

# MEC1210\_Thermodynamique (Heures 1-4)

---

## *Notions de base*



*Smail Guenoun*

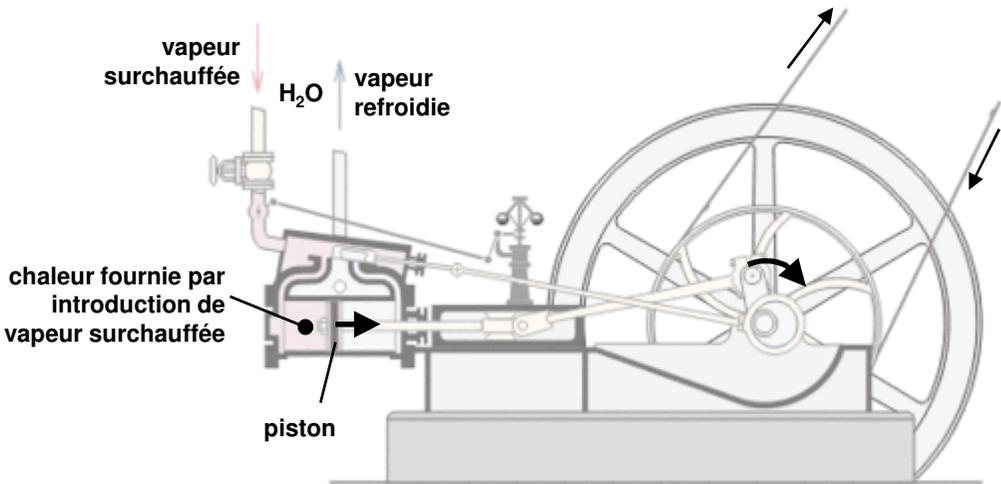
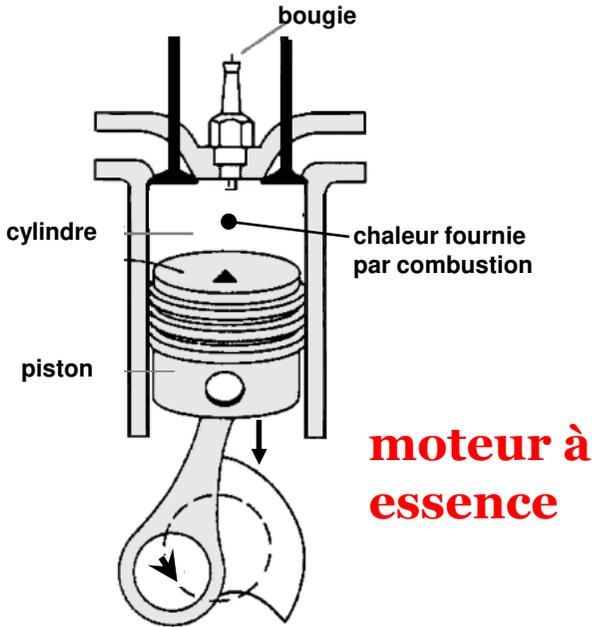
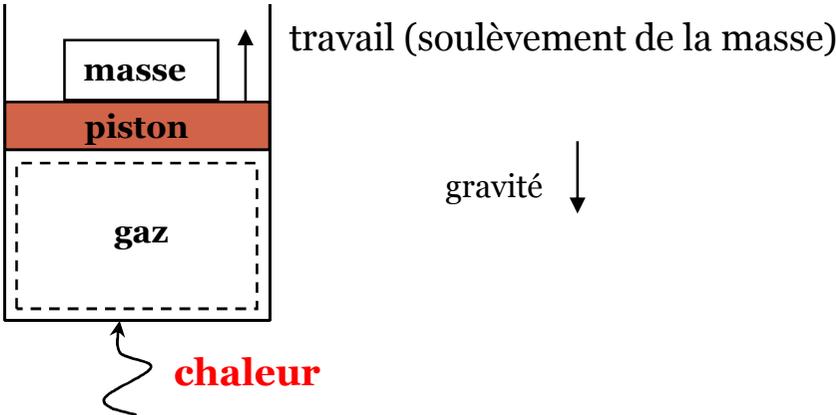
*(D'après les notes de cours de Pr.Huu Duc Vo)*

# Introduction

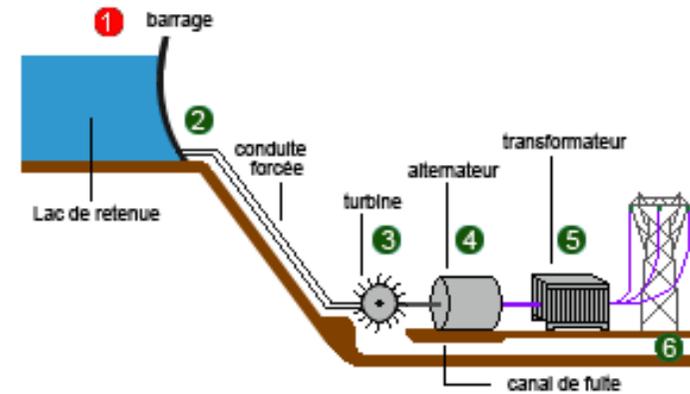
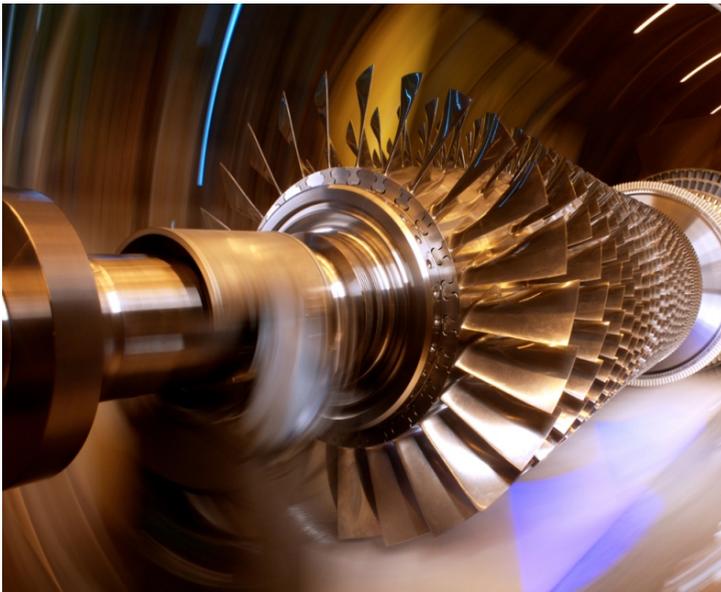
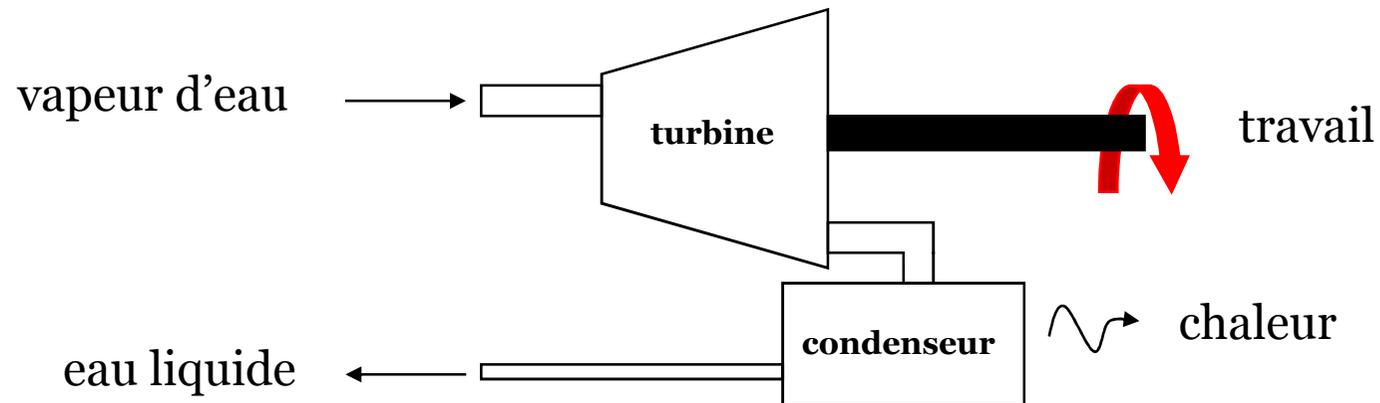
---

- **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.**

# Introduction

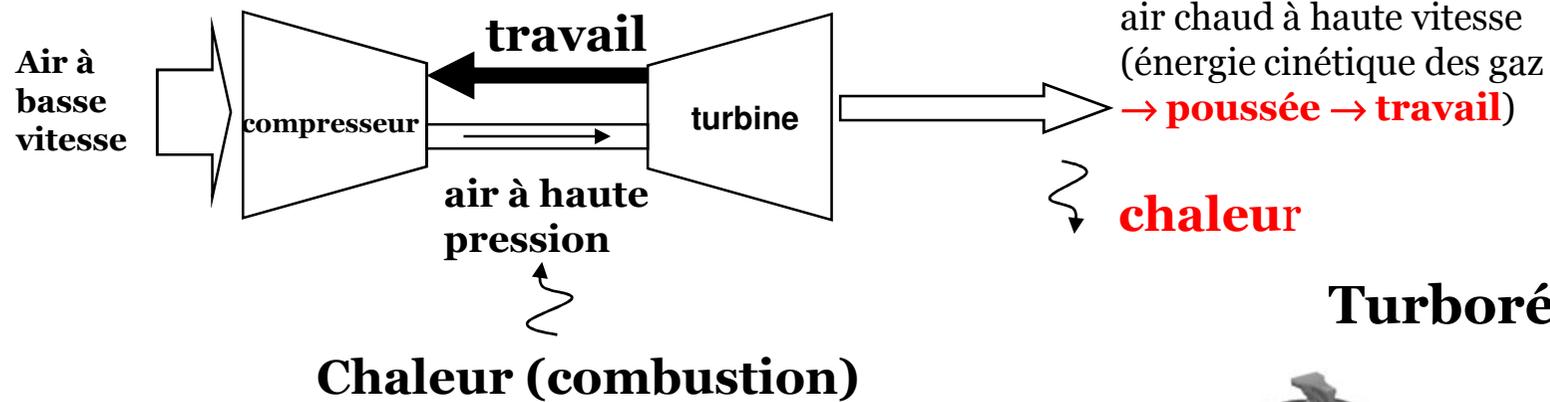


# Introduction



**Turbine**

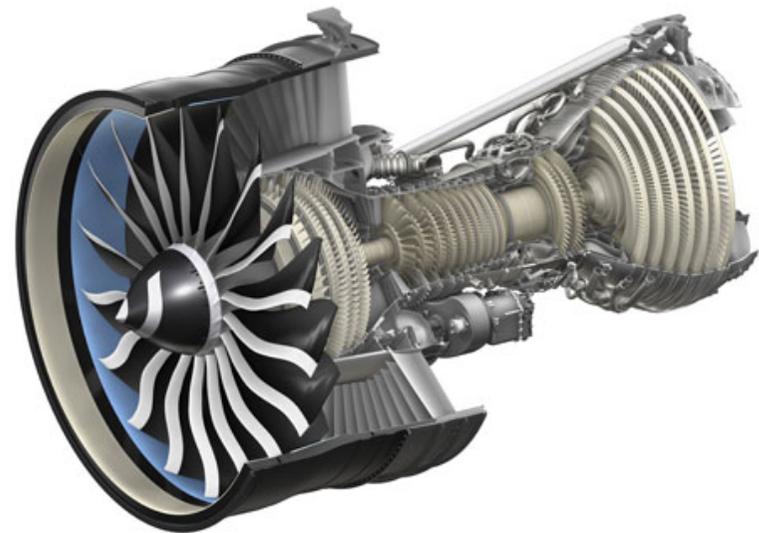
# Introduction



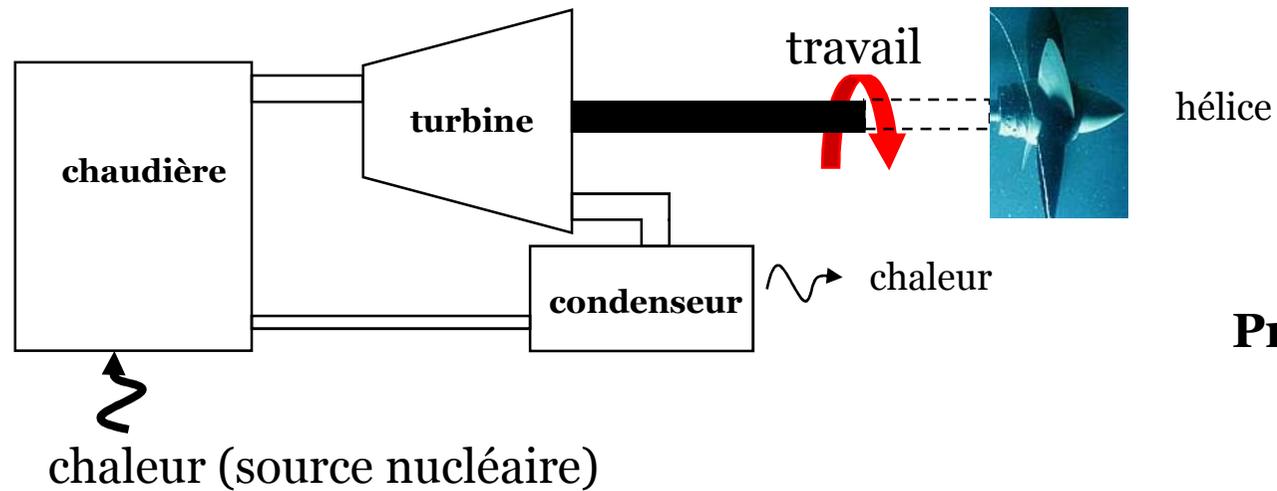
**Turboréacteur**



**Centrale nucléaire**



# Introduction

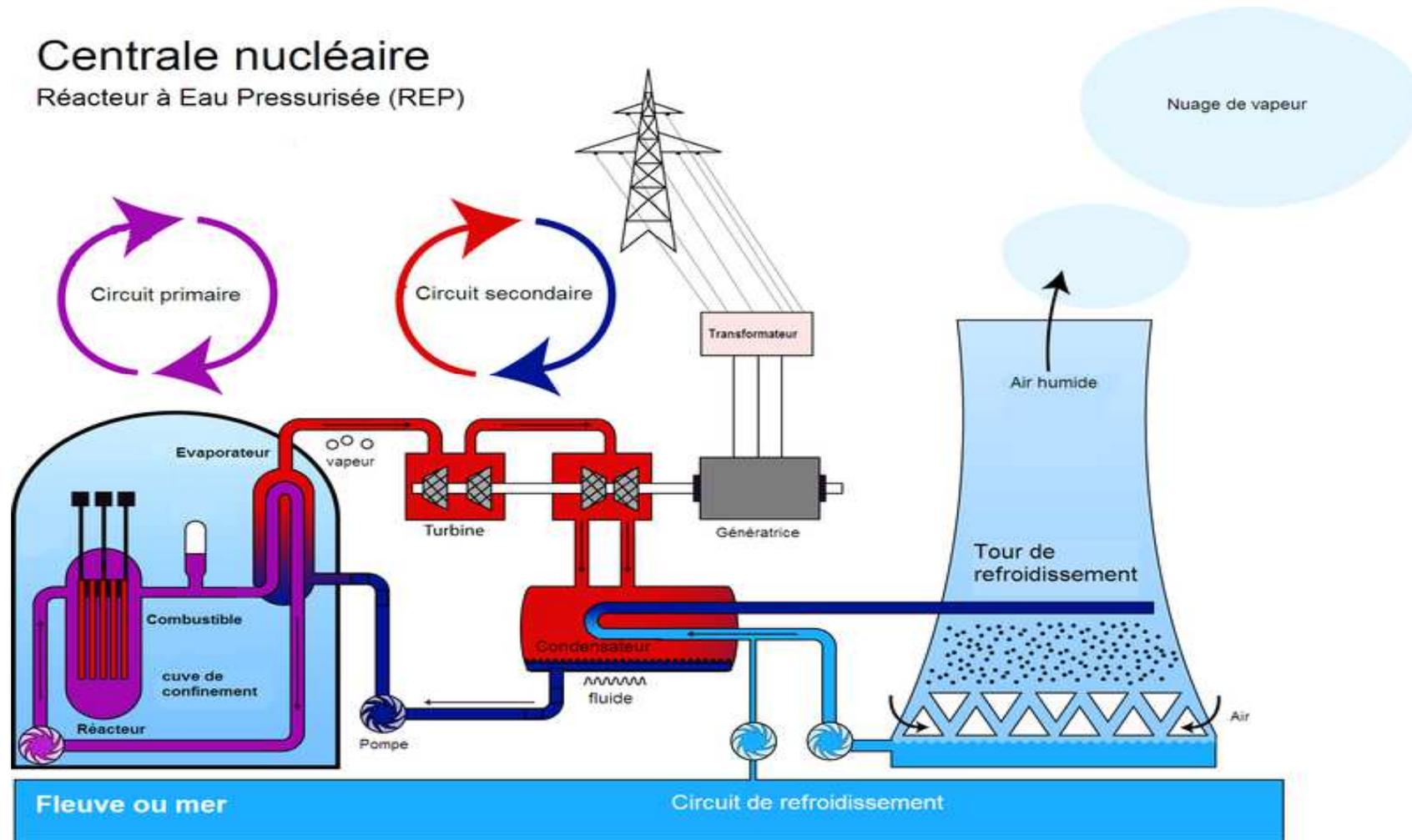


## Propulsion navale nucléaire



# Introduction

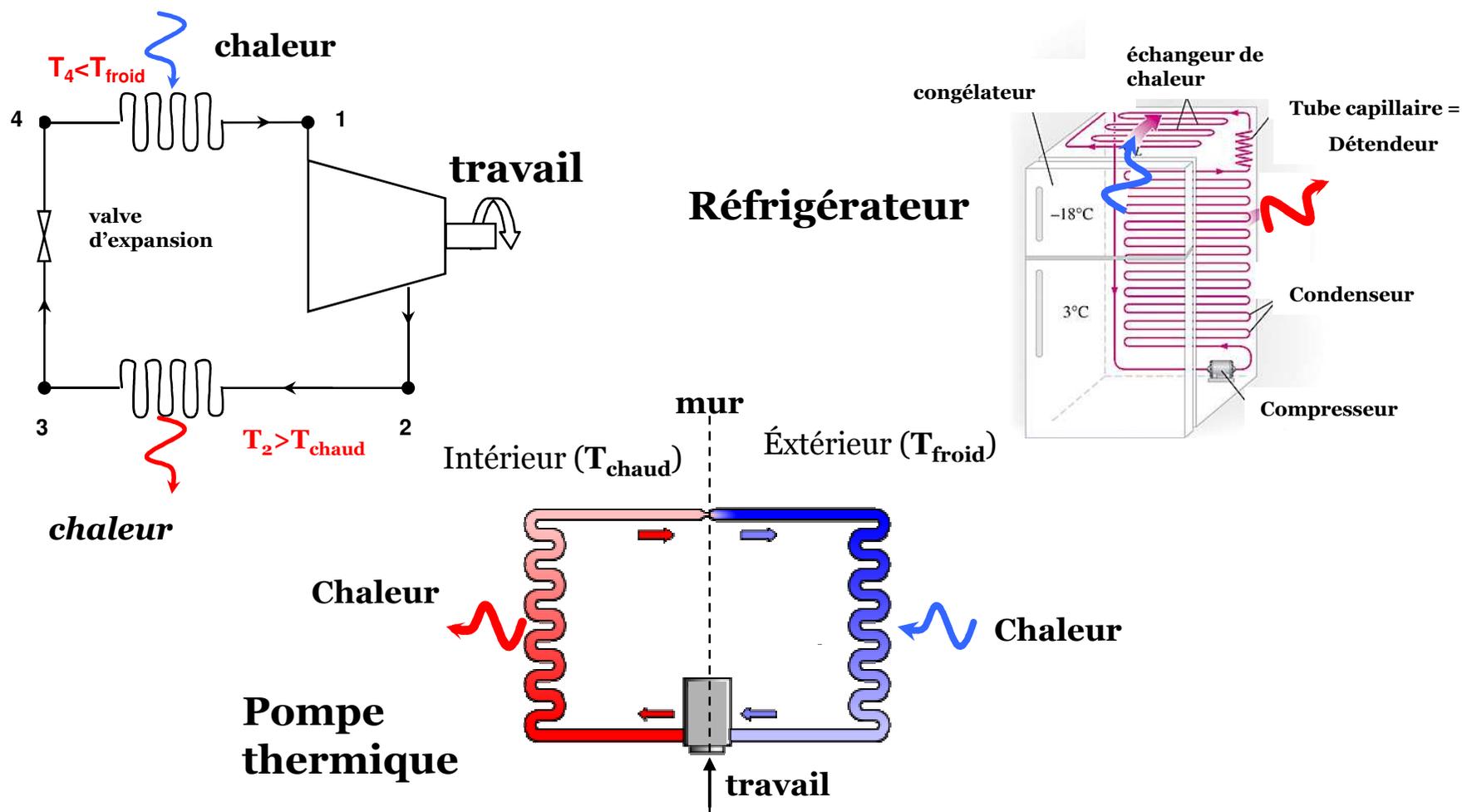
## Centrale nucléaire Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



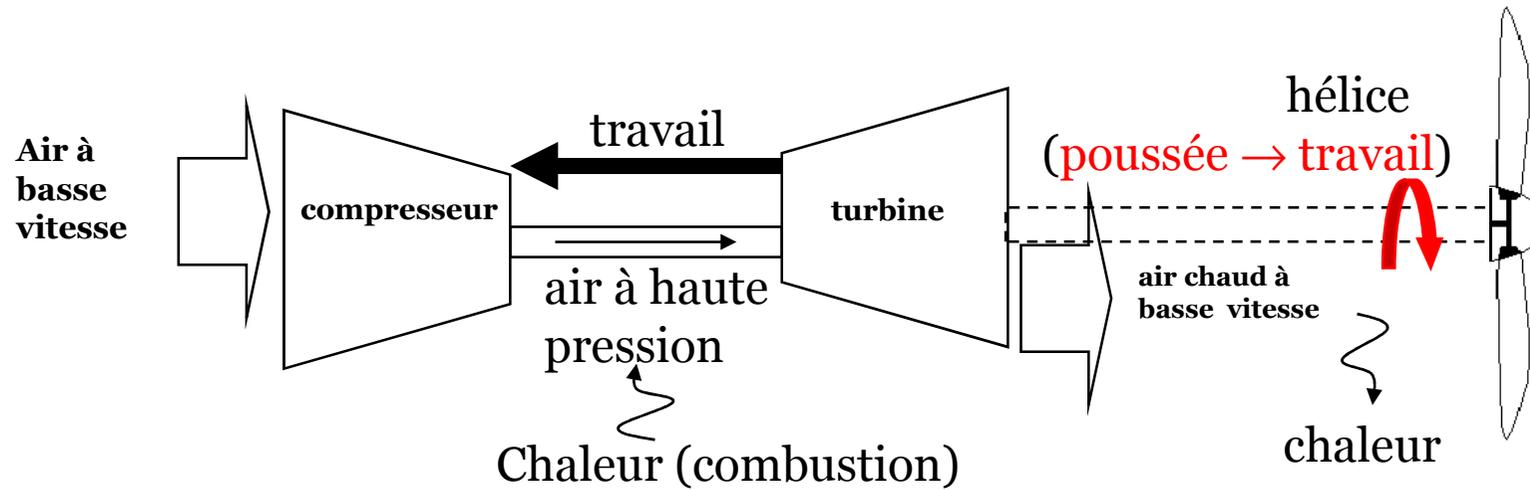
Source : [http://www.hellfirez.de/web/referate/inhalte/Physik\\_Energie.htm](http://www.hellfirez.de/web/referate/inhalte/Physik_Energie.htm)

# Introduction

## Réfrigérateur et pompe thermique



# Introduction



**Turbopropulseur**



# Plan de cours

---

## 1) Notions de base

Systemes, propriétés, évolution, énergie, travail, chaleur

## 2) Premier principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

bilan / conservation de l'énergie

## 3) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

## 4) Premier principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

## 5) Second principe de la thermodynamique

## 6) Entropie

Bilan d'entropie, rendement

## 7) Cycles thermodynamiques

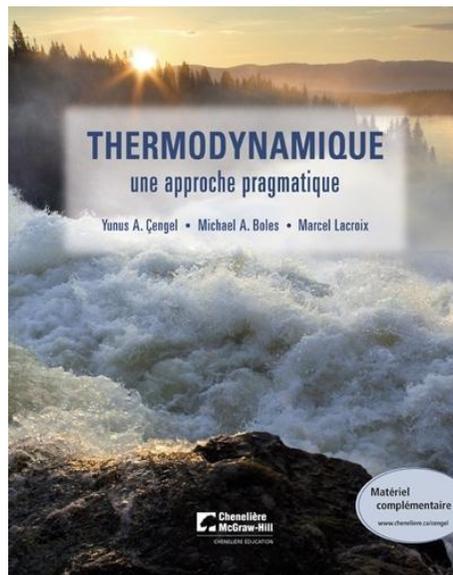
Réfrigération, moteurs à combustion interne, centrales thermiques et turbine à gaz

## 1) Mélanges non réactifs

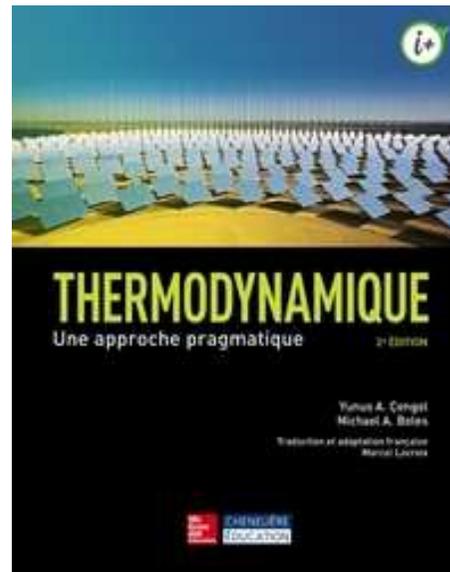
# Méthodologie de l'enseignement

## ➤ Enseignement :

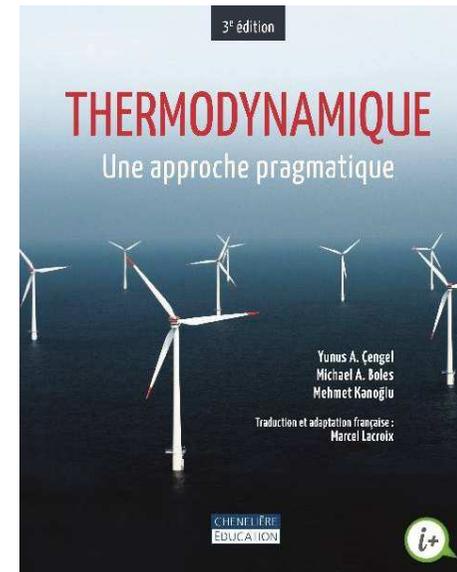
- ❖ **Classe (3 hrs/semaine):** théorie sur diapositives
- ❖ **Périodes de travaux dirigés (TD) ou projet (2 hrs/semaine)**



1<sup>ère</sup> édition



2<sup>ème</sup> édition



3<sup>ème</sup> édition

## Thermodynamique - Une approche pragmatique

Auteurs : Y. Çengel, M. Boles, M. Kanoğlu (pour la 3<sup>ème</sup> édition) et M. Lacroix

# Notions de base

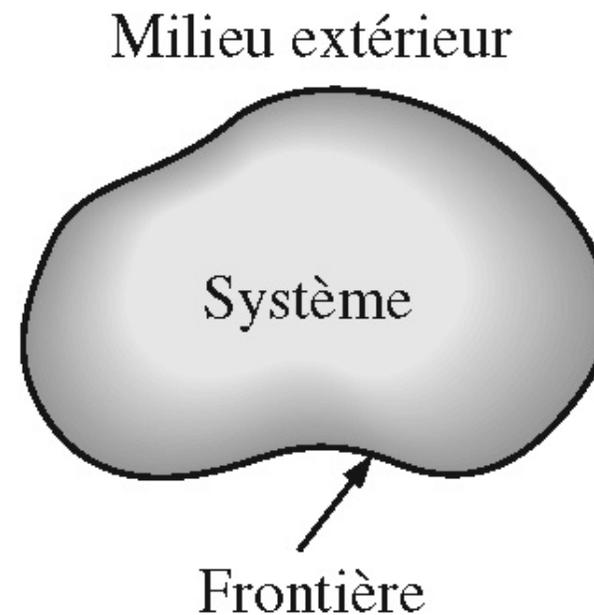
---

**Système** : Une quantité de matière ou une région dans l'espace choisie pour étude.

**Environnement**: tout ce qui est en dehors du système thermodynamique

**Frontière**: surface fermée, réelle ou imaginaire, qui délimite le système et le sépare de l'environnement. Cette surface peut être **fixe** ou **amovible**.

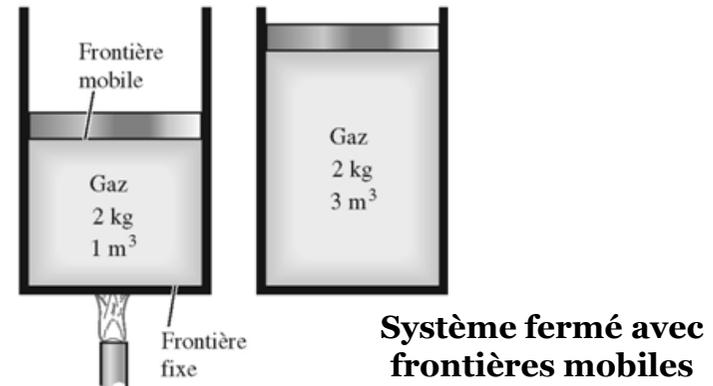
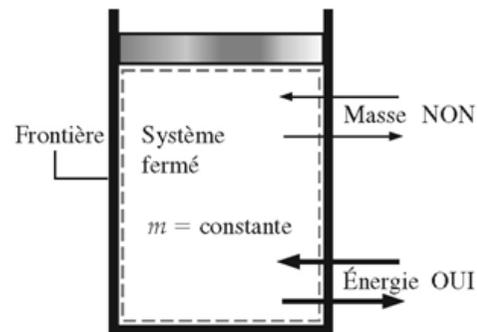
**Univers**: système+ environnement



# Systemes thermodynamiques

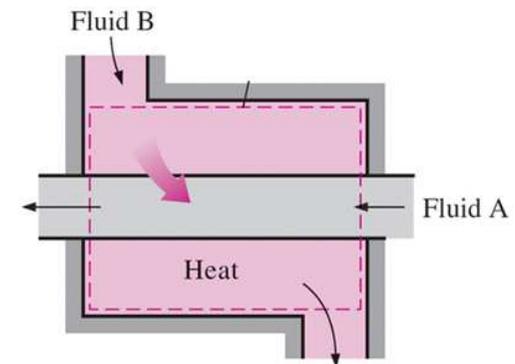
*Il existe deux types de systemes:*

**1) Systeme ferme:** quantite de matiere fixe, frontiere *impermeable* a la masse, mais *permeable* a l'energie (chaleur ou travail).



**2) Systeme ouvert:** frontiere permeable a la masse et l'energie.

Exemple: Echangeur de chaleur, pompes, turbines, ...etc



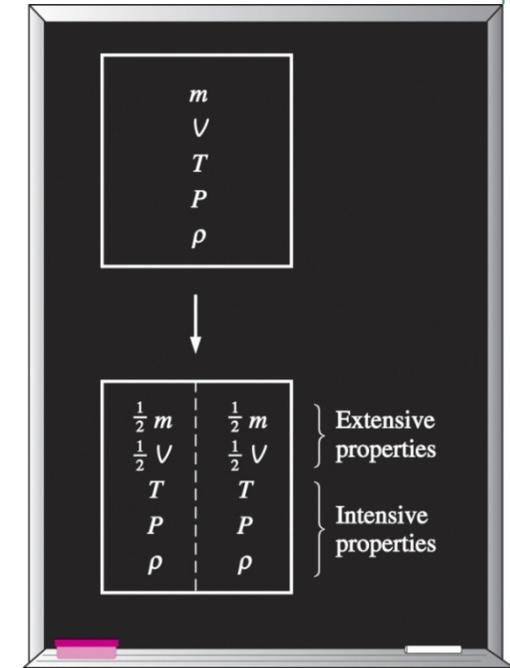
# Propriété thermodynamique

**1) Propriété extensive:** Dépendantes de la masse

Exemple: masse (M), volume (V)

**2) Propriété intensive:** propriété indépendante de la masse

Exemples: pression (P), température (T)

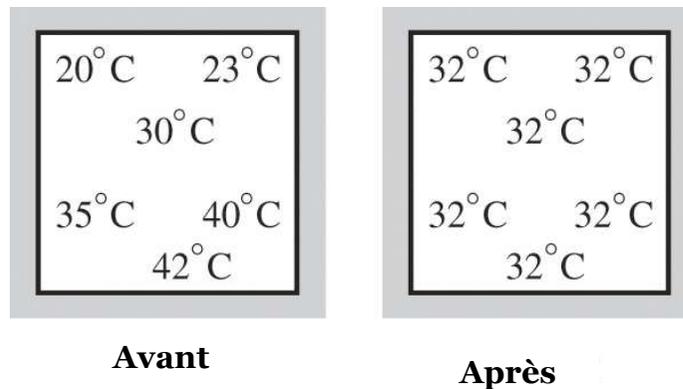


# Évolution et cycles

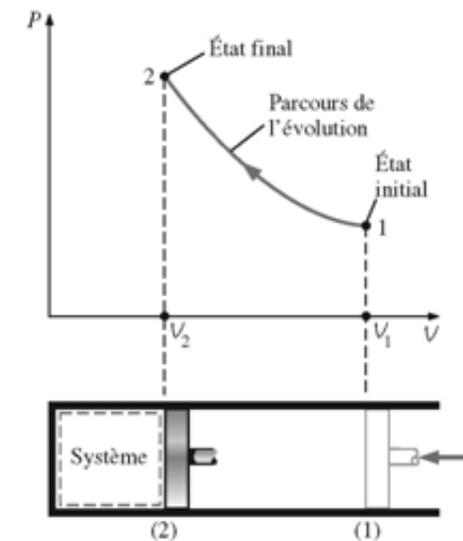
**État:** l'état d'un système thermodynamique est défini habituellement par la valeur de ses variables comme la température, la pression et la masse volumique .

**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, mécanique et chimique.



**Évolution:** C'est un processus qui fait passer le système d'un état initial vers un état final. Une ou plusieurs variables du système subissent une variation.



# Évolution et cycles

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



a) Compression lente (quasi-statique).



b) Compression brusque (hors d'équilibre).

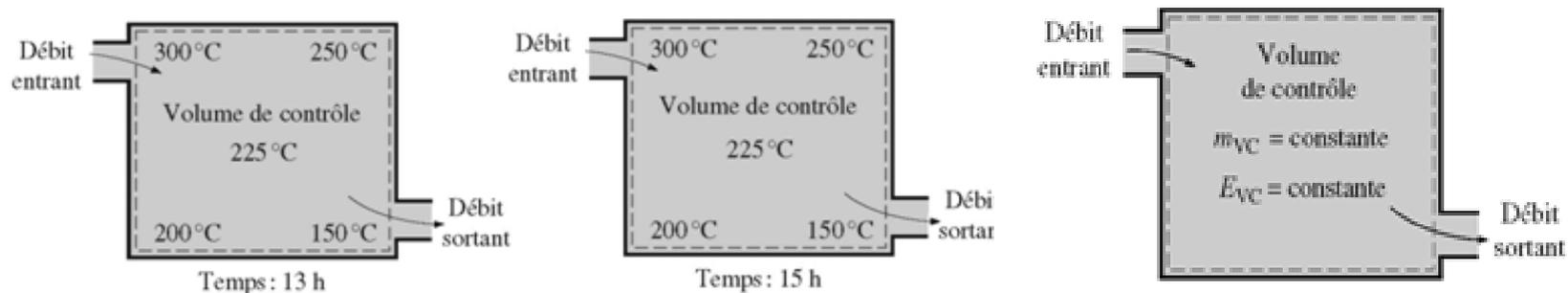
**Évolution isotherme** : évolution à température constante

**Évolution isobare** : évolution à pression constante

**Évolution isochore** : évolution à volume constant

**Évolution en régime permanent** : aucun changement avec le temps

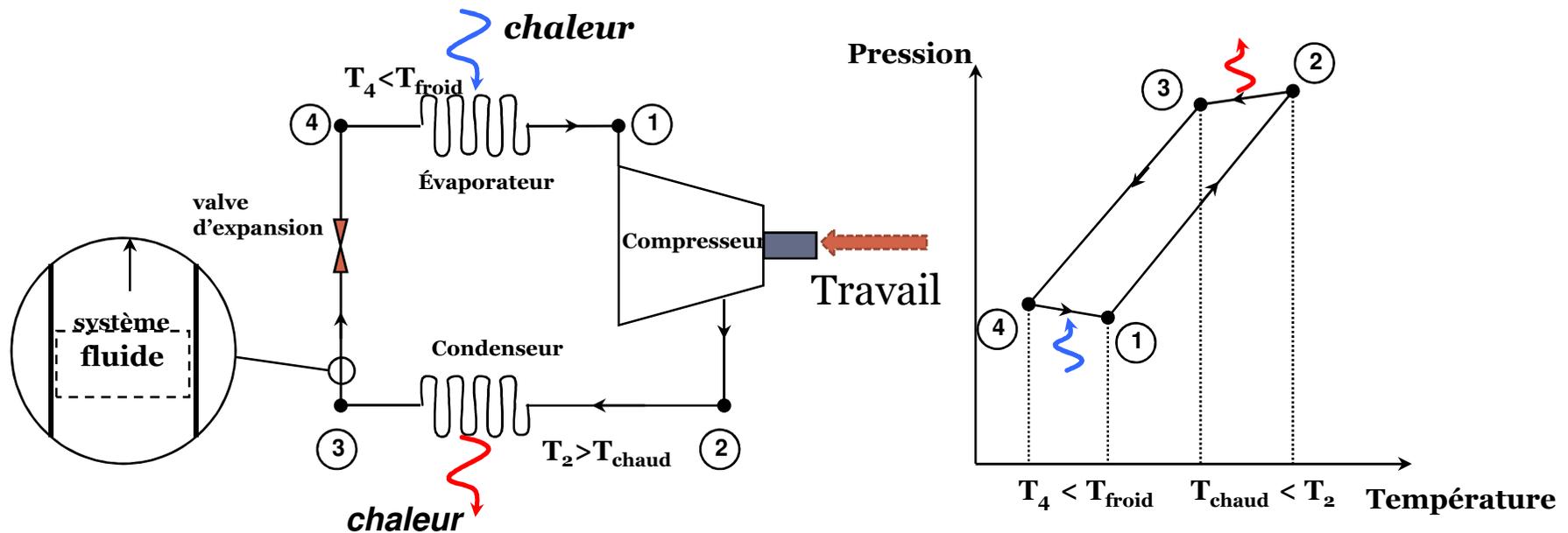
**Évolution en régime transitoire** : changements se produisent avec le temps



**systèmes en régime permanent**

# Évolution et cycles

**Cycle:** Évolution où le système revient à son état de départ.



cycle de réfrigération (simplifié)

# Phase et substance

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

**Exemple:** - eau, huile: phases liquides  
- air, vapeur d'eau: phases gazeuses

**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***

# Unités de mesure

---

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

## Unités primaires

- Masse
- Longueur
- Temps
- Température
- Courant électrique
- Luminosité
- Quantité de matière

## Unités secondaires

- Volume
- Vitesse
- Force
- Énergie
- Travail
- **Etc...**

# Systeme international d'unités (SI)

Systeme 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] ( $\Delta$ 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...

Facteur	Préfixe	Symbole	Facteur	Préfixe	Symbole
$10^{-12}$	pico	p	$10^3$	kilo	k
$10^{-9}$	nano	n	$10^6$	méga	M
$10^{-6}$	micro	$\mu$	$10^9$	giga	G
$10^{-3}$	milli	m	$10^{12}$	tera	T

# Systeme imperial (EES: English Engineering System)

- Systeme 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] ( $\Delta$ 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  $32.174 \text{ ft/s}^2$ )
- 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  $1^{\circ}F$ )

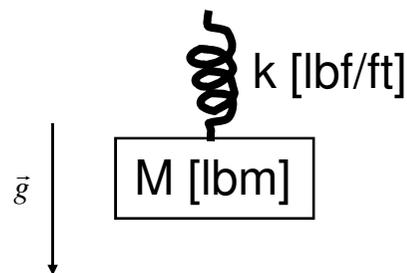
# Homogénéité dimensionnelle

On ne peut additionner et soustraire que des quantités physiques équivalentes, c'est à dire qui ont 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:**  $\left[\frac{lbm \cdot ft}{lbf \cdot s^2}\right]$

$/ g_c$

# Masse volumique et volume massique

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

$$v = \frac{V}{M} \left[ \frac{m^3}{kg} \right]_{(SI)} \text{ ou } \left[ \frac{ft^3}{lbm} \right]_{(EES)}$$

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

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{1}{v} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]_{SI} \text{ ou } \left[ \frac{lbm}{ft^3} \right]_{EES}$$

- ✓ Lorsque la masse volumique est constante, alors le fluide est **incompressible**
- ✓ Lorsque la masse volumique est variable, alors le fluide est **compressible**

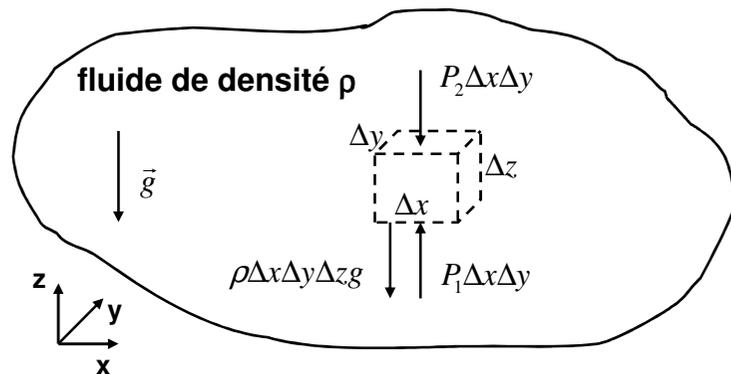
# Pression

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

$$P = \frac{F}{A}$$

## Variation de la pression dans un champ de gravité

Équilibres des forces, direction z :



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

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

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

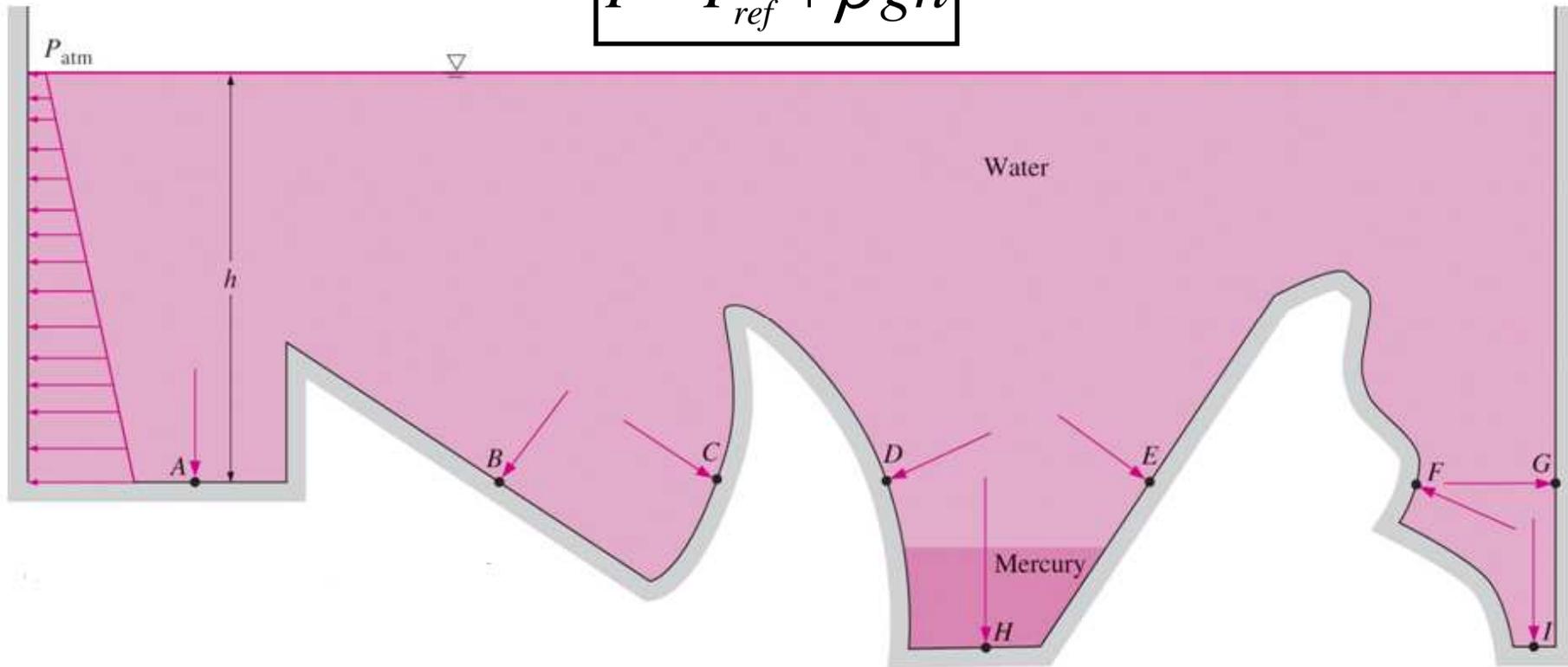
$$\boxed{\frac{dP}{dz} = -\rho g}$$

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

$$\boxed{\text{Donc: } P = P_{ref} + \rho gh}$$

# Pression

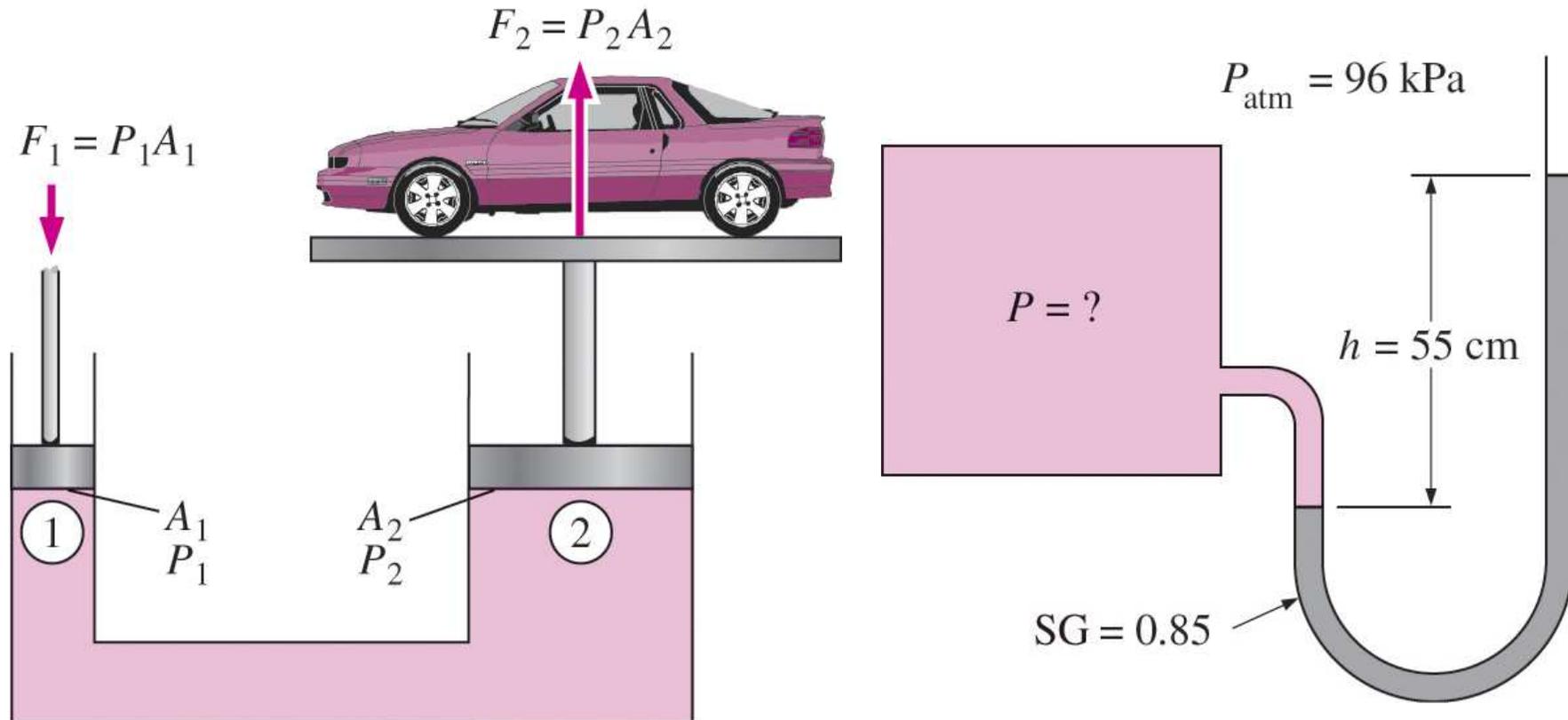
$$P = P_{ref} + \rho gh$$



$P_A = P_B = P_C = P_D = P_E = P_F = P_G = P_{atm} + \rho gh$  (Même hauteur  $h$  et même fluide (eau))

$P_H \neq P_I$  (Même hauteur  $h$  et des fluides différents (eau et mercure))

# Pression



**Principe du Blaise Pascal**

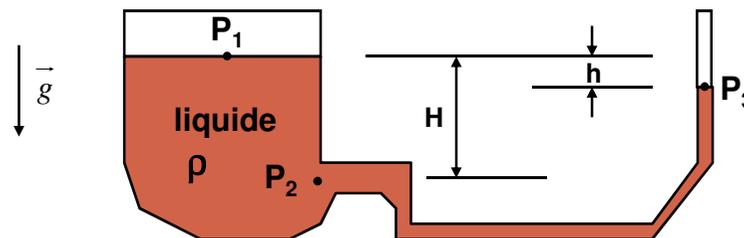
# Pression

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

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

$$P = P_{ref} + \rho gh \quad \text{où} \quad h \equiv z_{ref} - z$$

ex.1:



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

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

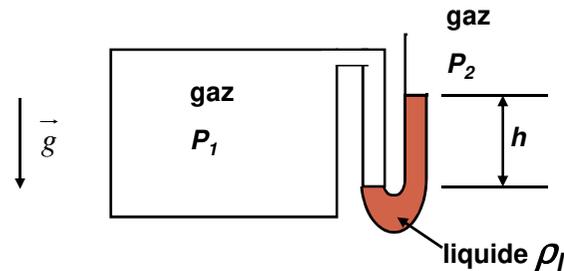
$$P_2 = P_1 + \rho g H$$

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

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

# Pression

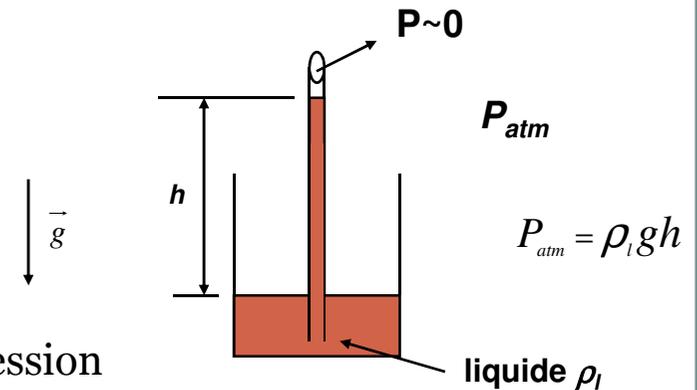
**Manomètre:** pression différentielle



$$P_1 - P_2 = \rho_l g h$$

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

- **baromètre:** pression atmosphérique



$$P_{atm} = \rho_l g h$$

**capteurs de pression:** mesure la force exercée par la pression

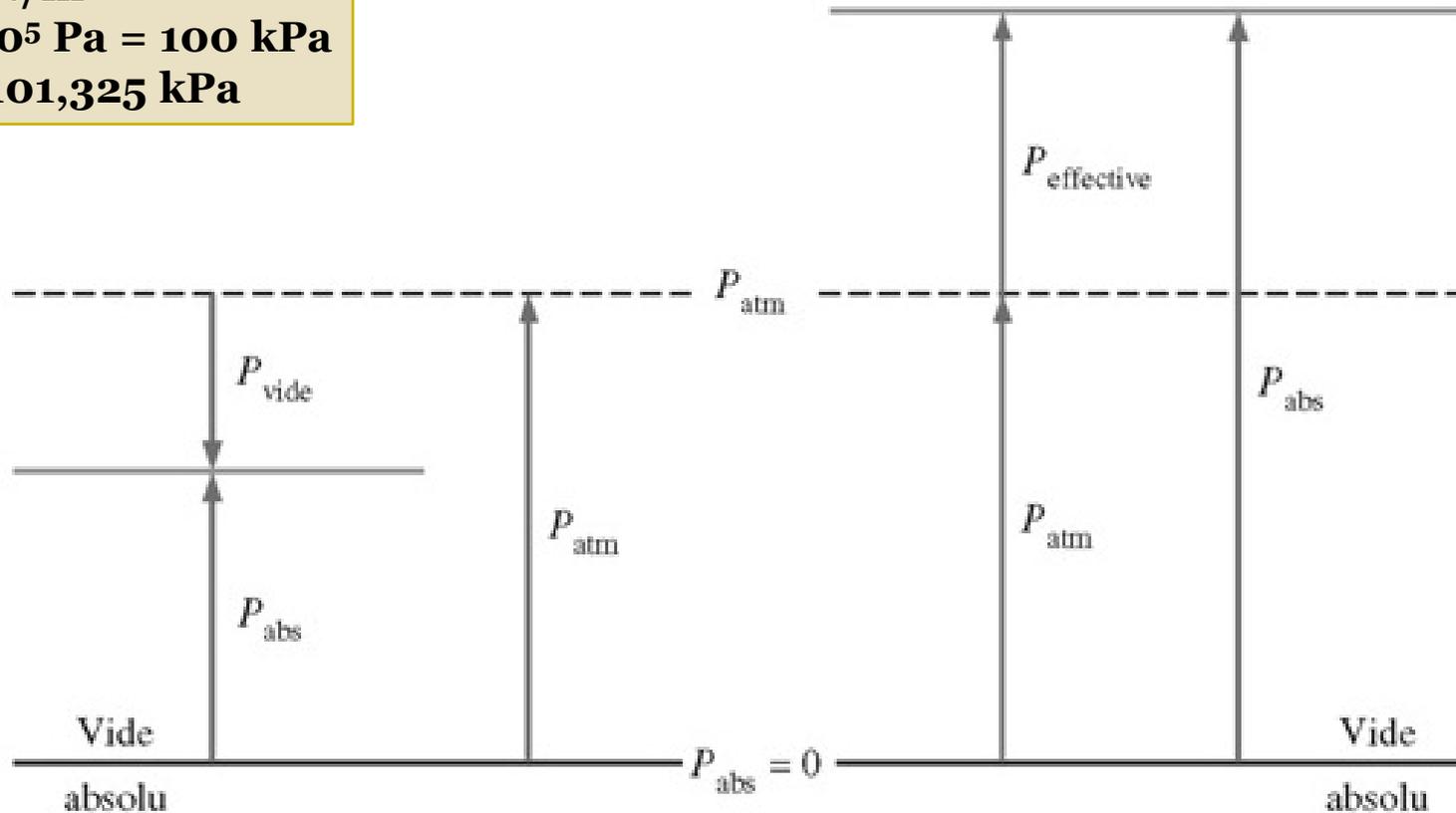
- Déformation d'un solide (changement de résistance électrique)
- Matériaux piézo-électriques (force  $\rightarrow$  voltage)

# Pressure

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$$

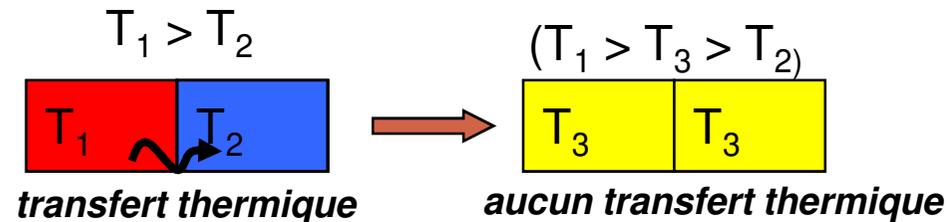


$$P_{Vide} = P_{atm} - P_{absolue}$$

$$P_{effective} = P_{absolue} - P_{atm}$$

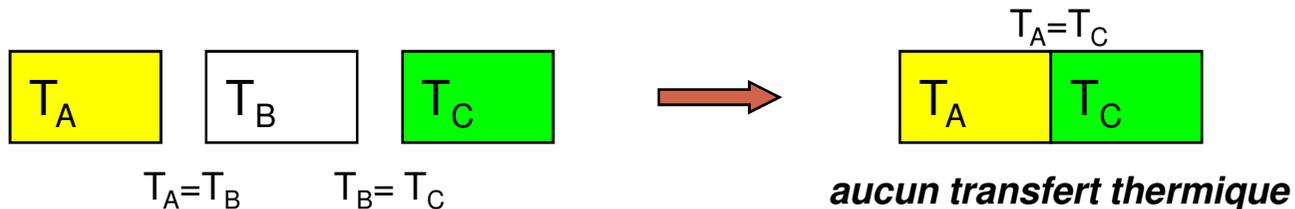
# Température

- La température est une manifestation de l'énergie cinétique d'un système thermodynamique due à l'agitation des constituants de la matière.



## 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



# 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  $0^{\circ}\text{C}$  et  $100^{\circ}\text{C}$

**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):  $[\text{K}] = [^{\circ}\text{C}] + 273.15$  ( $\Delta T$  of 1K =  $\Delta T$  of  $1^{\circ}\text{C}$ )

- **Équivalents en système impérial:**

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

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

# Température

## Instrument de mesure de la température:

- **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)



# Méthodes de résolution de problème

---

**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

# Méthodes de résolution de problème

---

## **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.

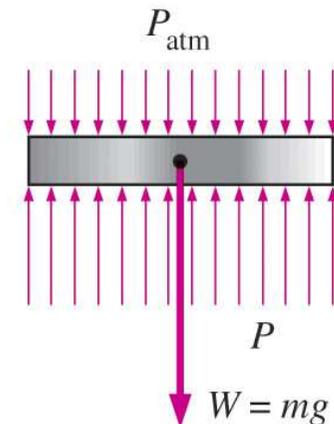
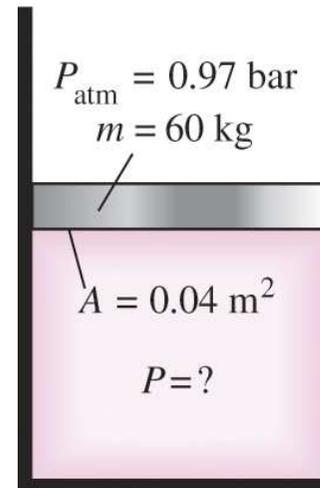
# Exemple 1

## Exemple 1.8 du livre

Soit le système piston-cylindre dont la masse du piston est de 60 kg et la section du cylindre est 0.04 m<sup>2</sup>. la pression atmosphérique environnante est de 0.97 bar, et l'accélération gravitationnelle est  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ .

- 1) Déterminez la pression dans le cylindre
- 2) Déterminez la pression dans le cylindre si, cette fois, de la chaleur est transmise au gaz dans le cylindre et son volume double.

Solution (en classe)



# Lecture suggérée

---

Sections **1.1 à 1.12** du livre, «**Thermodynamique, une approche pragmatique**», Y. Cengel, M. Boles, M. Kanoğlu et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2019.