*Constante universelle des gaz parfaits : R=8,314 J. mol$^{-1}$.K$^{-1}$*

Semaine 5 - Séance 1

# SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES À L'ÉQUILIBRE ET NOTION DE TRANSFORMATIONS

**Exercice 1 : Etude expérimentale de différents gaz**

A- On étudie expérimentalement $n$ moles d'air à la pression $P$ = 1,013bar. On a relevé pour cela diverses valeurs de température $\theta$ et de masse volumique $\mu$.

| θ (°C) | 0,0 | 5,0 | 10,0 | 15,0 | 20,0 | 25,0 | 30,0 | 35,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| μ (kg/m$^3$) | 1,293 | 1,270 | 1,247 | 1,226 | 1,205 | 1,184 | 1,165 | 1,146 |

1) Donner l'équation d'état des gaz parfaits en fonction de $P$, $T$, $M$ (masse molaire du gaz) et $\mu$.
2) On veut savoir si le gaz étudié expérimentalement se comporte comme un gaz parfait.
   a) Si on trace la courbe μ en fonction de 1/T, que doit-on obtenir comme courbe dans le cas d'un gaz parfait ?
   b) A partir des valeurs expérimentales données, tracer $\mu$ en fonction de $1/T$. On utilisera les unités du système international.
   c) Le gaz est-il parfait ? Justifier votre réponse.
   d) En déduire la valeur de la masse molaire $M$ de l'air.

B- On étudie maintenant une mole de vapeur d'eau à la température $T$ = 773,15 K. On mesure, pour diverses valeurs de la pression $P$, les valeurs du volume $V$.

| $P$ (bar) | 1 | 20 | 70 | 100 |
|---|---|---|---|---|
| $V$ (L) | 64,3 | 3,17 | 0,87 | 0,59 |

1) Justifier que ce gaz n'est pas parfait
2) On utilise le modèle de Van Der Waals pour décrire ce gaz.
   a) Donner l'équation d'état de ce gaz.
   b) Expliquer brièvement pourquoi on ajoute des termes par rapport à l'équation d'état des gaz parfaits.

**Exercice 2 : Transformation isochore**

Un récipient clos contient un gaz à 17°C sous la pression atmosphérique.

1) A quelle température faut-il porter le gaz pour que la pression augmente de 50% ?
2) Représenter cette transformation dans le diagramme de Clapeyron $P = f(V)$.
3) Déterminer la quantité de matière $n$ de gaz si le volume du récipient $V$ vaut $V$= 12L et que le gaz est initialement à la pression atmosphérique.

**Exercice 3 : Application à quelques transformations particulières**

Chapitre 1 – Partie VI à compléter

**Exercice 4 : Suite de transformations**

Un cylindre vertical initialement vide, fermé par un piston mobile sans frottement appréciable, est à la pression atmosphérique. On introduit de l'air dans le cylindre et on attend l'équilibre thermodynamique.

1) Calculer la pression du gaz sachant que le piston a une section $S$= 20 cm$^2$ et une masse $m$= 4,0 kg.
2) La distance du piston au fond du cylindre était de $h_1$=20 cm. De combien se déplace le piston quand on rajoute sur sa face supérieure une masse de $M$=2,0 kg, sachant que la température garde une valeur constante de $\theta_1$=15°C ?
3) A quelle température $T_3$ faut-il porter le gaz pour que le piston reprenne sa position initiale ?
4) Achever le calcul de toutes les variables d'état du système, puis représenter cette suite de transformations en coordonnées ($P$,$V$) – sur un seul diagramme.

Semaine 6 - Séance 2

# DIFFÉRENTIELLE D'UNE FONCTION D'UNE VARIABLE

**Exercice 5 : Dilatation d'un cube**

On considère un cube de matière d'arête $a_0$ = 5 cm ; son volume est alors égal à $V_0 = a_0^3 = 125\ \text{cm}^3$.

Par dilatation thermique, l'arête du cube augmente de 10%, 1% ou 0,1%.

Remplir le tableau suivant à $10^{-2}$ cm$^3$ près, et comparer la variation de volume $\Delta V$ avec la différentielle du volume $dV$ en $a_0$.

Que peut-on conclure concernant l'utilisation du calcul différentiel ?

| a (cm) | 5,5 | 5,05 | 5,005 |
|---|---|---|---|
| $\Delta V$ (cm$^3$) | | | |
| $dV$ (cm$^3$) | | | |

A rédiger pour la semaine 7 - Séance 3

**Exercice C1: Ecart au gaz parfait**

On propose d'étudier le diazote gazeux à partir de courbes expérimentales données ci-après. Ces courbes représentent la fonction $\frac{PV_m}{RT} = f\left(\frac{1}{V_m}\right)$ pour différentes valeurs $T_i$ de la température $T$.

**1)** Montrer que le comportement de ce gaz n'est pas parfait.

**2)** Expliquer pourquoi les courbes ont une ordonnée à l'origine commune.

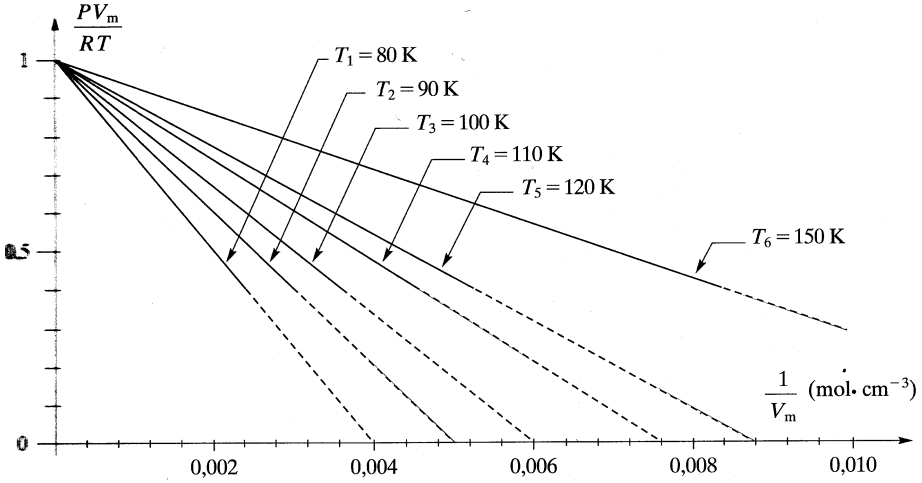
**3a)** Donner l'équation de chaque courbe sous la forme $\frac{PV_m}{RT} = 1 - \frac{B_i}{V_m}$. Les coefficients $B_i$ dépendent de la température.

Donner la valeur de $B_i$ pour chaque température $T_i$.

**3b)** En déduire l'équation d'état du diazote dans le domaine de température considéré sous la forme $PV_m = RT\left[1 - \frac{A}{V_m T^2}\right]$ où $A$ est une constante positive à déterminer.

**3c)** Ecrire cette équation d'état en fonction des variables $P,V,T$ et $n$ la quantité de matière.

**3d)** Donner une interprétation physique du terme $\frac{A}{T^2}$.




**Exercice C2 : Modèle de gaz parfait pour la synthèse de l'ammoniac**

Le procédé Haber Bosch – finalisé en 1913 - de synthèse chimique industrielle de l'ammoniac utilise la réaction

$$N_2 + 3H_2 \rightleftarrows 2NH_3$$

tous les composés étant gazeux. L'ammoniac est utilisé, entre autre, pour la production d'engrais azotés. Selon l'agence internationale de l'énergie, en 2020, la production mondiale d'ammoniac s'élevait à 152 millions de tonnes et représentait environ 2% de la consommation d'énergie primaire mondiale.

Cette synthèse se déroule à haute pression (entre 200 et 300 bar) et haute température $\theta_0$=500 °C.

On considère une enceinte de volume constant $V$=13,0 m$^3$ dans laquelle on introduit les quantités suivantes : $n$ ($N_2$)=20,0 kmol et $n$($H_2$)=45,0 kmol. On considère que tous les gaz se comportent comme des gaz parfaits et que la réaction se déroule à température constante $\theta_0$.

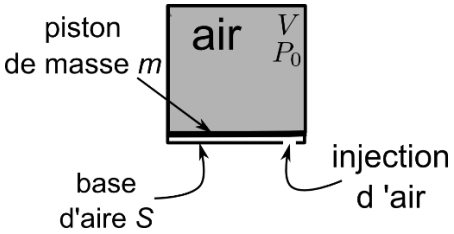
**1)** Déterminer les expressions puis calculer, avant réaction chimique, pour chacun des constituants

- les fractions molaires
- les pressions partielles.

**2)** Soit $t_1$ la date à laquelle la moitié de la quantité de $N_2$ initialement présente a réagi. Calculer, à cette date, la pression $P_1$ dans l'enceinte. Commenter.

**Exercice C3 : Injection d'air**

On considère le système cylindre-piston représenté sur le schéma ci-dessous. Le réservoir cylindrique de volume constant $V$ est séparé en deux parties par un piston de masse $m$ d'épaisseur négligeable pouvant coulisser sans frottements. La surface de la base du cylindre est notée $S$.




Initialement, la partie supérieure du réservoir est remplie par une quantité de matière $n_0$ d'air à la pression $P_0$ tandis que la partie inférieure est vide.
A travers un petit orifice dans la partie inférieure du réservoir (voir schéma), une quantité de matière $n$ d'air est lentement injectée de telle manière à ce que le piston sépare le réservoir en deux parties égales. On considère qu'au cours de cette transformation, la température reste égale à $T_0$ et que l'air se comporte comme un gaz parfait.

**1)** A l'aide de deux adjectifs que vous définirez de manière précise, décrire la transformation subie par l'air dans la partie supérieure du réservoir.

**2)** Déterminer la quantité d'air $n$ injectée dans la partie inférieure du cylindre en fonction de $n_0$, $m$, $S$, $P_0$, et le champ gravitationnel terrestre $g$. Vérifier la dimension du résultat obtenu.

Semaine 7 - Séance 3

**Exercice 6 : Formules d'approximation en physique**

A l'aide du calcul différentiel appliqué aux petites variations, déterminer les expressions linéarisées approchées de :

- sin$x$ au voisinage de $x$ = 0
- e$^x$ au voisinage de $x$ = 0
- ln(1 + $x$) au voisinage de $x$ = 0
- cos$x$ au voisinage de $x = \frac{\pi}{2}$.

## FONCTIONS DE PLUSIEURS VARIABLES

**Exercice 7 : Dérivées partielles**

1) Calculer les dérivées partielles au 1$^{er}$ ordre de la fonction
$$f(x,y) = \frac{x^2}{y} - x\ln x$$
et écrire la différentielle $df$ de la fonction $f$.
2) Calculer les dérivées partielles au 2$^{ème}$ ordre de $f(x,y)$. Comparer.

**Exercice 8 : Coefficients thermoélastiques d'un gaz parfait et d'un gaz réel**

1. Exprimer, dans le cas d'un **gaz parfait**, les coefficients de compressibilité isotherme $\chi_T$ et de dilatation isobare $\alpha$.
2. On étudie un fluide qui vérifie l'équation d'état suivante :

$$\left(P + \frac{a\,n^2}{V^2}\right)(V - n\,b) = n\,R\,T$$

a) On peut écrire cette équation sous la forme $f(P,V,T)=0$. Déterminer la différentielle de $df$ de cette fonction.

b) En déduire les coefficients thermoélastiques du gaz.

On rappelle les définitions des coefficients de compressibilité isotherme $\chi_T$ et de dilatation isobare $\alpha$.

$$\chi_T = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \text{ et } \alpha = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

Semaine 8 - Séance 4

## PREMIER PRINCIPE DES SYSTÈMES FERMÉS

**Exercice 9 : Intégration d'un travail élémentaire**

Considérons deux états (1) et (2) d'un système constitué de $n$ moles de gaz parfait. Les états (1) et (2) sont définis respectivement par : $(P_1, V_1, T_1)$ et $(P_2, V_2, T_2)$.
Envisageons également deux suites de transformations lentes qui permettent de faire passer le système de l'état (1) à l'état (2) :

- chemin ⓐ : compression isotherme
- chemin ⓑ : contraction isobare puis échauffement isochore

1) Tracer les transformations ⓐ et ⓑ sur le même diagramme $(P,V)$.

2) Déterminer le travail des forces de pression de l'état (1) à l'état (2), sur chacun des chemins ⓐ et ⓑ. *Les résultats seront exprimés en fonction des seules données :* $n, P_1, V_1, T_1, P_2, V_2, T_2$.

Commenter.

**Exercice 10 : Transformations lentes d'un gaz parfait (1)**

Considérons un système constitué de $n$ moles de gaz parfait, qui passe d'un état (1) défini par : $(P_1, V_1, T_1)$ à un état (2) défini par : $(P_2, V_2, T_2)$.

Les capacités thermiques $C_v$ et $C_p$ du gaz sont constantes.

*Tous les résultats seront exprimés en fonction des seules données :*
$C_v, C_p, P_1, V_1, T_1, P_2, V_2, T_2$ et $R$.

1) Soit la compression isotherme LENTE, notée T1.

1.a Tracer la courbe de la fonction $P(V)$ qui représente la transformation T1 dans le plan de Clapeyron.

1.b Calculer le travail puis le transfert thermique reçus de l'extérieur par le gaz au cours de cette transformation.

1.c Représenter le travail reçu par le gaz dans le plan de Clapeyron.

2) Mêmes questions a et b pour chacune des transformations LENTES suivantes : T2 : dilatation isobare

T3 : refroidissement isochore T4 : détente adiabatique réversible

T5 : détente isotherme puis dilatation isobare

T6 : échauffement isochore puis contraction isobare.

Pour la semaine 11 - Séance 5

**Finir l'exercice 10 (obligatoire)**

Semaine 11 – Séance 5

**Exercice 11 : Gaz parfait dans un cylindre calorifugé**

On considère un récipient cylindrique de section $\Sigma = 1{,}00$ cm$^2$ dont la paroi supérieure est un piston qui glisse sans frottement. Ce cylindre est situé dans un laboratoire où la pression atmosphérique est $P_0 = 1{,}00.10^5$ Pa. Le poids du piston est négligeable devant la force due à la pression atmosphérique. Les parois du récipient et le piston sont calorifugés. Ce récipient contient un gaz parfait monoatomique à l'équilibre (1) : La température vaut $T_1 = 300$ K et la hauteur de gaz est $h_1 = 10{,}0$ cm.

Rapport isentropique du gaz : $\gamma = \frac{5}{3}$.

1) Calculer la quantité de matière de gaz contenue dans le récipient.

2.a On ajoute successivement sur le piston de petites masses dont la masse totale est égale à $M = 1{,}00$ kg, et on attend qu'un nouvel état d'équilibre (2) s'établisse. Déterminer la position $h_2$ du piston ainsi que la température $T_2$ du gaz.

2.b On retire ensuite successivement toutes les petites masses posées sur le piston, et on attend qu'un nouvel état d'équilibre (3) s'établisse.

Déterminer la nouvelle position $h_3$ du piston ainsi que la température $T_3$ du gaz.

2.c Représenter ces transformations dans le diagramme de Clapeyron.

3) On ramène le système dans l'état initial (1).

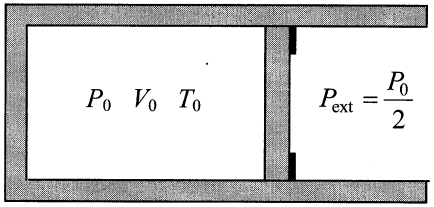
3.a On place sur le piston une masse $M = 1$ kg et on attend un nouvel équilibre (2'). Déterminer $h_2'$ et $T_2'$.

3.b On retire la surcharge $M$ et on attend un nouvel équilibre (3'). Déterminer $h_3'$ et $T_3'$.

## A rédiger pour la semaine 12 - Séance 6

**Exercice C4 : Détente d'un gaz parfait**

Une quantité $n$ d'un gaz supposé parfait et de coefficient isentropique γ, est enfermé dans un récipient aux parois complètement calorifugées ; l'une des parois est mobile, horizontalement, sans frottement.




Dans l'état initial (figure ci-contre), la paroi est bloquée et le gaz occupe alors un volume $V_0$ à une température $T_0$ et à une pression $P_0$.

On débloque alors la paroi mobile et le gaz se détend spontanément, jusqu'à un nouvel état d'équilibre caractérisé par les paramètres $V_1$, $T_1$ et $P_1$. La pression de l'air extérieur est constante et égale à $P_{ext}=\frac{P_0}{2}$.

**1)** Caractériser la transformation subie par le gaz par un nom et au moins deux adjectifs. Justifier vos choix.

**2)** Déterminer les expressions de $P_1$, puis $V_1$ et $T_1$, en fonction de tout ou partie des données γ, $V_0$, $T_0$ et $P_0$.

**3)** Vérifier qu'il s'agit bien d'une détente. Le gaz s'est-il réchauffé ou refroidi ?

## Semaine 12 - Séance 6

**Exercice 12 : Système composite**

Un cylindre horizontal est divisé en deux compartiments A et B par un piston qui peut glisser sans frottement. A l'équilibre initial, chaque compartiment contient $V_0 = 20$ L d'oxygène à $\theta_0 = 27$°C sous une pression $P_0 = 1{,}0.10^5$ Pa. Les parois du cylindre et le piston sont calorifugés, les gaz sont des gaz parfaits.

Dans le compartiment A, une résistance chauffante de capacité thermique négligeable devant celle du gaz, est parcourue par un courant électrique. On chauffe le gaz A jusqu'à un nouvel état d'équilibre caractérisé, pour le gaz B, par : $\theta_B = 140$°C et $P_B = 2{,}0.10^5$ Pa.

Rapport isentropique de l'oxygène : $\gamma = 1{,}4$

1) Déterminer par le calcul si la compression du gaz B est adiabatique réversible.

2) Calculer :

a) La masse d'oxygène contenue dans chaque compartiment.

b) Le volume final du gaz A.

c) La température finale du gaz A.

d) La variation d'énergie du gaz B.

e) La variation d'énergie du gaz A.

f) Le transfert thermique de la résistance au gaz A.

g) Le travail reçu par le gaz B.

## Semaine 13 - Séance 7

**Exercice 13 : Méthode des mélanges (1)**

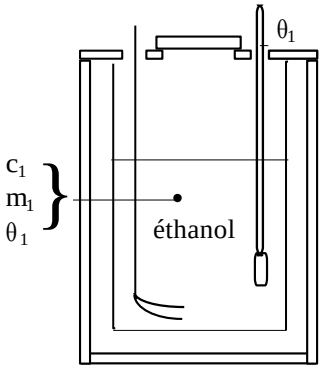
**Données:**

| Substances | zinc | verre | eau |
|---|---|---|---|
| Capacité massique ($kJ.K^{-1}.kg^{-1}$) | 0,38 | 0,80 | 4,18 |

On dispose d'un calorimètre constitué d'un vase intérieur en zinc (masse $m_z = 300$ g) et d'un agitateur en verre (masse $m_v = 50$ g). Les transferts thermiques sont négligeables entre le vase extérieur et le contenu du calorimètre.

1) Calculer la capacité thermique $C$ du calorimètre et de ses accessoires.
2) Ce dernier contient $m_1 = 400$ g d'éthanol à la température $\theta_1 = 17{,}5°C$ ; on y verse $m_2 = 200$ g d'eau à la température $\theta_2 = 24{,}7°C$ et on note la température lorsque l'équilibre est réalisé, soit $\theta_e = 20{,}6°C$.

   En déduire la valeur de la capacité thermique massique de l'éthanol.



état initial

A rédiger pour la semaine 14 - Séance 8

**Exercice C5 : Etude d'un cycle dans deux sens de parcours**

On considère deux moles de gaz parfait diatomique de coefficient $\gamma$=1,4 dans une enceinte munie d'un piston. On a $T_A = 650$ K et $V_B = 4V_A$.
On étudie le cycle de transformations suivant :

- A→B évolution adiabatique réversible
- B→C évolution lente isochore
- C→A évolution lente isotherme

**1)** Tracer l'allure du cycle dans un diagramme *(P;V)*.

**2)** Le cycle est parcouru **dans le sens trigonométrique ABCA.**
**2a)** Donner les expressions puis calculer les transferts thermiques reçus par le gaz au cours des trois transformations. En déduire l'expression puis la valeur du travail reçu par le gaz au cours du cycle.
**2b)** Combien de thermostats faut-il, au minimum, pour parcourir le cycle dans ce sens ? Justifier.
**2c)** Effectuer un bilan énergétique pour ces thermostats, c'est-à-dire donner les valeurs numériques des transferts thermiques et du travail reçus par le ou les thermostats sur le cycle.
**2d)** Décrire la fonction d'une machine utilisant ce cycle.

**3)** Le cycle est parcouru **dans le sens horaire ACBA.**
**3a)** Combien de thermostat faut-il à présent ? Justifier.
**3b)** Effectuer un bilan énergétique pour ces thermostats, c'est-à-dire donner les valeurs numériques des transferts thermiques et du travail reçus par le ou les thermostats sur le cycle.
**3c)** Décrire la fonction d'une machine utilisant ce cycle.

## DEUXIÈME PRINCIPE DES SYSTÈMES FERMÉS

Semaine 14 - Séance 8

**Exercice 14 : Entropie du gaz parfait**

1) A partir des identités thermodynamiques, donner l'expression de la différentielle de l'entropie pour un gaz parfait dans les variables *(T,V)*. En déduire l'expression de la fonction *S(T,V)*.

2) Effectuer le même travail dans les variables *(T,P)*.

3) Considérons les transformations de l'exercice 10.

   a) Réaliser un bilan d'entropie pour la compression isotherme lente **T1** (c'est-à-dire qu'on calculera l'entropie échangée, l'entropie créée, la variation d'entropie du gaz).

   Commenter les signes de chacun des trois termes d'entropie.

   b) On considère maintenant une transformation monotherme rapide de même état initial et de même état final que la transformation précédente. La pression extérieure est constante et vaut $P_0$. Refaire le bilan d'entropie - calculer l'entropie échangée, l'entropie créée et la variation d'entropie du gaz – pour cette transformation. Commenter.

**Exercice 15 : Contact avec un thermostat**

On plonge un barreau de fer de masse $m$ à la température $T_1$ dans un lac à la température $T_0$, et on attend l'équilibre final.

*Données numériques :*

capacité thermique massique du fer : $c$=460 J.K$^{-1}$.kg$^{-1}$

$m$ = 100 g; $T_0$ = 280 K; $T_1$ = 350 K.

1) A partir d'une identité thermodynamique, donner l'expression de la différentielle $dS$ de l'entropie pour une phase condensée. En déduire l'expression de la fonction $S(T,V)$.

2) Calculer l'entropie échangée ; la variation d'entropie ; l'entropie créée :

a) pour le morceau de fer ; commenter les signes des trois grandeurs ;

b) pour le thermostat ;

c) pour l'ensemble {solide, lac} supposé isolé. Interpréter.

En préparation à l'IS

**Finir les exercices 14 et 15 (si non-finis en TD)**
**Chercher la partie I de l'exercice 16**

A rédiger pour la semaine 16 - Séance 9

**Exercice C7 : TP de calorimétrie**

Répondre aux questions de préparation du TP de calorimétrie. Chacun rend une copie.

Semaine 16 - Séance 9

**Exercice 16 : Gaz parfait dans un cylindre qui n'est pas calorifugé** *(étude entropique)*

On considère un cylindre fermé à une extrémité et dans lequel peut coulisser verticalement un piston de masse négligeable. A l'intérieur de ce système, $n$ moles d'un gaz parfait de capacités thermiques molaires constantes, occupent un volume $V_i$. L'ensemble est plongé dans un milieu dont la température $T_0$ est constante.

Les frottements sont négligeables.

**Les parois du cylindre et le piston sont diathermanes (les transferts thermiques sont possibles).**

Dans cet exercice, on réalise deux expériences au cours desquelles un opérateur fournit un même transfert mécanique $W_0$, mais de deux manières différentes :

Expérience ① : L'opérateur exerce une force $\vec{F}_1$ constante.

Expérience ② : L'opérateur enfonce lentement le piston.

Soit $V_f$ le volume à l'équilibre.

**I** Pour chaque expérience ① et ② :

1) Caractériser la transformation subie par le gaz.

2) Exprimer le rapport volumétrique $\dfrac{V_f}{V_i}$ en fonction de $n,R,T_0,W_0$.

3) Application numérique : $W_0 = 2nRT_0$

**II** Pour chaque expérience ① et ②, déterminer en fonction de $n,R,T_0,\dfrac{V_f}{V_i}$ les expressions de :

1) la variation d'entropie du gaz pendant la transformation ;

2) l'entropie échangée par le gaz ;

3) l'entropie créée par le gaz. La transformation est-elle réversible ?

**III** Le but de cette manipulation est, avec le même travail $W_0$, d'enfoncer le plus possible le piston (optimisation du transfert d'énergie). Comparer ① et ②.

## CALCUL DIFFÉRENTIEL EN THERMODYNAMIQUE

**Exercice 17 : Enthalpie massique d'un système indilatable et incompressible**

Dans cet exercice, on considère les liquides comme des systèmes indilatables et incompressibles de capacités thermiques massiques $c_p$ et $c_v$. On étudie l'influence de la pression et du volume sur l'état thermodynamique d'un liquide.

1.a Déterminer pour un tel liquide, en fonction de $c_p$,$c_v$,$P$,$v$,$T$ : les expressions des différentielles de : l'énergie interne massique $u$, l'entropie massique $s$, l'enthalpie massique $h$.

1.b Montrer que $c_p = c_v$.

Soient 2,00 kg d'eau liquide à la température de 300 K et à la pression de 1,00 MPa. Calculer la variation d'enthalpie de l'eau liquide:

2.a lorsqu'on augmente sa température cinétique de 30% sous la pression de 1,00 MPa ;

2.b lorsqu'on augmente sa pression de 30,0% à la température de 300 K.

*Données numériques*: $v = 1{,}00.10^{-3}$ m$^3$.kg$^{-1}$; $c = 4{,}18$ kJ.kg$^{-1}$.K$^{-1}$

2.c En déduire une expression approchée de $dh$ pour les liquides.

A rédiger pour la semaine 20 - Séance 10

**Exercice C6 : Etude d'un cycle dans deux sens de parcours -entropie**

Reprendre l'exercice C5.

**1)** Effectuer un bilan d'entropie (c'est-à-dire calculer $\Delta S$, $S^{ech}$ et $S^{cr}$) pour le gaz pour chaque transformation dans les deux sens de parcours. Commenter vos résultats.

**2)** Effectuer un bilan d'entropie (c'est-à-dire calculer $\Delta S$, $S^{ech}$ et $S^{cr}$) pour chacun des thermostats dans les deux sens de parcours. Commenter vos résultats.

## MACHINES THERMIQUES

Semaine 20 - Séance 10

**Exercice 18 : Machine de Carnot**

$n$ moles d'un gaz parfait décrivent un cycle de Carnot A,B,C,D,A en échangeant des transferts thermiques avec deux sources $T_1$ et $T_2$.

- Compression isotherme AB au contact de la source $T_2$.
- Détente adiabatique BC amenant le gaz à la température $T_1$.
- Détente isotherme CD au contact de la source $T_1$.
- Compression adiabatique DA amenant le gaz à la température $T_2$.

Les transformations sont toutes réversibles.

1) Représenter l'allure du cycle dans un diagramme de Clapeyron ($P$,$V$) et dans un diagramme entropique ($T$,$S$). Ce cycle est-il moteur ou récepteur ?

2) On pose $\alpha = \frac{V_A}{V_B}$.
   Déterminer les epxressions, dans cet ordre, et en fonction de $n$, $T_1$, $T_2$ et $\alpha$ du
   - transfert thermique reçu par le gaz au cours de la transformation A → B;
   - transfert thermique reçu par le gaz au cours de la transformation C → D;
   - travail reçu par le gaz au cours d'un cycle.

3) En supposant qu'il s'agit du cycle d'un réfrigérateur, calculer l'efficacité thermique de cette machine thermique. Cette efficacité dépend-elle de $\alpha$ ?

**Exercice 19 : Cycle de Lenoir**

Le premier moteur à combustion interne fut conçu par l'ingénieur Etienne Lenoir (1815-1893). Etudions son cycle thermodynamique, dit cycle de Lenoir :

- 0 → 1 (admission) : entrée isobare du mélange air – combustible à la pression atmosphérique.
  En 1 : étincelle à la bougie ;
- 1 → 2 (combustion): combustion isochore du mélange ;

- 2 → 3 (temps moteur) : détente adiabatique réversible ;
- 3 → 1 → 0 (échappement) : évacuation isobare des gaz brûlés.

1) On assimile le mélange gazeux à un gaz parfait de coefficient isentropique $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$. Représenter l'allure du cycle en coordonnées $(P,V)$.
2) On appelle *rapport de compression*, la quantité $\tau = \frac{P_2}{P_1}$. Exprimer en fonction de $\tau$ et $\gamma$, le rendement thermodynamique $\rho$ du cycle.
3) Ce cycle ditherme est-il réversible ? Commentaires.

Semaine 21 - Séance 11

**Exercice 20 : Pompe à chaleur (1)**

Une pompe à chaleur réversible fonctionne entre deux sources thermiques constituées par l'eau d'un lac à température constante $\theta_0$ = 10°C et par une masse $M$ d'eau thermiquement isolée (sauf de la pompe), initialement à la température $T_i$. La machine fonctionne de telle sorte que la masse $M$ s'échauffe jusqu'à une température $T_f$. On notera $c$ la capacité thermique massique de l'eau.

1) Pendant la durée $dt$ d'un cycle, la machine reçoit (algébriquement) le travail élémentaire $\delta W$ de l'extérieur et le transfert thermique élémentaire $\delta Q$ de la masse $M$ d'eau. Pendant ce temps, la température $T$ de la masse $M$ varie de $dT$. Trouver une relation entre $\delta W$ et $dT$.
2) Calculer $W$ en fonction de $T_i$, $T_f$ et de $T_0$, la température du lac.

**A.N.** : $M$ = 1 t, $T_i = T_0$ ; $T_f$ = 313 K

3) Calculer l'élévation de température de la masse $M$ si le même travail $W$ avait été utilisé par une résistance chauffante.

**A.N.** : Capacité thermique massique de l'eau : $c$ = 4,18 kJ.kg$^{-1}$.K$^{-1}$

A rédiger pour la semaine 22 - Séance 12

**Exercice C8 : Etude d'un congélateur neuf et d'un congélateur usagé**

On considère une machine thermique ditherme réelle fonctionnant entre l'intérieur d'un congélateur à la température $\theta_1$=-18°C et la pièce dans laquelle il se trouve (température $\theta_2$=20 °C).

La machine thermique utilise $n$ moles d'un fluide qui, au cours d'un cycle, reçoivent les transferts thermiques $Q_1$ de l'intérieur du congélateur et $Q_2$ de l'extérieur, ainsi que le travail $W$.

**1)** Faire un schéma sur lequel :
- On identifiera la source froide et la source chaude.
- On indiquera les transferts d'énergie $Q_1$, $Q_2$, $W$.

**2)** Cette machine fonctionne-t-elle en moteur ou en récepteur thermique? Indiquer les signes de $Q_1$, $Q_2$, $W$.

**3)** Ecrire le premier principe et le deuxième principe pour $n$ moles de fluide décrivant un cycle thermodynamique.

**4)** Définir l'efficacité $e$ de cette machine en fonction d'une ou de plusieurs des grandeurs $Q_1$, $Q_2$, et $W$, puis en fonction uniquement de $Q_1$ et $Q_2$.

**5)** Un congélateur neuf a une efficacité $e$ = 2,0.
On définit le coefficient $\alpha$ comme le rapport entre l'efficacité $e$ du congélateur neuf et l'efficacité $e_r$ d'une machine réversible fonctionnant avec les mêmes sources.

**5.a)** Donner l'expression de $e_r$ en fonction des températures $T_1$ et $T_2$. Réaliser l'application numérique.

**5.b)** Calculer numériquement α.

**5.c)** Ecrire la relation entre l'inverse de l'efficacité $e$, l'inverse de l'efficacité $e_r$, l'entropie créée au cours d'un cycle, le transfert thermique $Q_1$ et la température $T_2$.

**6)** Un appareil dans lequel on a laissé s'accumuler une couche de glace a une efficacité réduite $e'$. On suppose que l'effet de la couche de glace est de multiplier par deux l'entropie créée pour un même transfert thermique pris à la source froide.

**6.a)** Montrer que le rapport $\alpha$ devient pour un congélateur usagé $\alpha' = \frac{\alpha}{2-\alpha}$.

**6.b)** Calculer numériquement $\alpha'$ et en déduire l'efficacité $e'$ du congélateur usagé.

Semaine 22 - Séance 12

**Exercice 21 : Pompe à chaleur (2)**

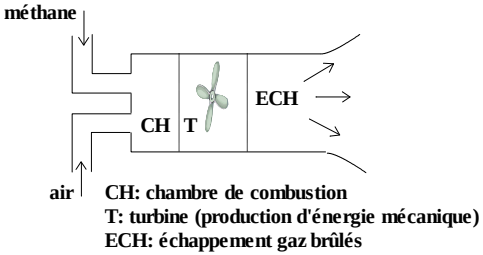
Le chauffage d'une maison individuelle est assuré par une pompe à chaleur dont les $n$ moles de fluide décrivent un cycle de Carnot.
L'intérieur de la maison constitue la source chaude ($\theta_c$ = 20°C), le milieu extérieur constitue la source froide ($\theta_f$ = 0°C).
La puissance de chauffe que fournit l'installation à l'intérieur de la maison est de 10 kW.

1) Ecrire le bilan énergétique et le bilan entropique pour un cycle de cette machine.
2) Calculer la puissance mécanique absorbée pour un cycle.
3) Calculer par deux méthodes l'efficacité thermique de la pompe à chaleur.

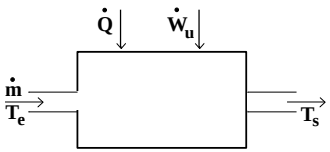
## SYSTÈMES OUVERTS EN ÉCOULEMENT PERMANENT

### Exercice 22 : Turbine à gaz

Une turbine à gaz est une machine qui produit de l'énergie mécanique à partir de l'énergie thermique libérée par la combustion d'un gaz (méthane).




TURBINE A GAZ




SON MODELE

**Données numériques :**
Gaz entrant (air et méthane) :
Débit massique total : $\dot{m} = 0{,}560$ kg.s$^{-1}$ $T_e$ = 300 K
Puissance thermique reçue par le gaz dans la chambre de combustion : $P_{th}$ = 800 kW
Gaz sortant (produits de combustion) : $T_s = 10^3$ K

**Hypothèses :**
- les gaz en écoulement sont assimilés à de l'air (gaz parfait de $c_p = 1{,}00.10^3$ J.K$^{-1}$.kg$^{-1}$) ;
- les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle des gaz sont négligeables.

1) Calculer la puissance utile de la turbine.
2) Calculer son rendement thermodynamique.

A rédiger pour la semaine 23 - Séance 13

### Exercice C9 : Machines thermiques dithermes et diagramme de Raveau

On s'intéresse ici aux machines thermiques fonctionnant entre deux sources aux températures $T_{ch}$ et $T_{fr}$, avec $T_{ch} > T_{fr}$.

On peut représenter une telle machine thermique par un point dans le plan de coordonnées ($Q_{ch}$, $Q_{fr}$) où $Q_{ch}$ et $Q_{fr}$ sont les transferts thermiques reçus par le fluide de la machine avec les sources à $T_{ch}$ et $T_{fr}$ à chaque cycle.

$Q_{ch}$ est placé en ordonnée et $Q_{fr}$ en abscisse.

**1)** Montrer que seules les machines situées sous une droite, dont on déterminera l'équation, sont thermiquement réalisables.
**2)** Montrer que les moteurs sont situés au dessus d'une droite dont on déterminera l'équation. En déduire la zone du plan où se situent les moteurs.
**3)** Quelle qualité doivent avoir les récepteurs pour être utiles ? En déduire la zone du plan correspondant aux récepteurs.
**4)** Regrouper tous ces résultats dans un diagramme, en identifiant les différentes portions du plan.

En préparation au DS

**Exercice C10 : Accélération d'un gaz dans une tuyère**

De l'air comprimé se détend dans une tuyère. Les données et hypothèses sont les suivantes :

- La tuyère est parfaitement calorifugée.
- L'air est assimilé à un gaz parfait, de capacité thermique massique à pression constante $c_p = 1{,}00$ kJ.K$^{-1}$.kg$^{-1}$ et de masse molaire $M = 28{,}8$ g.mol$^{-1}$ ;
- A l'entrée de la tuyère, sa vitesse est négligeable, et l'air est dans un état A : $T_A = 600$ K et $P_A = 5{,}00$ bar.
- A la sortie de la tuyère, sa pression est $P_B = 1{,}00$ bar. La section de sortie de la tuyère est $\Sigma = 1{,}00$ cm$^2$.

1) La détente est isentropique. Déterminer :

1.a) la température de sortie $T_B$ de l'air ;

1.b) la vitesse de sortie $\vee \overrightarrow{v_B} \vee$ de l'air ;

1.c) le débit massique d'air.

2) On modélise l'irréversibilité de la détente par une transformation polytropique de coefficient $k = 1{,}36$.
*Cela signifie que la pression et le volume massique du gaz sont reliés par la relation : $P.v^k$=constante*

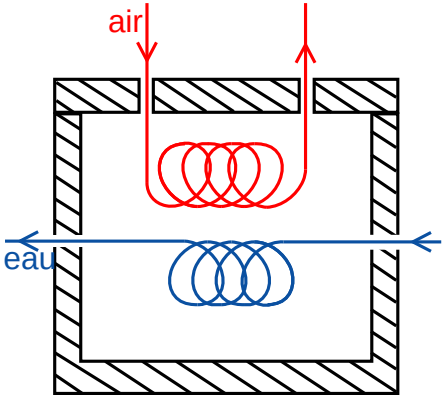
2.a Déterminer à nouveau la vitesse et le débit d'air.

2.b Représenter ces deux détentes dans un diagramme entropique *(on assimilera les transformations à des segments).*

2.c Déterminer l'énergie dissipée $\varepsilon$ à la traversée de la tuyère.

*Au cours d'une transformation de l'état initial* **(i)** *à l'état final* **(f)**, *l'énergie dissipée $\varepsilon$ vaut* $\varepsilon = \int_i^f T\delta s^c$

**Exercice C11 : Echangeur de chaleur**




De l'air chaud ($c_p$ = 1 kJ.K$^{-1}$.kg$^{-1}$) à l'état 1 ($P_1$ = 6 bar, $T_1$ = 500 K) est refroidi de façon isobare jusqu'à la température $T_0$ de 300 K, dans un échangeur parfaitement calorifugé.
Le fluide réfrigérant est constitué par de l'eau (capacité thermique massique $c$ = 4,18 kJ.K$^{-1}$.kg$^{-1}$) qui entre à $\theta_e$ = 12°C et qui sort à la température $\theta_s$. Le débit de l'eau est 100 g.s$^{-1}$ et celui de l'air 6,5 g.s$^{-1}$.

Calculer $\theta_s$.

# Multiples et sous-multiples des unités SI

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $10^{-12}$ | pico | p | $10^{1}$ | deca | d |
| $10^{-9}$ | nano | n | $10^{2}$ | hecto | h |
| $10^{-6}$ | micro | $\mu$ | $10^{3}$ | kilo | k |
| $10^{-3}$ | milli | m | $10^{6}$ | mega | M |
| $10^{-2}$ | centi | c | $10^{9}$ | giga | G |
| $10^{-1}$ | deci | d | $10^{12}$ | tera | T |

Remarque : • unité de volume : 1 L = 1 $dm^3 = 10^{-3}$ $m^3$
• unité de longueur 1 Å= $10^{-10}$ m

---

# Alphabet grec

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| A | $\alpha$ | alpha | N | $\nu$ | nu |
| B | $\beta$ | beta | $\Xi$ | $\xi$ | ksi |
| $\Gamma$ | $\gamma$ | gamma | O | o | omicron |
| $\Delta$ | $\delta$ | delta | $\Pi$ | $\pi$ | pi |
| E | $\epsilon$, $\varepsilon$ | epsilon | R | $\rho$ | rho |
| Z | $\zeta$ | dzeta | $\Sigma$ | $\sigma$, $\varsigma$ | sigma |
| H | $\eta$ | eta | T | $\tau$ | tau |
| $\Theta$ | $\theta$, $\vartheta$ | theta | $\Upsilon$ | $\upsilon$ | upsilon |
| I | $\iota$ | iota | $\Phi$ | $\phi$, $\varphi$ | phi |
| K | $\kappa$ | kappa | X | $\chi$ | khi |
| $\Lambda$ | $\lambda$ | lambda | $\Psi$ | $\psi$ | psi |
| M | $\mu$ | mu | $\Omega$ | $\omega$ | omega |