An aerial photograph of a nuclear power plant. Two large, white, hyperboloid cooling towers are the central focus, each emitting a thick plume of white steam that rises into the sky. The plant's complex of buildings and piping is visible at the base of the towers. The surrounding landscape consists of green and brown fields under a clear blue sky.

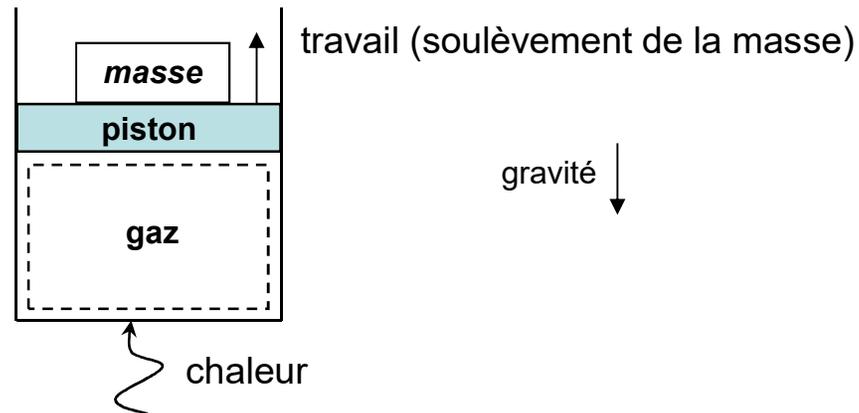
MEC1210-Thermodynamique

Notes de cours
Automne 2021
Huu Duc Vo

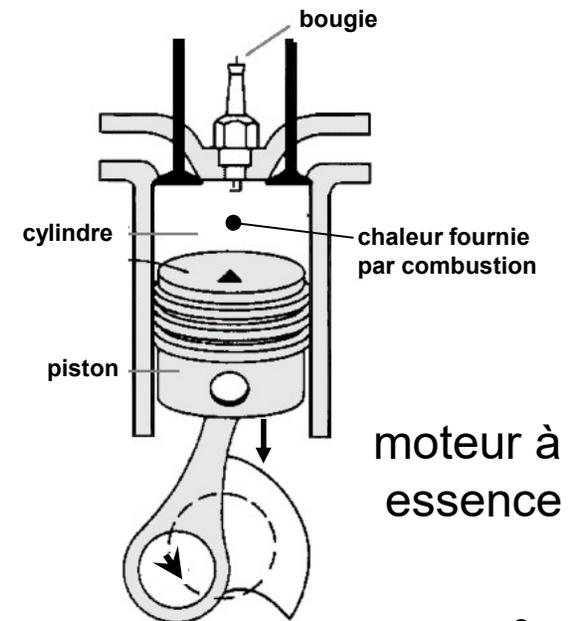
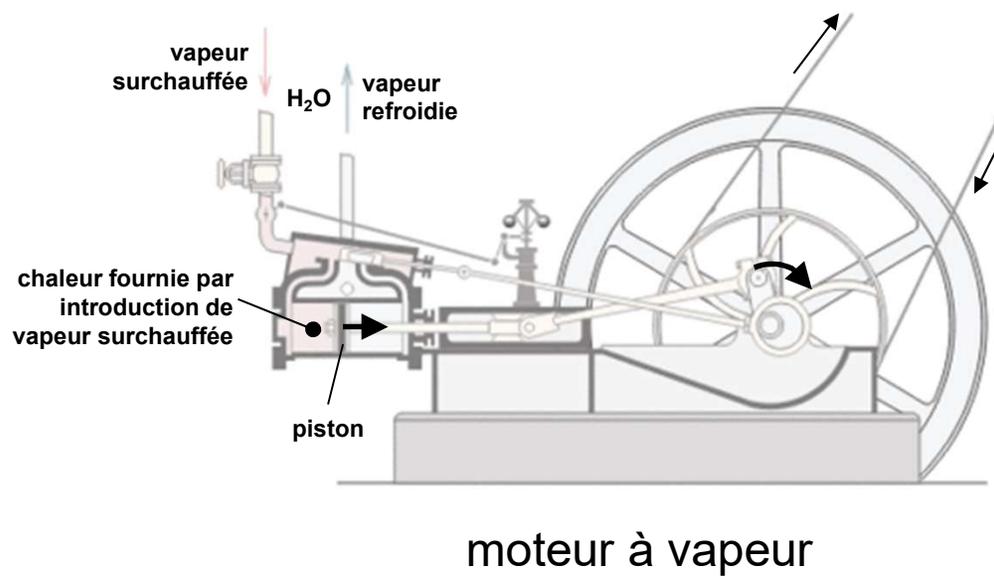
Semaine 1- Introduction

- **Thermodynamique:**
 - Une science pour décrire les processus de transformation de l'énergie et de changement de propriétés de la matière.
 - Un outil d'ingénierie pour analyser/décrire la performance des systèmes comportant la production et la transformation de l'énergie.

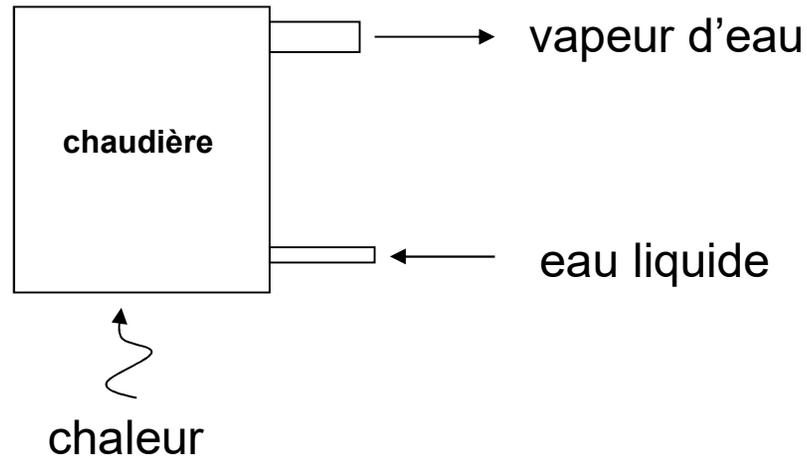
Exemple 1: Piston et cylindre



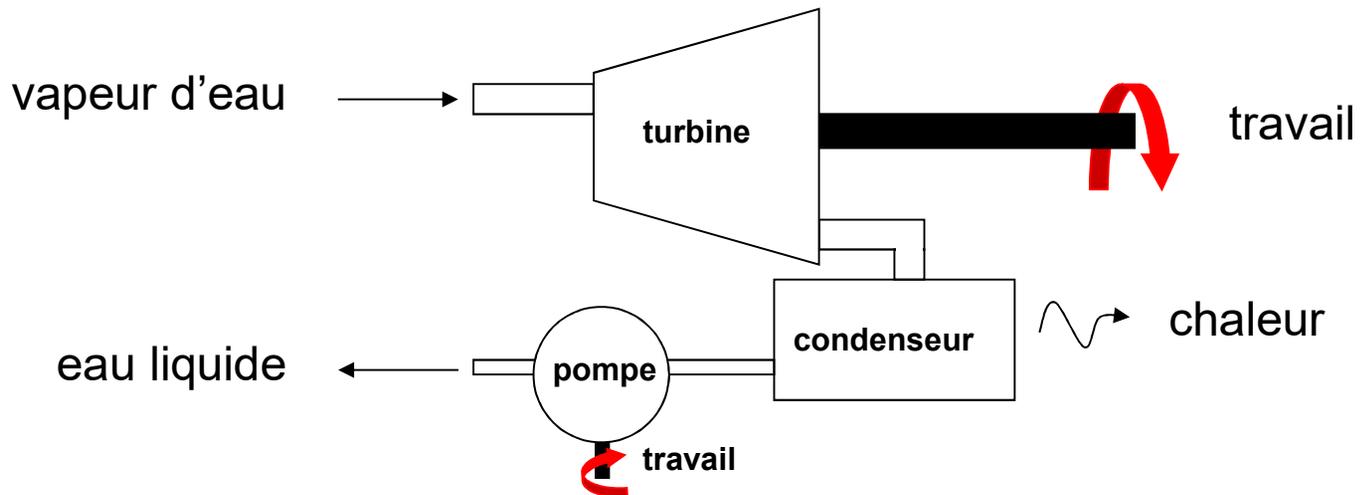
Exemple 2: moteur à piston



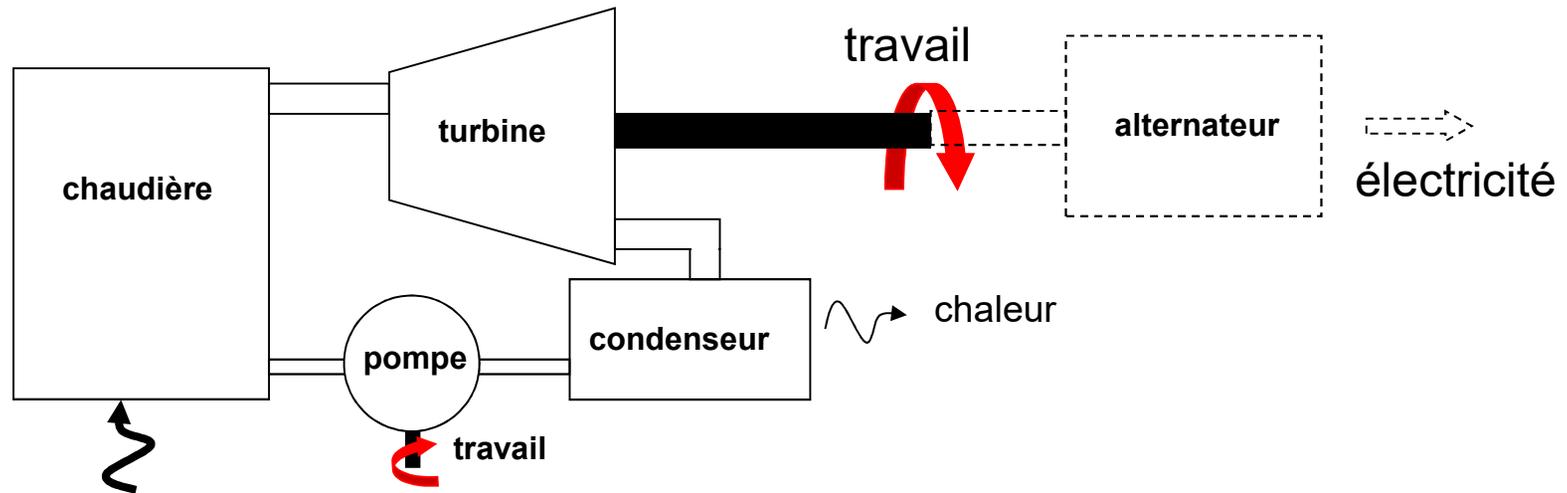
Exemple 3: Chaudière



Exemple 4: Turbine et condenseur



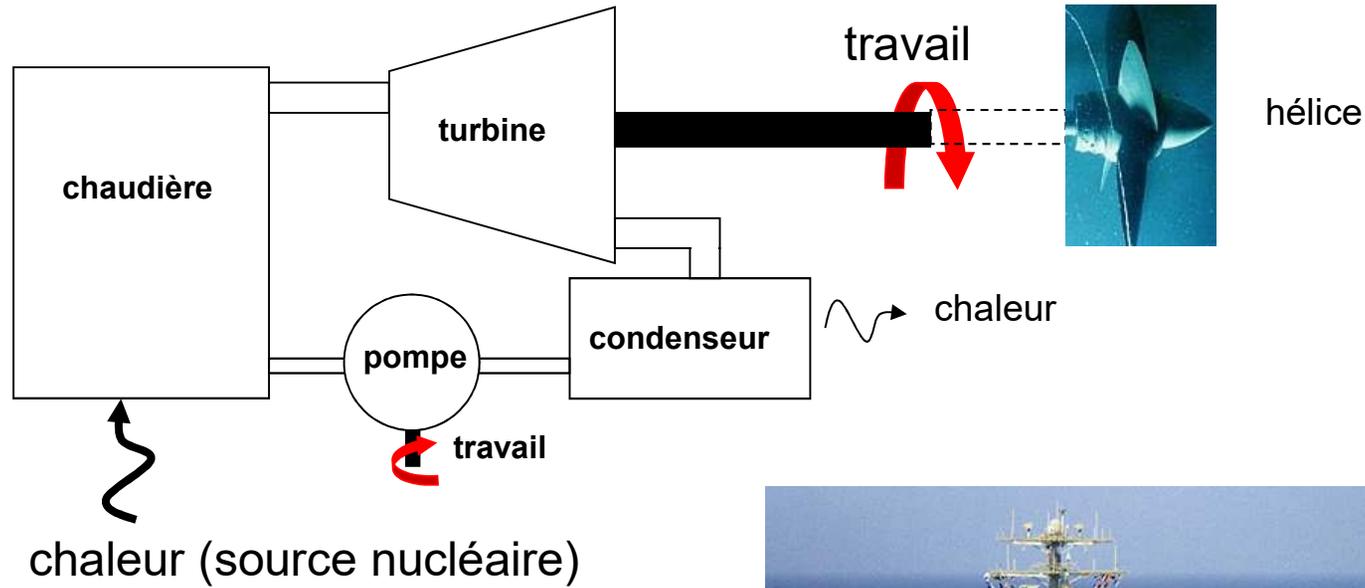
Exemple 5: Centrale thermique/nucléaire



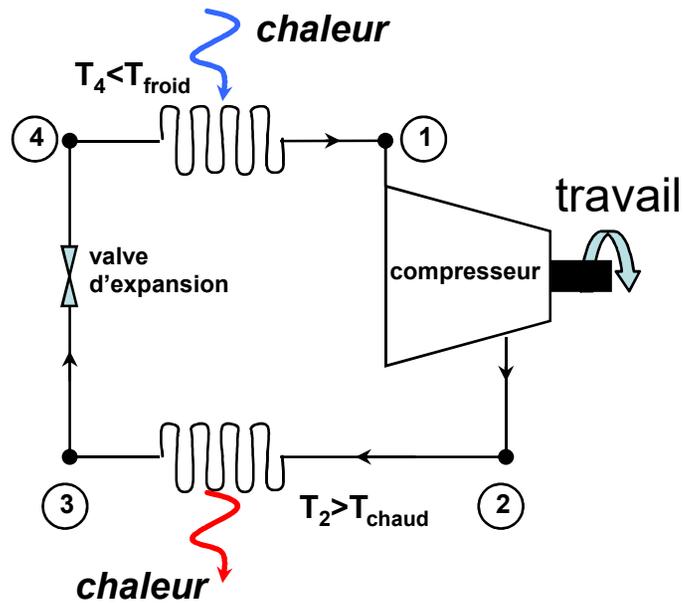
Chaleur (combustion
ou réaction nucléaire)



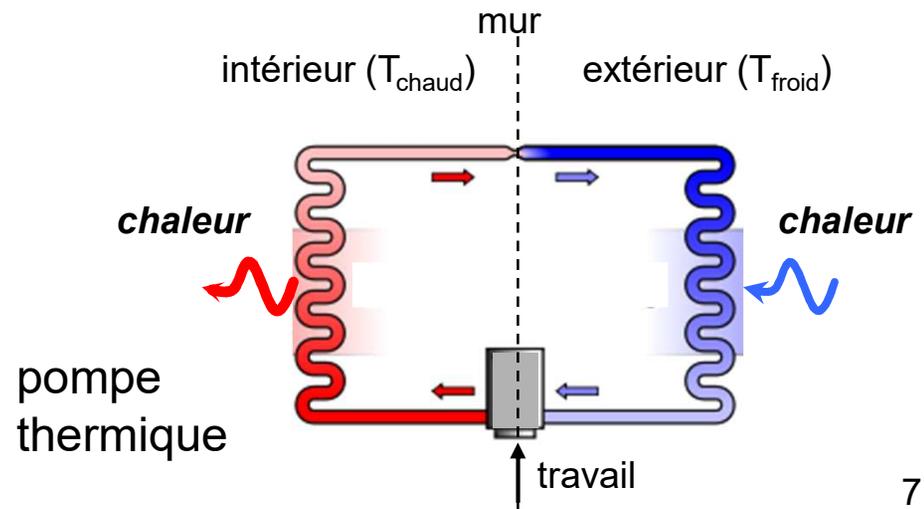
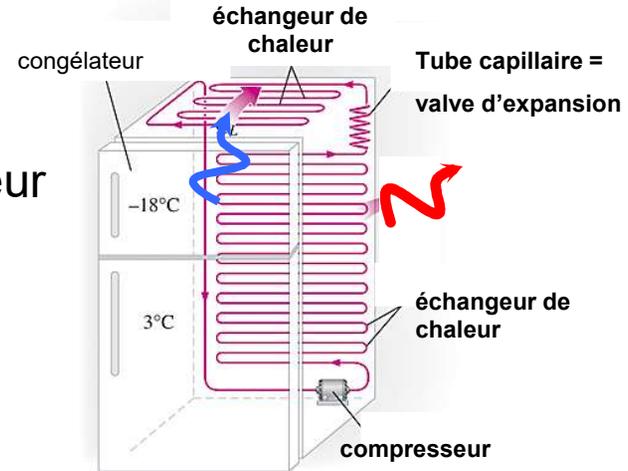
Exemple 6: Propulsion navale nucléaire



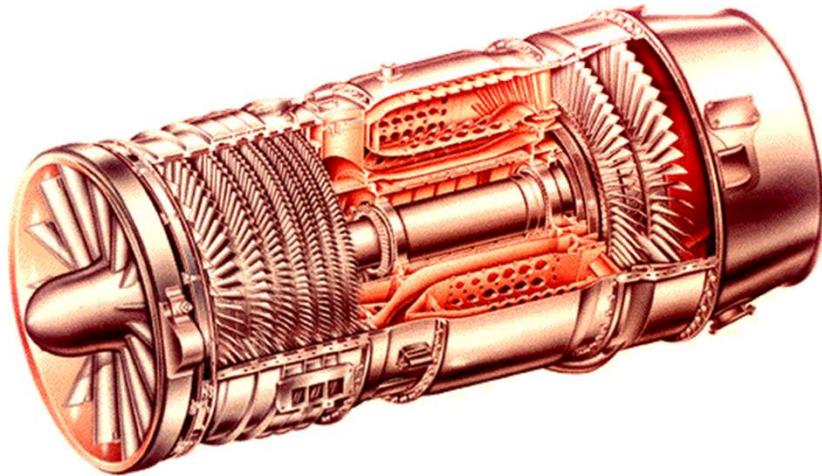
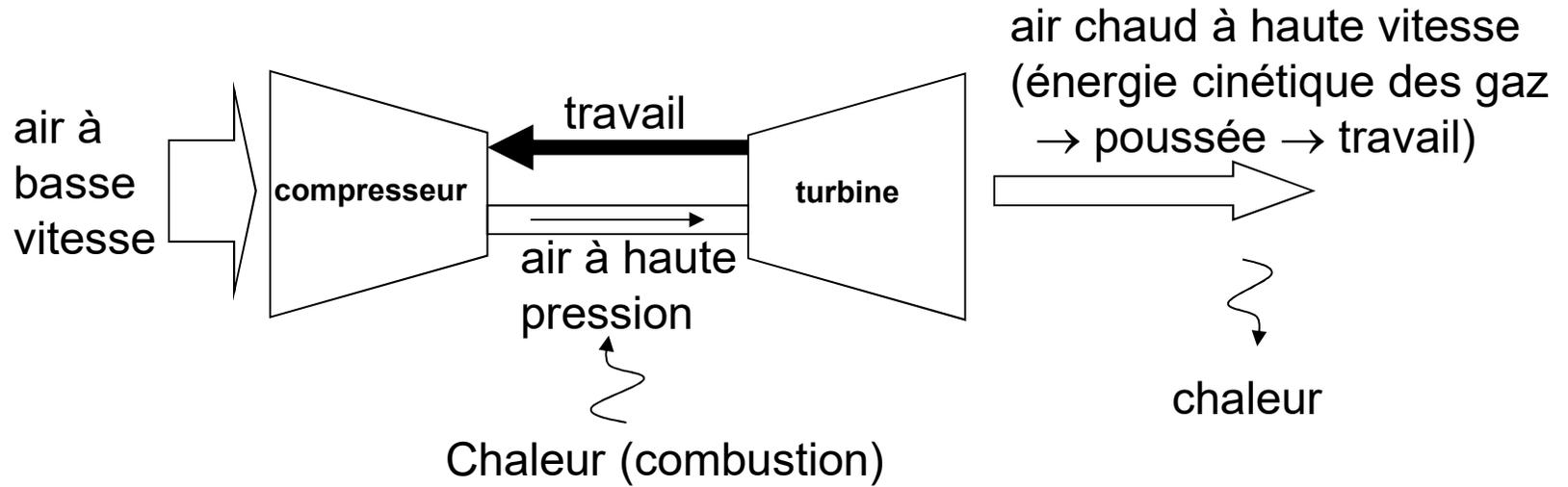
Exemple 7: Réfrigérateur et pompe thermique



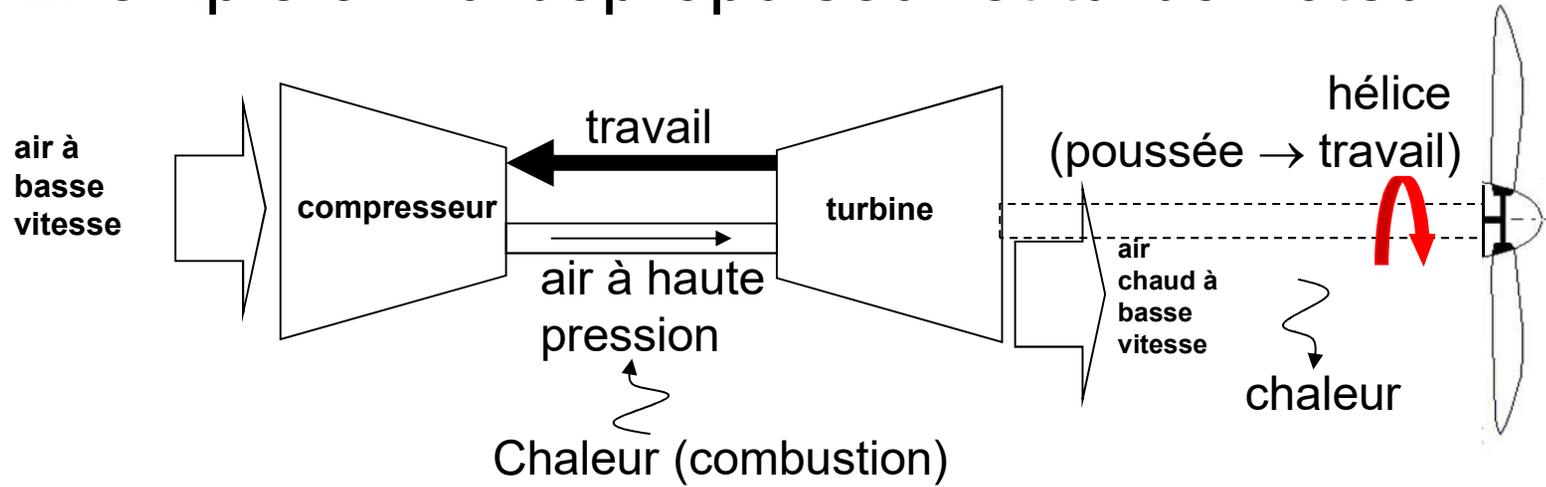
réfrigérateur



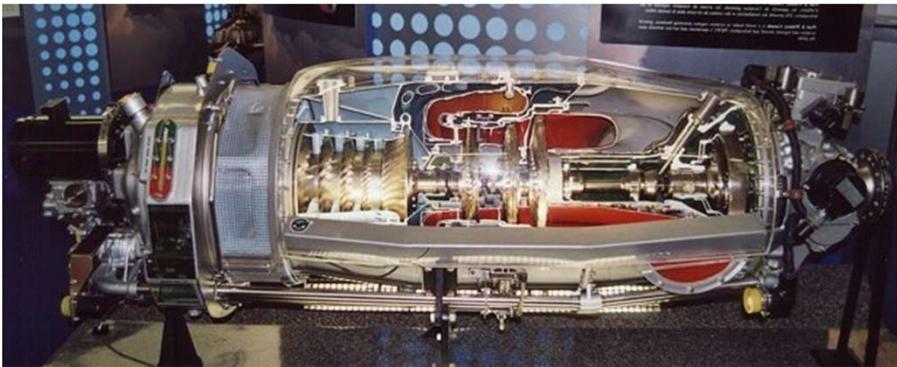
Exemple 8: Turboréacteur



Exemple 9: Turbopropulseur et turbomoteur



turbopropulseur



turbomoteur



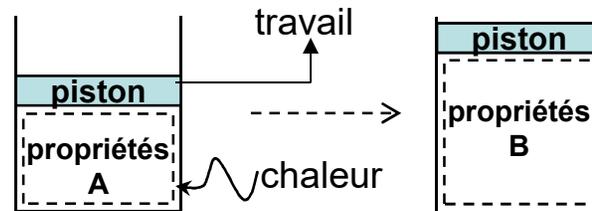
Plan du cours

1) Notions de base

Systemes, propriétés, évolution, énergie, travail, chaleur.

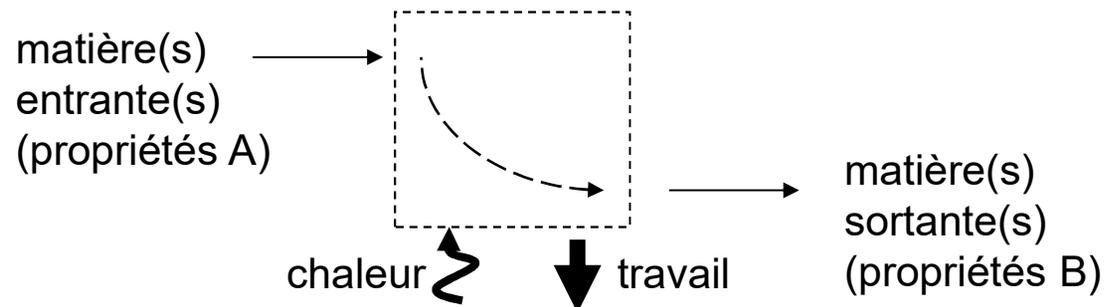
2) Premier principe de la thermodynamique (systemes fermés)

Bilan/conservation de l'énergie



3) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

4) Premier principe de la thermodynamique (systemes ouverts)



5) Second principe de la thermodynamique

Évolutions réversibles et irréversibles



6) Entropie

Bilan d'entropie, rendement

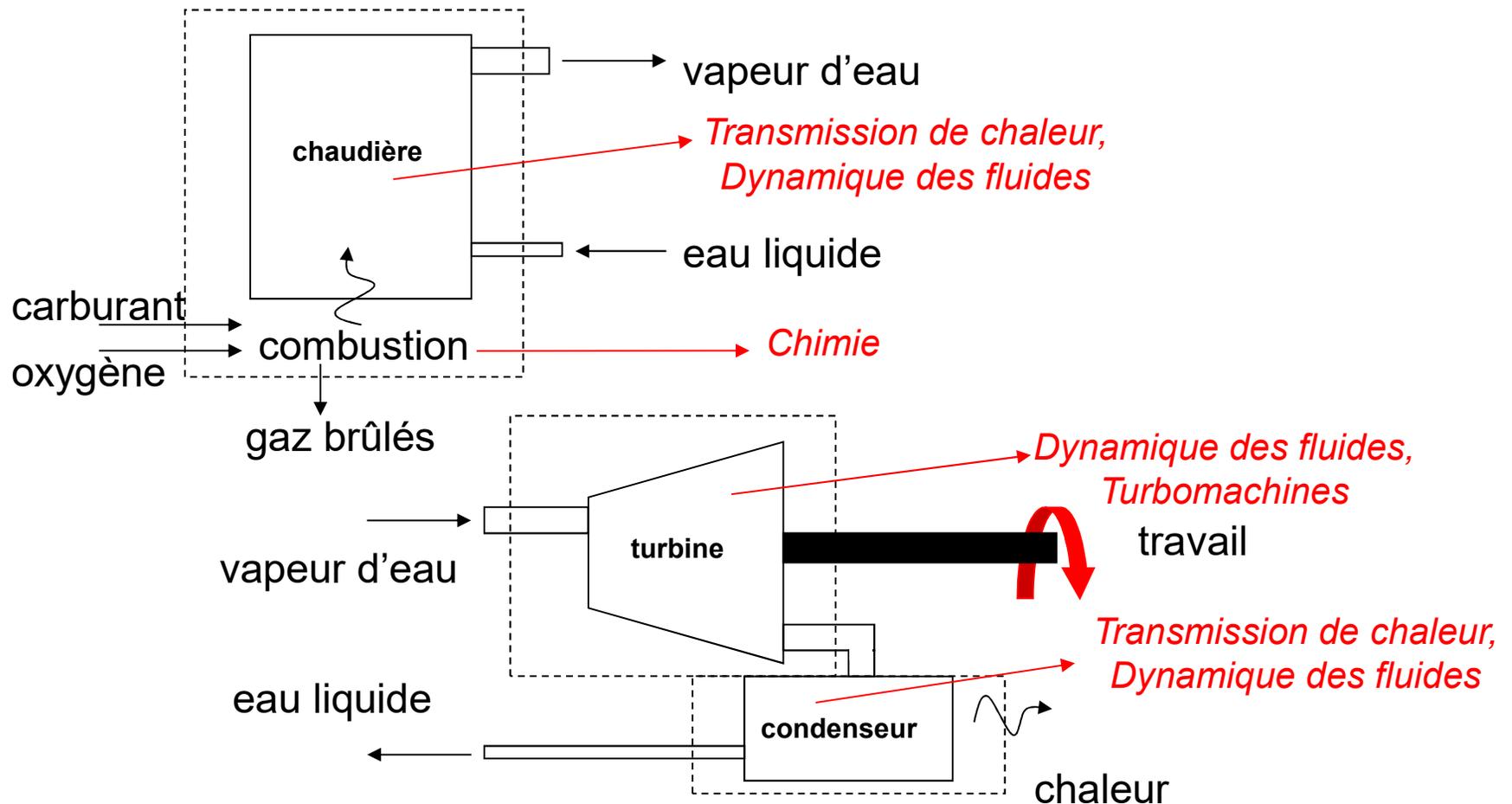
7) Cycles thermodynamiques communs

Centrales thermiques, réfrigération, turbines à gaz, moteurs à combustion interne (piston).

8) Mélanges non réactifs

Contexte du cours

- Thermodynamique: - premier cours de la chaîne thermo-fluide
- concepts fondamentaux
- point de vue global



Méthodologie

- **Enseignement:**
 - **Classe (3 hrs/semaine):** théorie sur diapositives et exemples au tableau
 - **Périodes de travaux dirigés (TD) (2 hrs/semaine)**
 - **Périodes de projet (2 hrs/semaine)**
 - **Référence:** Y. Çengel, M. Boles, M. Kanoğlu et M. Lacroix, “Thermodynamique, une approche pragmatique,” 3^{ème} édition Chenelière McGraw-Hill
 - **Outil de travail (projet):** logiciel EES
 - **Heures de bureau:** (à discuter)
- **Évaluation:**
 - **Contrôle périodique (30%)** (**lundi, 25 octobre 2021, en classe**)
 - **Mini-contrôles (2) (10%)**
 - **Travail de TD (10%)**
 - **Projet (15%)**
 - **Examen final (35%)** (**durant période des examens finaux**)

Où on en est

I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

II) **Notions de base et définitions**

heure 2 

- **système thermodynamique**
- **propriété thermodynamique**
- **état et évolution**
- *unités de mesure*
- *propriétés importantes des fluides*

III) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2^{ème} principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

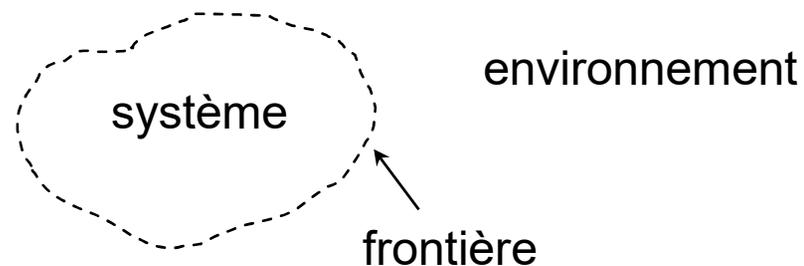
IX) Mélanges non réactifs

II) Notions de base

1) Systeme thermodynamique:

Une quantité de matière ou une région dans l'espace choisie pour étude

- a) Environnement: tout ce qui est en dehors du système thermodynamique
- b) Frontière: surface fermée, réelle ou imaginaire, qui délimite le système et le sépare de l'environnement. Cette surface peut être **fixe** ou **amovible**.

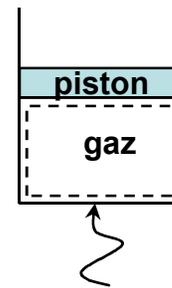


- c) Univers: système + environnement

d) 2 types de systèmes thermodynamiques

i) **fermé**: quantité de matière fixe, frontière *imperméable* à la masse, mais perméable à l'énergie (chaleur ou travail)

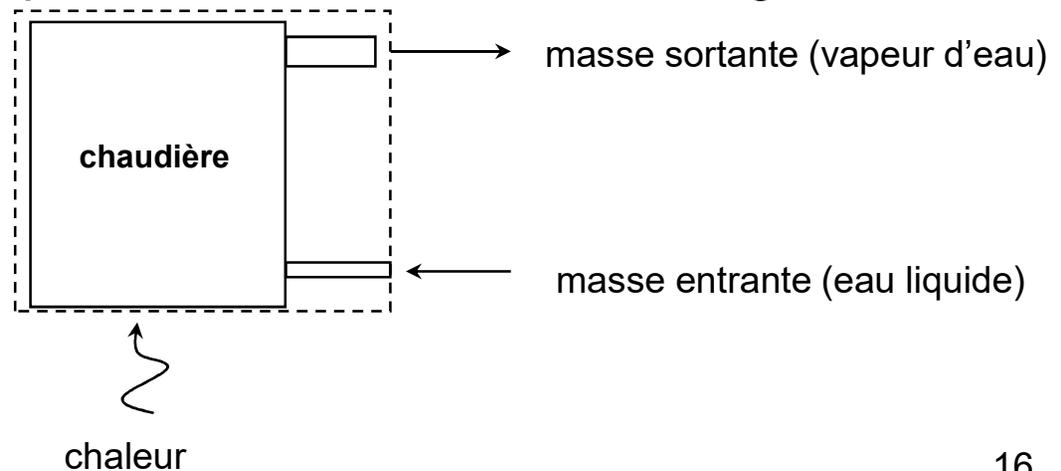
exemple:



énergie (chaleur ou travail)

ii) **ouvert**: frontière perméable à la masse et l'énergie

exemple:

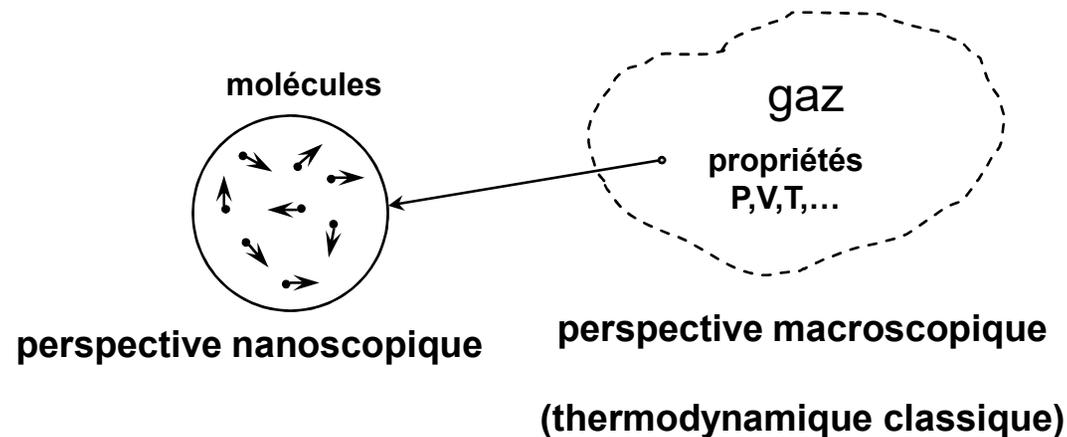


2) Propriété thermodynamique

Une caractéristique *macroscopique* quantifiable d'un système.

exemples: pression, température, volume, masse,
masse volumique, ...

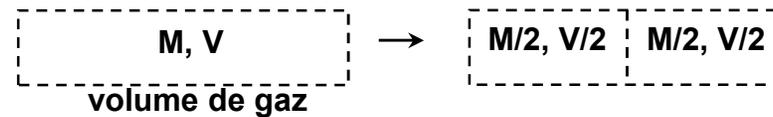
a) **Continuum**: un modèle considérant la matière comme étant continue et homogène et non fait d'atomes ou de molécules distinctes.



b) 2 types de propriétés:

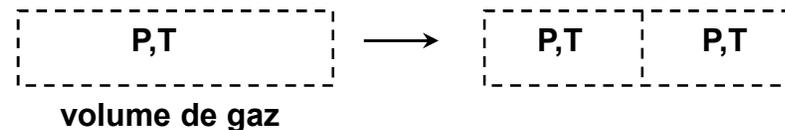
i) propriété extensive: propriété qui dépend de la taille du système

exemples: masse (M), volume (V)



ii) propriété intensive: propriété indépendante de la taille du système

exemples: pression (P), température (T)



propriété spécifique = propriété extensive → propriété intensive
(dénotée en lettre minuscule) masse

exemples: volume spécifique (v)= V/M ,
masse volumique (densité) (ρ)= $M/V=1/v$

3) État et évolution:

a) État: l'état d'un système thermodynamique est défini par la valeur de ses propriétés.

note: les propriétés ne sont pas toutes indépendantes les unes des autres. Donc, un état peut être spécifié par un nombre défini (limité) de propriétés

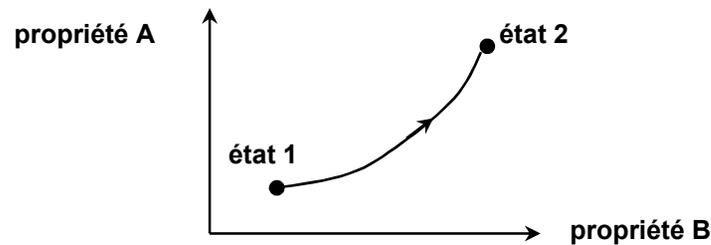
exemple: l'état d'un gaz parfait peut être spécifié par seulement deux propriétés car $PV=nRT$ (chimie 101)

b) Équilibre thermodynamique: état stable où les propriétés du système ne changent pas avec le temps.

Implique qu'à l'intérieur du système, il y a:

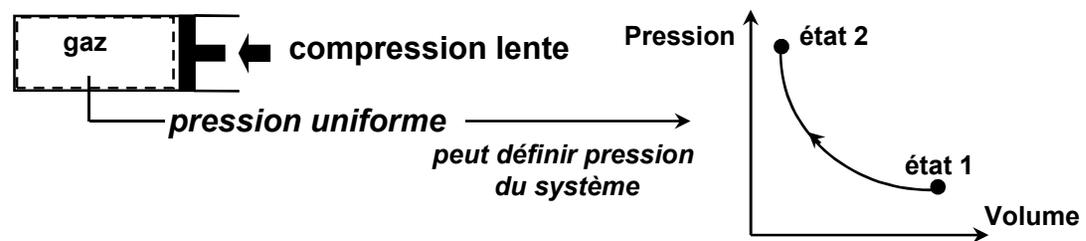
- équilibre thermique (pas de changement de température avec temps)
- équilibre mécanique (pas de changement de force/pression avec le temps)
- équilibre chimique (pas de changement de concentration chimique avec le temps)

c) **Évolution**: processus de changement (de propriété(s)) d'un système d'un équilibre thermodynamique à un autre



i) **évolution quasi-statique**: évolution passant par une succession d'équilibres thermodynamiques intermédiaires.

exemple: compression d'un gaz par un piston

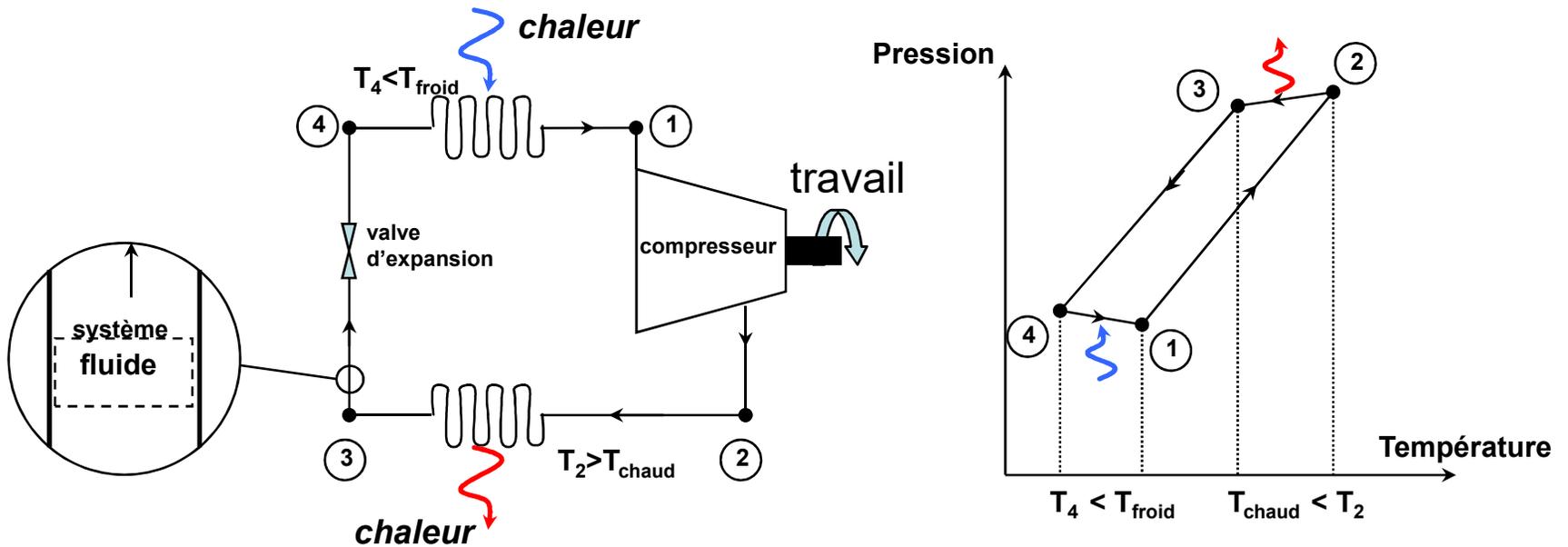


note: l'évolution quasi-statique est souvent utilisée comme hypothèse pour modéliser les systèmes en thermodynamique car:

- bonne approximation pour plusieurs processus
- facilite l'analyse

ii) cycle: évolution où le système revient à son état de départ.

exemple: cycle de réfrigération (simplifié)



d) **Phase**: quantité de matière physiquement homogène (liquide, solide, ...) et de composition chimique uniforme

exemple: eau, huile: phases liquides
air, vapeur d'eau: phases gazeuses

e) **Substance pure**: substance de composition chimique uniforme et constante.

exemples: - eau → substance pure
- air (mélange uniforme des différents gaz)
→ substance pure
- eau+ huile (mélange non uniforme)
→ ***pas une substance pure***

Note: *le mélange de plusieurs phases d'une substance pure demeure une substance pure **seulement si** la composition chimique des phases reste la même*

exemples: - eau + vapeur d'eau + glace → substance pure
- air liquide + air gazeux (compositions chimiques différentes) → pas une substance pure

Où on en est

I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

II) ***Notions de base et définitions***

- *système thermodynamique*
- *propriété thermodynamique*
- *état et évolution*
- ***unités de mesure***
- ***propriétés importantes des fluides***

heures 3,4



III) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2^{ème} principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs

4) Unité de mesure:

Une grandeur arbitraire donnée à une quantité physique pour la mesurer.

a) Unités primaires: unités pour mesurer des quantités fondamentales, dont

- masse
- longueur
- temps
- température
- (autres: courant électrique, luminosité, quantité de matière)

b) Unités secondaires: unités pour mesurer des quantités dérivées, telles que:

- volume
- vitesse
- force
- énergie, travail
- etc...

c) 2 systèmes d'unités

i) Système International d'Unités (SI):

Système décimal (base de dix) utilisé dans la grande majorité des pays.

unités primaires: gramme [g] (masse), mètre [m] (longueur), seconde [s] (temps), degré Kelvin [K] (Δ température, $1\text{K}=1^\circ\text{C}$)

unités secondaires:

- force ($F=ma$): Newton [N]=[$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$]
- travail ($W=F\cdot\text{distance}$): Joules [J] = [$\text{N}\cdot\text{m}$]
- etc...

préfixes: pico [p] (10^{-12}), nano [n] (10^{-9}), micro [μ] (10^{-6}), milli [m] (10^{-3}), kilo [k] (10^3), mega [M] (10^6), giga [G] (10^9), tera [T] (10^{12})

ii) Système Impérial (EES: English Engineering System):

Système arbitraire d'origine britannique, principalement en utilisation aux États-Unis, mais encore en pratique dans beaucoup d'industries en Amérique du Nord.

unités primaires: livre-masse [lbm] (masse), pied [ft] (longueur), seconde [s] (temps), degré Rankine [R] (Δ température, $1R=1^{\circ}F$)

Aussi considéré comme unités primaires:

- livre-force [lbf] (force)

1 lbf est la force exercée par 1 lbm sous la gravité terrestre de 32.174 ft/s^2

donc $F=ma/g_c$ où $g_c=32.174 \text{ lbm}*(\text{ft/s}^2)/\text{lbf}$

- British thermal unit (Btu) (travail/énergie)

1 Btu est l'énergie requise pour augmenter la température de 1 lbm d'eau à $68^{\circ}F$ de $1^{\circ}F$.

d) Homogénéité dimensionnelle

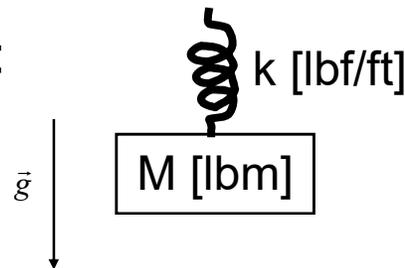
On ne peut additionner et soustraire que des quantités physiques équivalentes, c'est à dire qui sont exprimés en unités équivalentes.

Donc tous les termes d'une équation doivent avoir les mêmes unités

Ceci est une façon très pratique en génie pour:

- vérifier vos dérivations durant la résolution des problèmes

exemple:



$$\sum F = k\Delta L - Mg$$

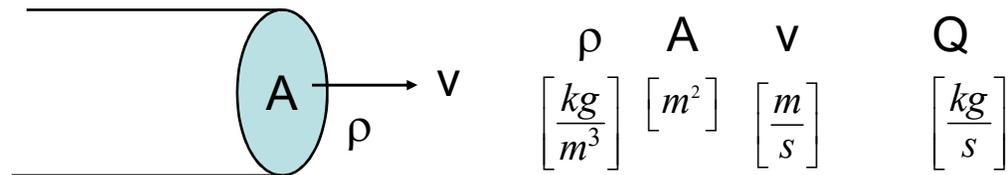
$\left[\frac{lbf}{ft}\right] [ft] [lbm] \left[\frac{ft}{s^2}\right]$

manque: $\left[\frac{lbm \ ft}{lbf \ s^2}\right]$

d) Homogénéité dimensionnelle (cont.)

- dériver des relations entre les quantités physiques

exemple: trouver le débit d'eau (Q) en [kg/s] à partir de la densité (ρ), de l'aire (A) du tuyau et de la vitesse moyenne (v) de l'eau



$$Q = \rho Av$$

- analyse dimensionnelle (technique pour réduire le nombre de variables affectant un phénomène physique)

5) Propriétés importantes des fluides

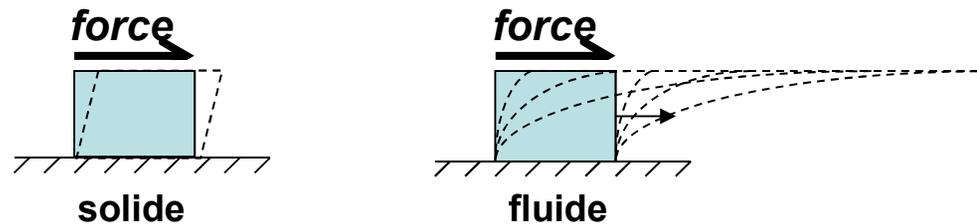
Les fluides seront souvent utilisés en thermodynamique, et les propriétés qui seront souvent utilisées pour décrire leurs états sont le volume spécifique (densité), la pression et la température

a) Un **fluide** (définition s'appliquant aux liquides et aux gaz) est une matière qui:

- prend la forme du contenant dans lequel il se trouve



- se déforme continuellement lorsque soumise à une force de cisaillement



b) Volume spécifique et masse volumique (densité)

i) volume spécifique (v): volume (V) occupé par unité de masse (M) d'une matière

$$v = \frac{V}{M}$$

$$\text{unité: } [v] = \left[\frac{m^3}{kg} \right] = \left[\frac{ft^3}{lbm} \right]$$

(SI) (EES)

ii) masse volumique (densité) (ρ): masse (M) d'une matière par unité de volume (V), c'est-à-dire l'inverse du volume spécifique

$$\rho = \frac{M}{V}$$

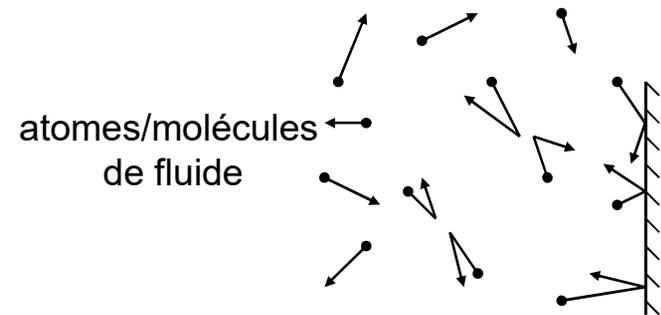
$$\text{unité: } [\rho] = \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{lbm}{ft^3} \right]$$

(SI) (EES)

5) Propriétés importantes des fluides (cont.)

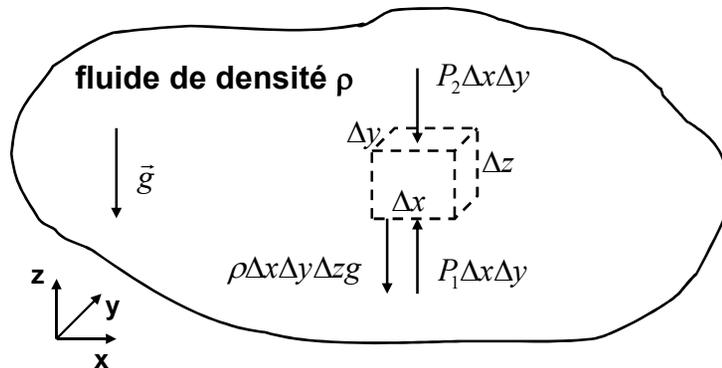
c) **Pression**: force par unité d'aire exercée par un fluide sur une surface, normale (perpendiculaire) à la surface

i) **Perspective nanoscopique**: la pression découle du rebondissement des atomes/molécules du fluide entre eux ou avec une surface



ii) **Variation de la pression dans un champ de gravité**

balances des forces, direction z (physique 101):



$$\sum F_z = P_1 \Delta x \Delta y - P_2 \Delta x \Delta y - \rho \Delta x \Delta y \Delta z g = \rho \Delta x \Delta y \Delta z \overset{0}{a} = 0$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\Delta z} \equiv \frac{\Delta P}{\Delta z} = -\rho g$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta z} = -\rho g \longrightarrow$$

$$\boxed{\frac{dP}{dz} = -\rho g}$$

ii) Variation de la pression dans un champ de gravité (cont.)

$$\int_{P_{ref}}^P dP = - \int_{z_{ref}}^z \rho g dz$$

note: par le même raisonnement, la pression ne varie pas avec x et y

En théorie $\rho=f(x,y,z)$, cependant:

- les liquides sont en général presque incompressibles
- pour les gaz sur une petite variation de hauteur (Δz **petit**), la densité ne varie pas beaucoup

Donc pour ces deux cas: $\rho \cong \text{constant}$

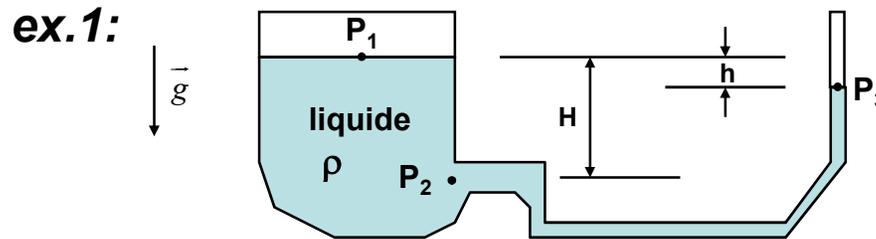
donc $\int_{P_{ref}}^P dP = -\rho g \int_{z_{ref}}^z dz \longrightarrow \boxed{P = P_{ref} + \rho g h}$ **où** $\boxed{h \equiv z_{ref} - z}$

h est la *profondeur* de fluide dans la *direction de la gravité*

Pour les liquides (~incompressible) et les gaz sur une petite variation de hauteur (Δz *petit*): $\rho \cong \text{constant}$.

Dans ce cas, pour relier la pression entre deux points **connectés par un même fluide**

$$P = P_{ref} + \rho gh \quad \text{où} \quad h \equiv z_{ref} - z \quad \underline{h} \text{ est la } \textit{profondeur} \text{ de fluide dans la } \textit{direction de la gravité}$$



Trouver les pressions P_2 et P_3 en terme de P_1 , et P_3 en terme de P_2

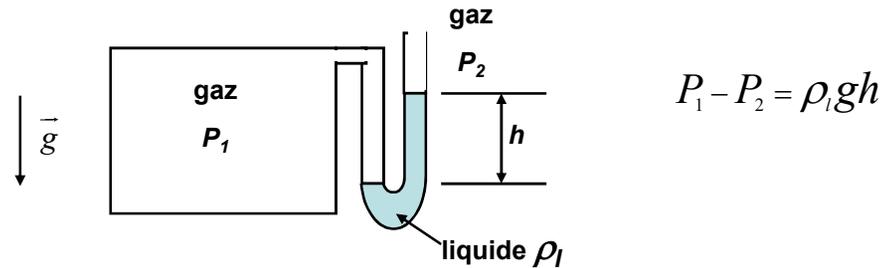
$$P_2 = P_1 + \rho g H$$

$$P_3 = P_1 + \rho g h$$

$$P_3 = P_2 - \rho g (H - h)$$

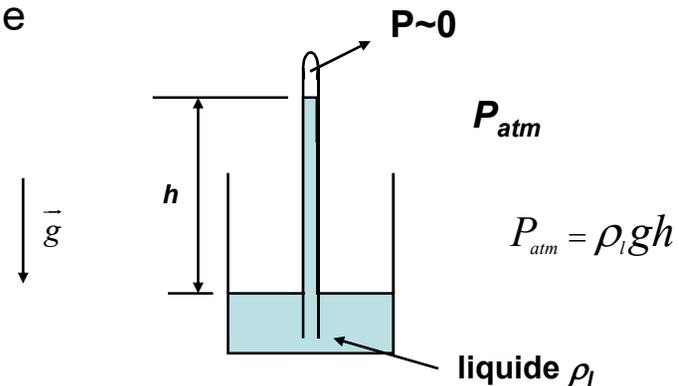
iii) Instruments de mesure de pression

- manomètre: pression différentielle



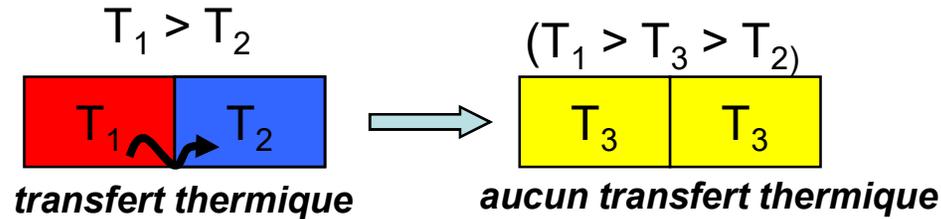
'pression manométrique': pression différentielle par rapport à la pression atmosphérique

- baromètre: pression atmosphérique



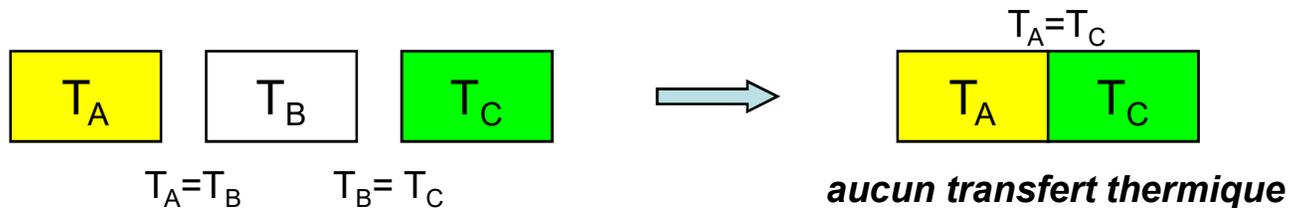
- capteurs de pression: mesure la force exercée par la pression
 - Déformation d'un solide (changement de résistance électrique)
 - matériaux piézo-électriques (force \rightarrow voltage)

d) Température



i) Principe zéro de la thermodynamique

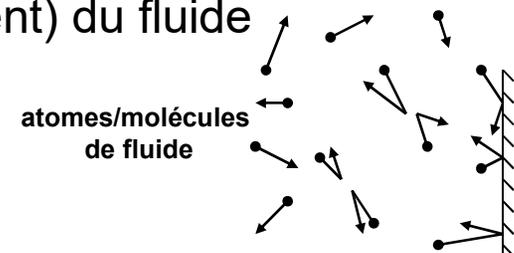
- pour chaque système, il existe une propriété qui s'appelle **température**
- l'égalité de la température est une condition nécessaire et suffisante pour l'**équilibre thermique**, c'est-à-dire aucun transfert thermique



ii) Perspective nanoscopique

La **température** est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des atomes/molécules (qui vibrent et/ou bougent) du fluide

(la pression est reliée à la fréquence des collisions entre les atomes/molécules en mouvement)

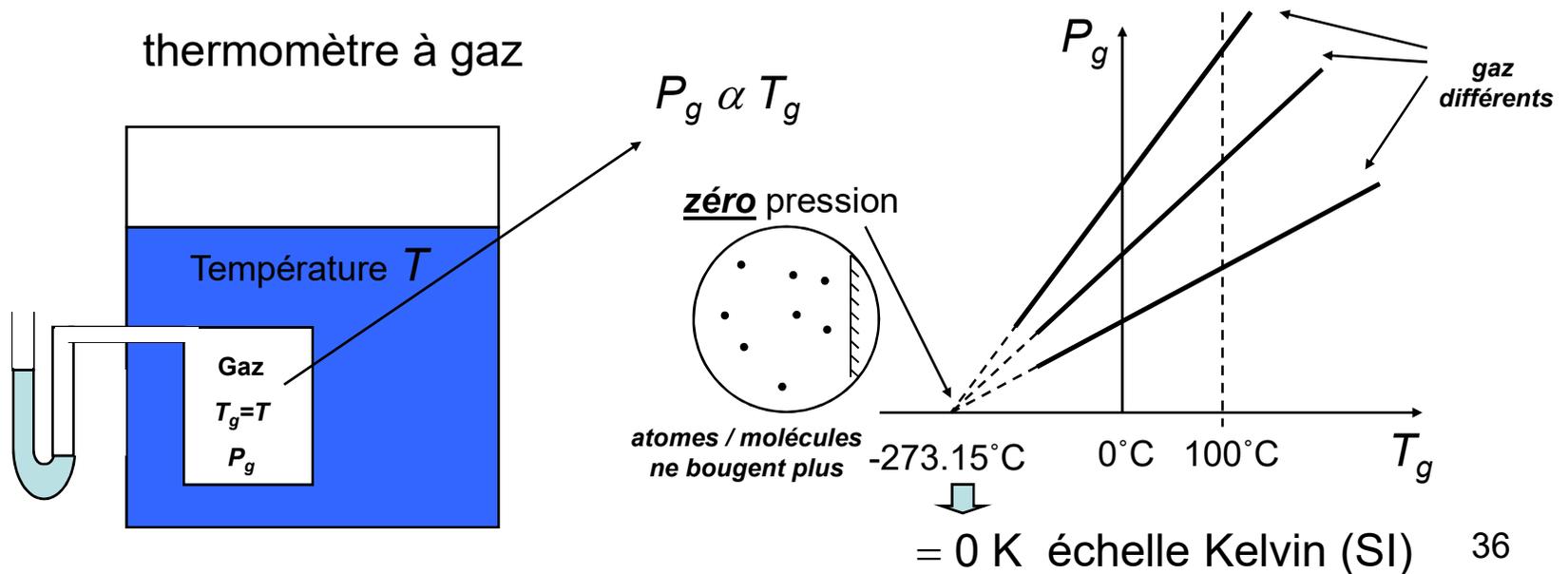


iii) Échelles de température

- communes: basées sur des phénomènes facilement reproductibles

exemple: échelle Celsius (SI), basée sur les points de congélation et d'évaporation de l'eau, définis comme 0°C et 100°C

- thermodynamique: indépendante des propriétés de la matière. Pour les gaz à basse pression, la pression est proportionnelle à la température lorsque le volume est constant, donc:



Échelle Kelvin (SI): $[K]=[^{\circ}C]+273.15$ (ΔT of 1K = ΔT of $1^{\circ}C$)

- Équivalents en système impérial:

Fahrenheit: $[^{\circ}F]=[^{\circ}C]\times 1.8 + 32$ (échelle commune)

Rankine: $[R] = [^{\circ}F] + 459.67 = [K]\times 1.8$ (échelle thermodynamique)

iv) Instruments de mesure

- thermomètre à gaz
- thermomètre: mesure le changement du volume d'un liquide (ex. mercure, alcool,...) en fonction de la température
- thermocouple: mesure le voltage généré par le contact de deux métaux différents et qui est fonction de la température
- thermistor: matière semi-conductrice dont la résistance électrique est fonction de la température
- thermomètre optique: mesure la température d'une surface par rayonnement électromagnétique (pour les applications à très hautes températures)

6) Méthode de résolution de problèmes

Approche systématique pour résoudre des problèmes en génie en général et en thermodynamique en particulier:

- 1) Résumez le problème dans vos propres mots: pour vous assurer de le comprendre et de savoir ce qui est demandé.
- 2) Faites un schéma physique du système, incluant les informations connues et dessinez les interactions avec l'environnement.
- 3) Écrivez une liste des hypothèses/suppositions que vous allez faire pour simplifier le problème. Justifiez au besoin.
- 4) Définissez le système et y appliquez les principes physiques, utilisant les hypothèses/suppositions en (3) pour les simplifier.
- 5) Obtenir les propriétés manquantes par les équations d'état ou tables (indiquez la source)
- 6) Remplacer les valeurs en (2) et (5) dans les équations dérivées en (4) pour calculer la solution. Utiliser le principe d'homogénéité des unités pour vérifier les équations.
- 7) Assurez-vous que les résultats sont raisonnables, et s'ils le permettent, vérifiez certaines des hypothèses

exemple: CBK&L ex. 1.8, p. 25 (ex. 1-9, p.31 dans C&B, 6^{ème} éd.)

Note sur les chiffres significatifs:

Faites attention de ne pas utiliser trop de décimales, ce qui suggérerait par erreur qu'une solution est plus précise qu'elle ne devrait l'être.