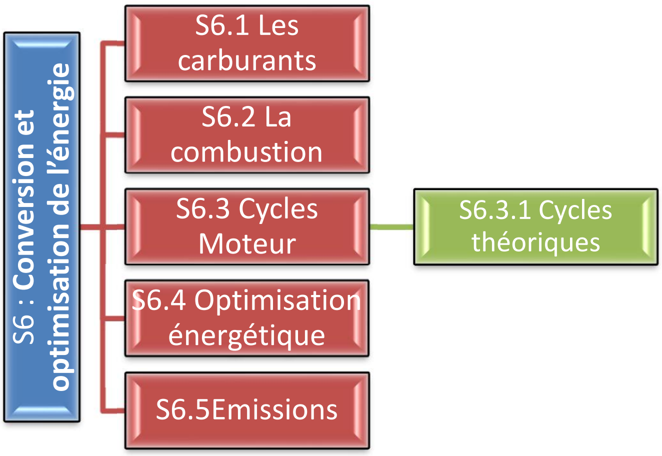
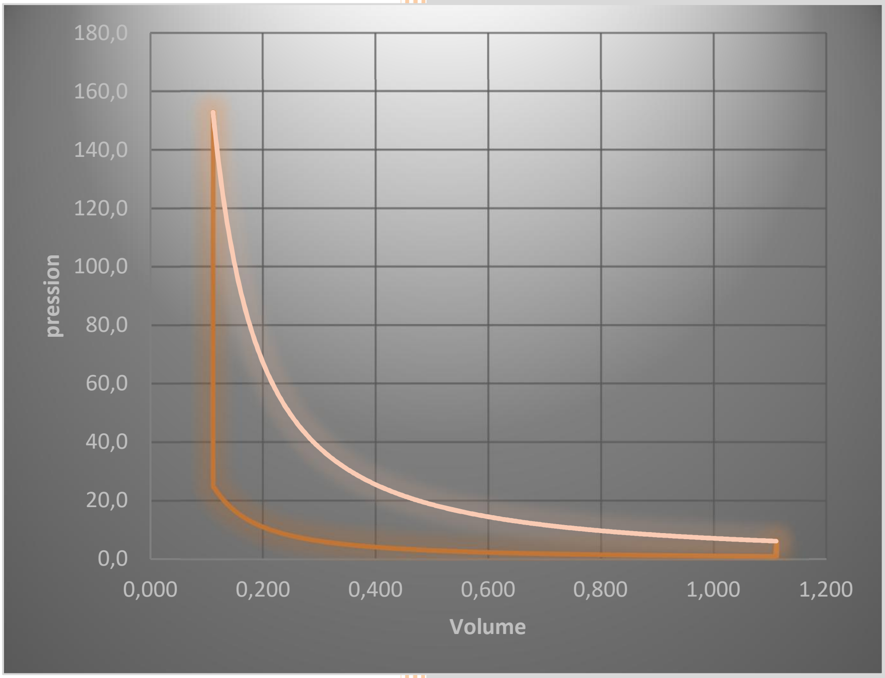


Cycles théoriques
Eléments de thermodynamique
Séquence 1



STS MCI

MCI Brest

TABLE

SEQUENCE 1 : ELEMENTS (MINIMUM) DE THERMODYNAMIQUE

1. Généralités

- Définition (Larousse) : branche de la physique qui étudie les propriétés des systèmes où interviennent les notions de température et de chaleur.
- Il n'est pas question dans ce document de faire le cours de thermodynamique. Nous allons simplement définir quelques notions de base, justes nécessaires pour étudier avec une certaine pertinence le cycle BdR.
- Dans notre utilisation de la thermodynamique, on considère l'évolution de la masse de gaz contenue dans le cylindre, qui donc participe au cycle. Il s'agit d'étudier les échanges d'énergie entre le système étudié (la masse de gaz) et le milieu qui l'entoure, appelé milieu extérieur.

2. Gaz parfait

- La notion de gaz parfait est un modèle théorique qui permet de décrire le comportement d'un gaz de façon simple. La plupart des gaz sont assimilables à un gaz parfait, du moins pour des basses pressions.
- Le gaz qui nous intéresse est donc composé d'air et de carburant, mais pour l'étude du cycle théorique, on ne prend en compte que l'air. De plus, l'air est considéré, d'un point de vue thermodynamique, comme un **gaz parfait**.
- Le gaz présent dans le cylindre est à tout moment caractérisé par sa masse $m\ (kg)$, son volume $v\ (m^3)$, sa pression $p\ (Pa)$, sa température $T\ (K)$.
    - ✓ m, v, p, T sont les variables d'état du gaz. On peut aussi définir la masse volumique : $\rho(kg \cdot m^{-3}) = \frac{m}{v}$.
- Pour un gaz parfait, les variables d'état sont liées par une relation appelée "équation caractéristique des gaz parfaits" :

$$p(Pa).v(m^3) = n(mol).R(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}).T(K)$$

$R = 8{,}314(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$, **constante universelle des gaz parfaits**

En introduisant la masse de gaz "à la place" du nombre de moles on a :

$$p(Pa).v(m^3) = m(kg).r(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}).T(K)$$

Où r est la **constante du gaz considéré**.

3. Transformations

- L'évolution du gaz entre 2 états s'appelle une transformation. On définit ainsi plusieurs transformations "élémentaires". Trois transformations suffisent à décrire le cycle BdR, et chaque type de transformation peut être décrit par une équation qui la caractérise :
    - ✓ Transformation isobare (à pression constante) : $p = cte$
    - ✓ Transformation isochore (à volume constant) : $v = cte$
    - ✓ Transformation isentropique ou adiabatique réversible (sans échange de chaleur entre le gaz et le milieu extérieur : $p \cdot v^\gamma = cte$ (loi de Laplace). γ est appelé **exposant isentropique**.

4. **Energie - premier principe**

> Par définition le travail d'une force est l'énergie fournie par cette force lorsque son point d'application se déplace.
>
> - Pour une translation : $W(J) = F(N) \cdot d(m)$
>   - ✓ $1\,J$ est donc le travail d'une force de $1\,N$ qui se déplace de $1\,m$.
> - Pour une rotation : $W(J) = C(m \cdot N) \cdot \alpha(rad)$
>   - ✓ $1\,J$ est donc le travail d'un couple de $1\,m \cdot N$ qui se déplace de $1\,rad$.
>
> La puissance est le travail développé par unité de temps : $P(W) = \frac{W(J)}{t(s)}$

- L'énergie est la base de la thermodynamique. Il y a plusieurs types d'énergie. Distinguons ici les notions de chaleur et de travail. La chaleur est par exemple l'énergie transférée spontanément d'un corps "chaud" vers un corps "froid". Le travail est par exemple l'énergie transférée par le piston au vilebrequin et par suite à la machine entraînée par le moteur. Chaleur et travail sont homogènes à de l'énergie. L'unité de l'énergie est le Joule (J).
- Le travail "élémentaire" du gaz dans le cylindre, entre deux positions très proches du piston définissant une variation très petite de volume, se calcule par : $dW = -p \cdot dv$. Le travail échangé lors d'une transformation sera la somme des travaux élémentaires : $W_1^2 = \int_1^2 -p \cdot dv$. Et pour un cycle on aura : $W_{cycle} = \int_{cycle} -p \cdot dv$.
- La troisième forme d'énergie qui nous intéresse pour notre approche de la thermodynamique est l'énergie interne U. Il s'agit de l'énergie cinétique liée à l'agitation des molécules qui composent le gaz. Une masse de gaz apparemment au repos (échelle macroscopique) est en fait un système en agitation intense si on se place à l'échelle microscopique. Ces mouvements désordonnés des particules définissent une énergie dite énergie interne.
- **Premier principe de la thermodynamique :** « Au cours d'une transformation quelconque d'un système fermé, la variation de son énergie est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, par transfert thermique (chaleur) et transfert mécanique (travail). » **Il y a donc conservation de l'énergie**. En d'autres termes, la variation d'énergie interne d'un système fermé (sans échange de matière) est égale à la somme de la chaleur et du travail échangés entre le gaz et le milieu extérieur.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

- Pour un **gaz parfait**, la variation d'énergie interne peut se calculer par :

$$\Delta U(J) = m(kg) \cdot c_v(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}) \cdot \Delta T(K)$$

avec c_v la capacité thermique à volume constant.

  - ✓ On définit également la capacité thermique à pression constante : c_p.
  - ✓ Les liens entre c_v et c_p sont définis par les 2 relations de Mayer :

$$\frac{c_p}{c_v} = \gamma \text{ et } c_p - c_v = r$$

5. Exercices

5.1. Calcul de la constante de l'air

- Déterminer la constante de l'air r, en sachant que la masse molaire de l'air est $M = 29\ g \cdot mol^{-1}$.
  - ✓ $p(Pa).v(m^3) = n(mol).R(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}).T(K) = m(kg).r(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}).T(K)$
  - ✓ Pour une mole et en simplifiant par T : $R(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}) = M \cdot r(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
  - ✓ Il vient donc : $r = \frac{R}{M}$
  - ✓ AN (attention : la masse molaire doit être exprimée en $kg \cdot mol^{-1}$) :

$$r = \frac{8{,}314}{29 \cdot 10^{-3}} = 286{,}7\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

5.2. Masse volumique de l'air aux conditions ambiantes et de référence

- Calculer la masse volumique de l'air dans les conditions indiquées :
- $\rho = \frac{m}{v} = \frac{p}{r \cdot T}$
- Conditions du jour (06/09/2016, 9h) : pression atmosphérique : $p = 1028\ mbar;\ \theta = 20{,}5°C$.
  - ✓ $\rho = \frac{p}{r \cdot T} = \frac{1028(mbar) \cdot 100(Pa.mbar^{-1})}{273+20{,}5} = 1{,}22\ kg \cdot m^{-3}$
- Conditions de référence (standard) : pression atmosphérique : $p = 1000\ mbar;\ \theta = 25°C$.
  - ✓ $\rho = \frac{p}{r \cdot T} = \frac{1000(mbar) \cdot 100(Pa.mbar^{-1})}{273+25} = 1{,}169\ kg \cdot m^{-3}$
    - On prendra cette valeur comme masse volumique de référence pour les calculs liés au **remplissage en air standard** (RAS).

5.3. Variation d'énergie interne pour une transformation isochore

- En reprenant la définition du premier principe, quelle est la variation de l'énergie interne d'un gaz parfait lors d'une transformation isochore ?
  - ✓ Pour une transformation quelconque on a :
    $$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$
  - ✓ Par ailleurs on sait que pour un gaz parfait :
    $$\Delta U(J) = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$
  - ✓ On sait aussi que le travail est : $\Delta W = -p \cdot \Delta v$
  - ✓ Pour une isochore, par définition, la variation de volume est nulle. Par conséquent le travail est également nul et il vient :

$$\Delta U = \Delta Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$

5.4. Variation d'énergie interne pour une transformation isentropique

- ✓ Pour une transformation quelconque on a :
  $$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$
- ✓ Par ailleurs on sait que pour un gaz parfait :
  $$\Delta U(J) = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$
- ✓ Pour une isentropique, par définition, la quantité de chaleur échangée est nulle. Par conséquent il vient :

$$\Delta U = \Delta W = m \cdot c_v \cdot \Delta T$$

5.5. Calcul des capacités thermiques pour l'air

- Calculer c_v et c_p pour l'air.
    - ✓ En reprenant les relations de Mayer : $\frac{c_p}{c_v} = \gamma$ et $c_p - c_v = r$
        - $c_p = \gamma \cdot c_v$
        - $\gamma \cdot c_v - c_v = r \Longrightarrow c_v \cdot (\gamma - 1) = r \Longrightarrow c_v = \frac{r}{\gamma-1} = \frac{287}{0.4} = 717{,}5\, J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
        - $c_p = 1{,}4 \times 717{,}5 = 1001\, J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$