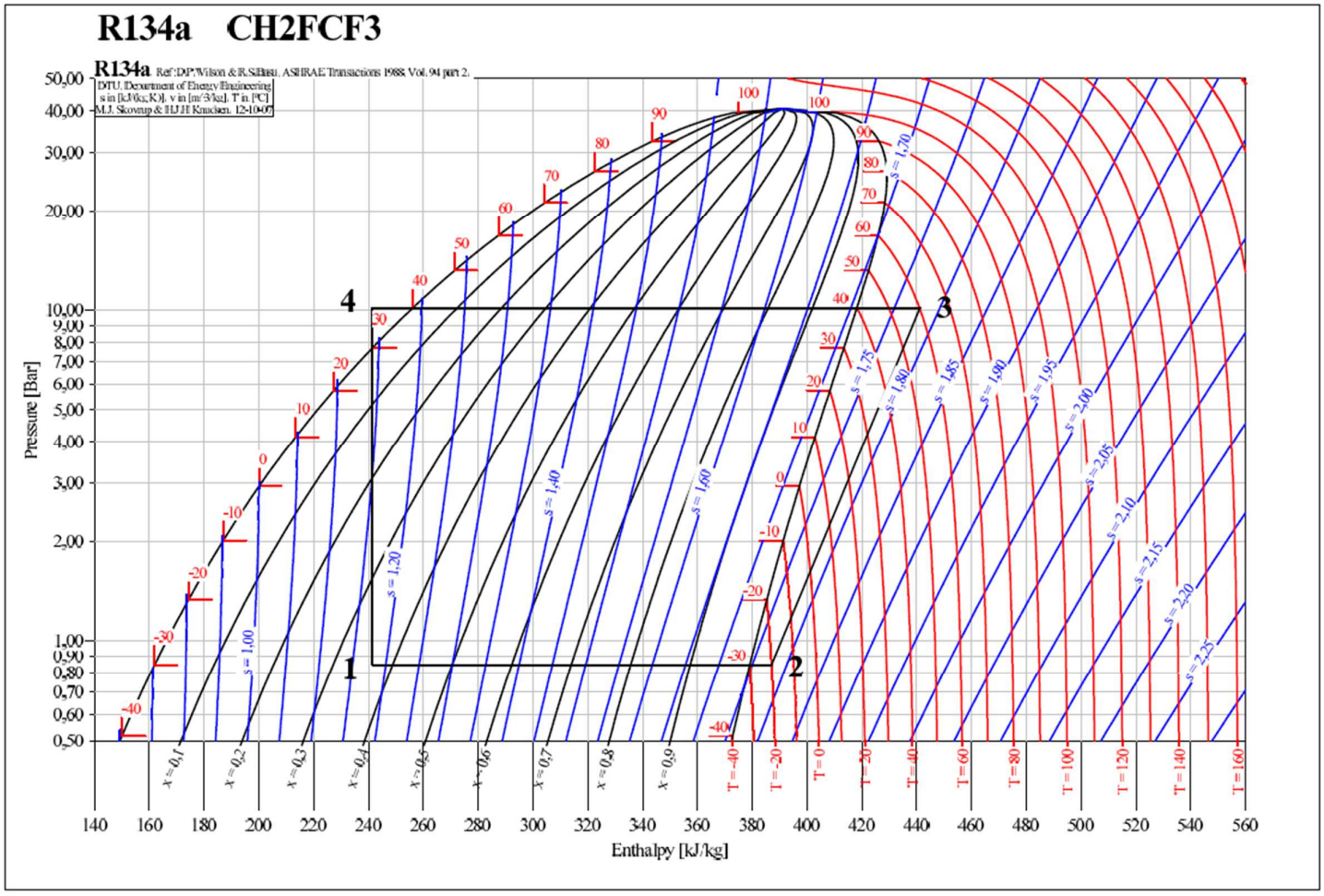


Diagramme enthalpique du fluide

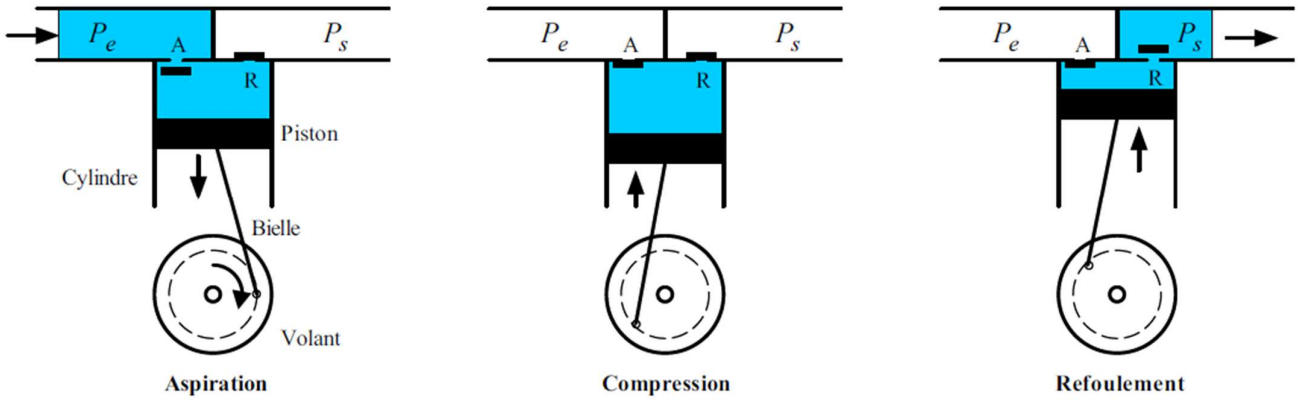
A partir des diagrammes répondre aux questions suivantes

1) *Quel est le taux de compression du fluide, rapport entre la pression dans le condenseur et celle dans l'évaporateur?*
2) *Quelles sont les températures de changement d'état du fluide au cours du cycle?*
3) *Quel est la composition du fluide à l'entrée de l'évaporateur?*
4) *Quel est le transfert thermique avec la source froide? Avec la source chaude?*
5) *Quel est le travail fournit par le compresseur?*
6) *Quelle est l'efficacité du cycle?*
7) *La source froide est à -18°C et la source chaude à 20°C. Quelle est l'efficacité maximale?*

Annexe : principe de fonctionnement d'un compresseur

Si la détente d'un fluide ne pose aucun problème *(ça se fait tout seul !),* la compression nécessite un système mécanique plus complexe. Dans tous les cycles récepteurs (frigorifique ou P.A.C), c'est l'étape où de l'énergie mécanique est dépensée, un moteur extérieur fait fonctionner le compresseur en fournissant w_u

Ci-dessous, la compression du fluide de P_e à P_s est obtenue avec le mouvement de va et vient du piston vertical. Le fluide est d'abord aspiré par la soupape A puis comprimé puis refoulé par la soupape R.



Conclusion : le diagramme enthalpique est un outil pratique pour dimensionner une installation réelle. Il prendt en compte le comportement réel du fluide et en particulier du gaz qui n'aurait pas un comportement de gaz parfait. On l'appelle d'ailleurs « diagramme du frigoriste »