

MEC1210 THERMODYNAMIQUE

ENSEIGNANT: RAMDANE YOUNSI
BUREAU: C-318.1
TELEPHONE: (514)340-4711 ext. 4579
COURRIEL: ramdane.younsi@polymtl.ca

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

Plan du cours

1-2) Notions de base

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

3) Premier principe de la thermodynamique (systemes fermés)

Bilan/conservation de l'énergie

4) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

5) Premier principe de la thermodynamique (systemes ouverts)

6) Second principe de la thermodynamique

Évolutions réversibles et irréversibles

7) Entropie

Bilan d'entropie, rendement

8) Cycles thermodynamiques communs

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

9) Mélanges non réactifs

Méthodologie

➤ Enseignement:

- Classe (3 hrs/semaine): théorie sur diapositives et exemples au tableau
- Périodes de travaux dirigés (TD) (2 hrs/2 semaines)
- Périodes de projet (2 hrs/2 semaines)
- Référence (**Non requis**): Y. Çengel, M. Boles, Mehmet Kanoğlu et M. Lacroix, "Thermodynamique, une approche pragmatique," Chenelière McGraw-Hill, 3ed 2019
- Outil de travail (projet): logiciel EES
- Heures de consultation : Lundi, Mardi et Mercredi : 9h-11h ou sur rendez-vous (Zoom).

➤ Évaluation:

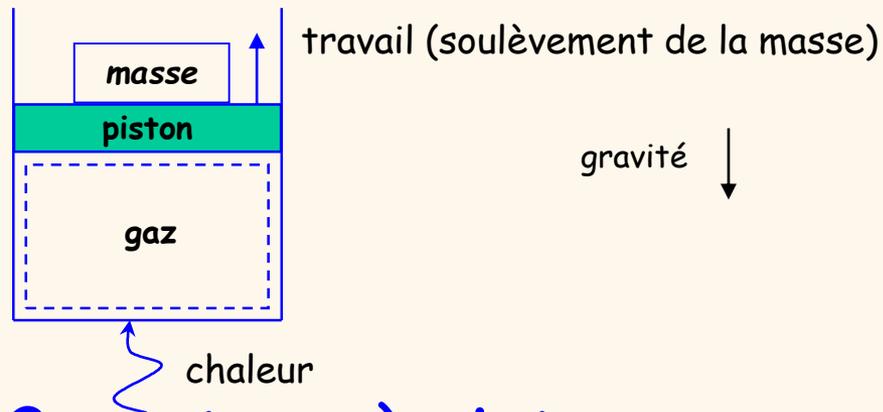
- Contrôle périodique (**35%**) (**Jeudi 29 février en soirée**)
- Travail de TD (**10%**)
- Projet (**15%**)
- Examen final (**40%**)

THERMODYNAMIQUE

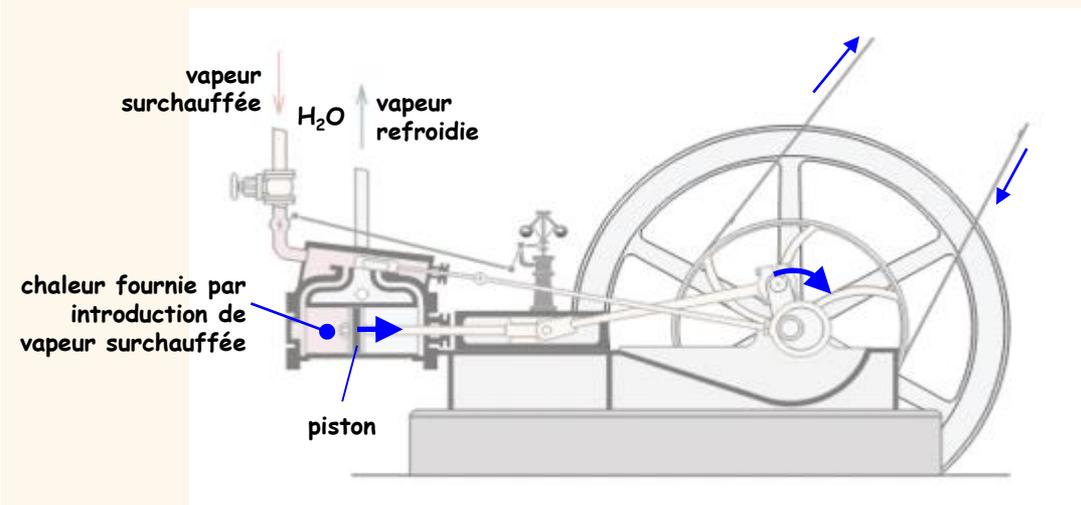
- ❑ Thermodynamique (Thermo=chaleur, Dynamis=mouvement)
- ❑ Une science pour décrire les processus de transformation de l'énergie et de changement de propriétés de la matière.
- ❑ Un outil d'ingénierie pour étudier les performances des systèmes impliquant une production et la transformation de l'énergie.

1.) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

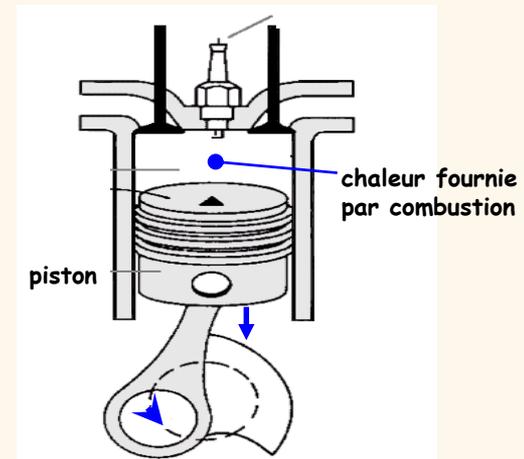
Exemple 1: Piston et cylindre



Exemple 2: moteur à piston

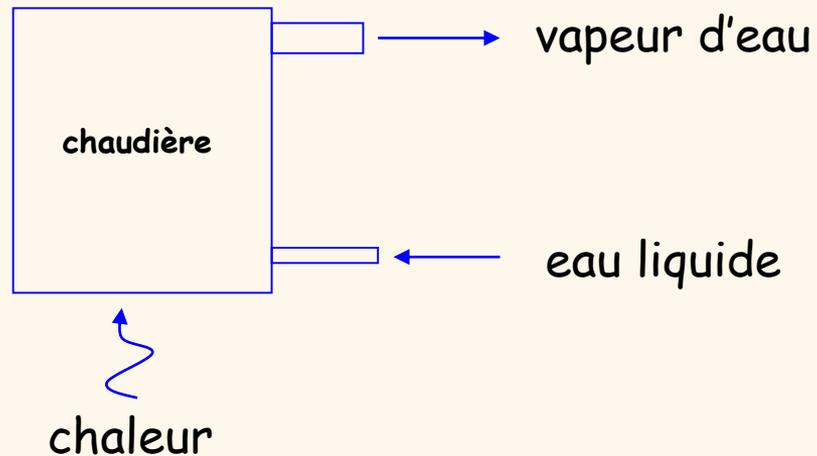


moteur à vapeur



moteur à essence

Exemple 3: Chaudière

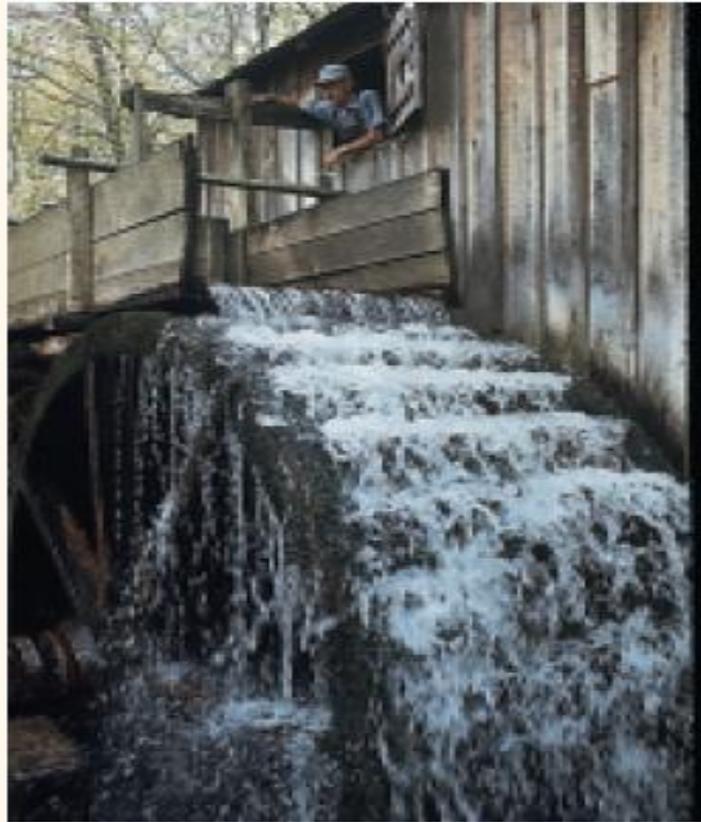


Exemple 4: Éclaires

Les éclairs sont une manifestation de l'énergie électrostatique : une décharge convertit cette forme d'énergie potentielle en lumière et en chaleur.



Exemple 5: Roue à aubes



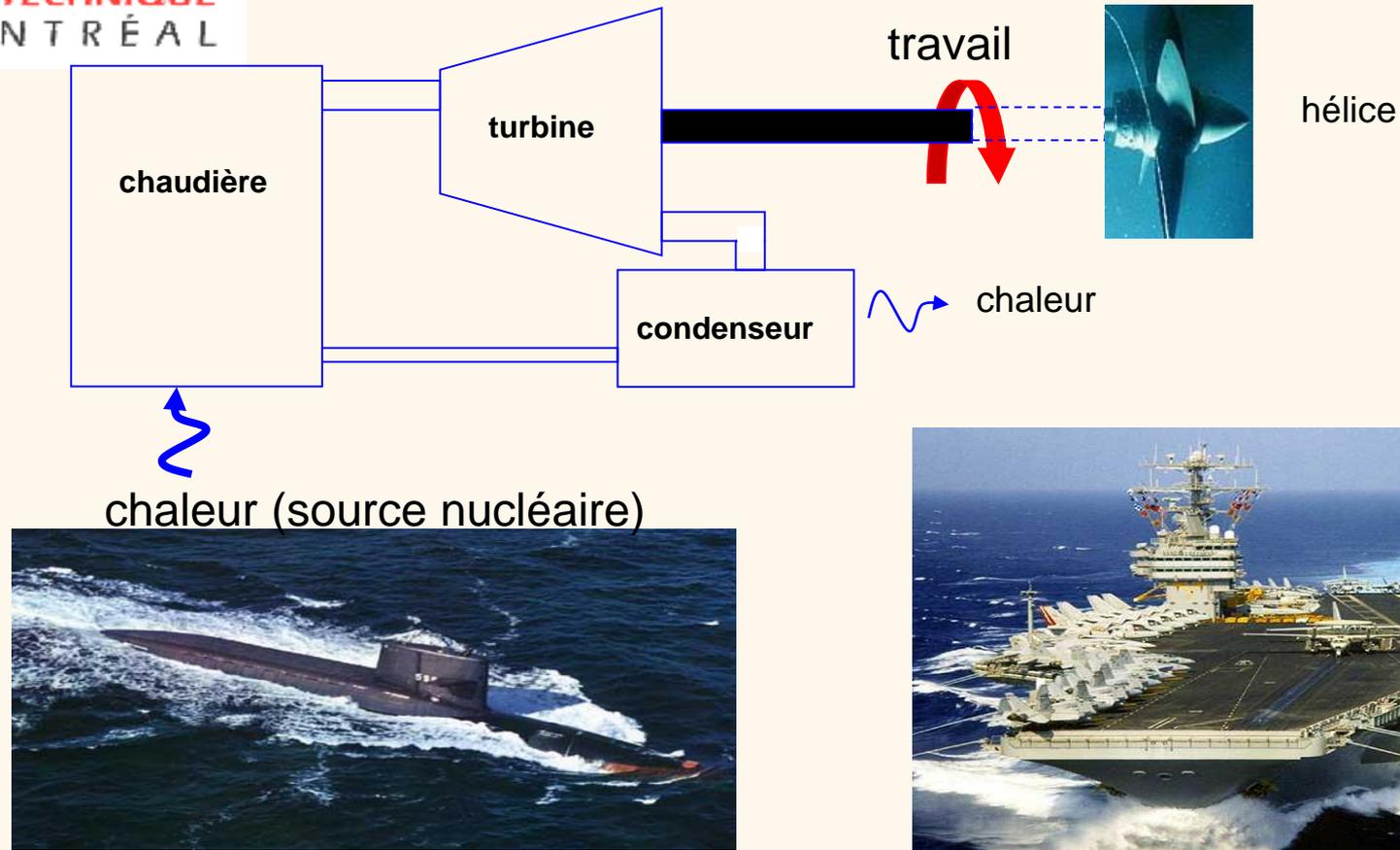
L'eau qui tombe sur le sommet de la roue à aubes la fait tourner, son énergie potentielle se transforme en énergie mécanique.

Exemple 6: Énergie potentielles vs énergie cinétique



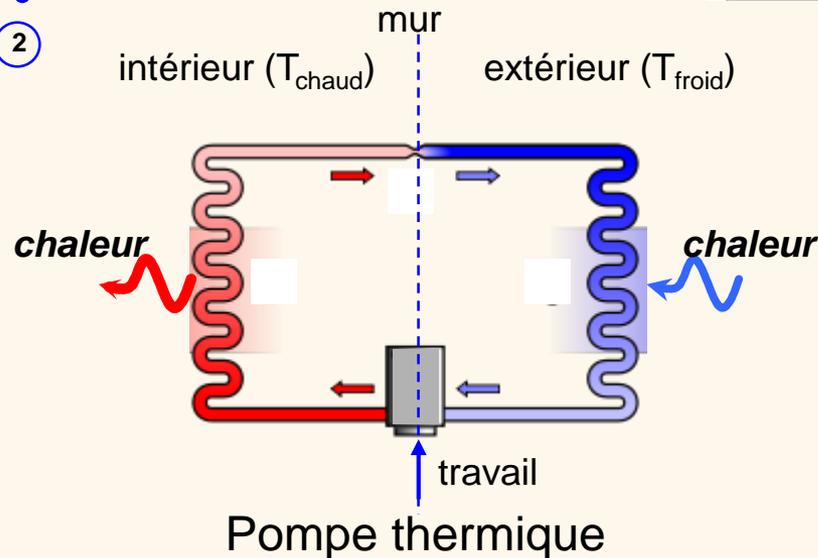
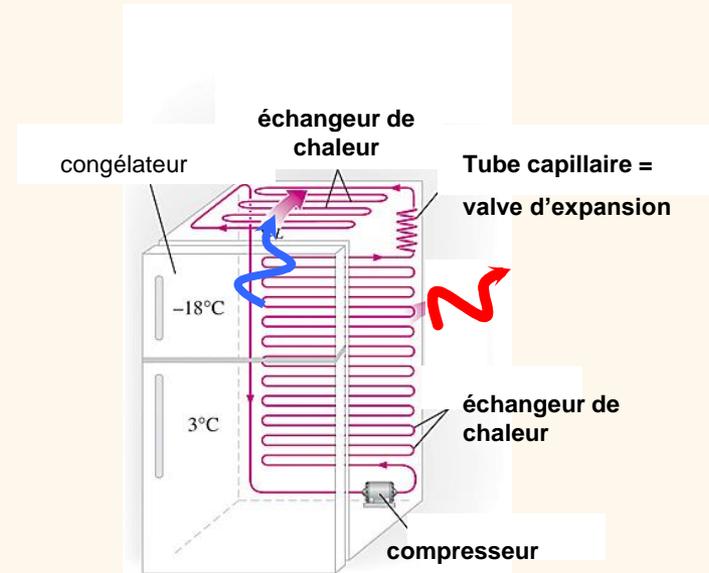
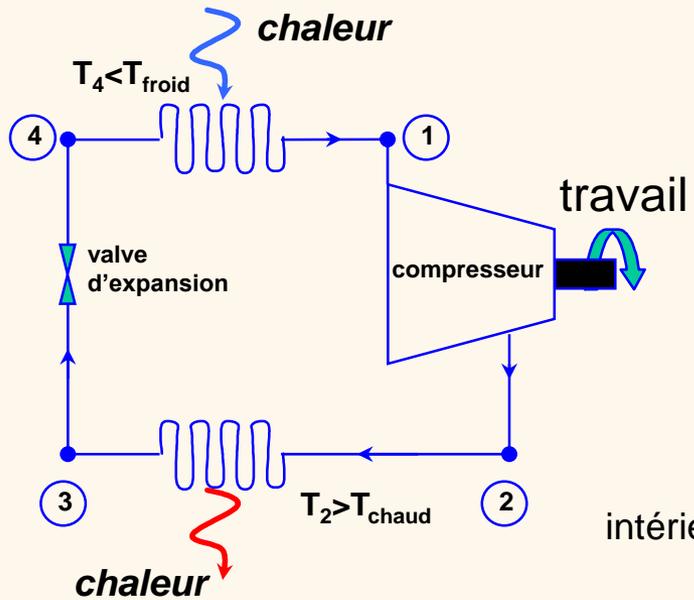
Au cours d'un plongeon, l'énergie potentielle du plongeur est convertie en énergie cinétique et finalement en chaleur.

Exemple 7: Propulsion navale nucléaire



*Les bâtiments à propulsion nucléaire utilisent un ou plusieurs réacteurs nucléaires. La chaleur produite est transmise à un fluide caloporteur utilisé pour générer de la vapeur d'eau actionnant :
des turbines couplées aux hélices de propulsion (propulsion à vapeur)*

Exemple 8: Réfrigérateur et pompe thermique



réfrigérateur

2.) Notions de base et définitions

OBJECTIFS

- Poser quelques définitions fondamentales
- Présenter quelques concepts fondamentaux
- Présenter une démarche de résolution de problèmes.

APPROCHES MICROSCOPIQUE ET MACROSCOPIQUE

L'approche macroscopique consiste en une description du comportement global d'un système.

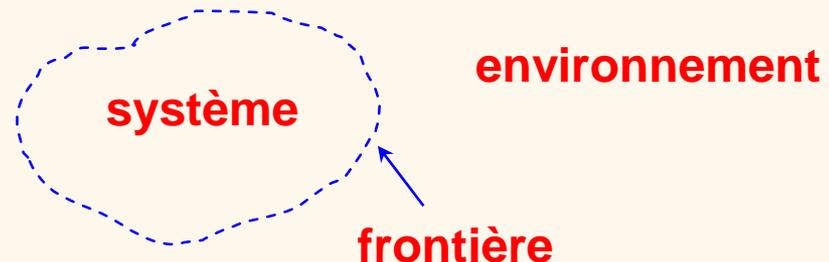
C'est la thermodynamique classique.

L'approche microscopique consiste en une étude du comportement moyen des particules afin d'obtenir des informations sur le comportement global du système.

C'est la thermodynamique statistique.

SYSTÈME THERMODYNAMIQUE

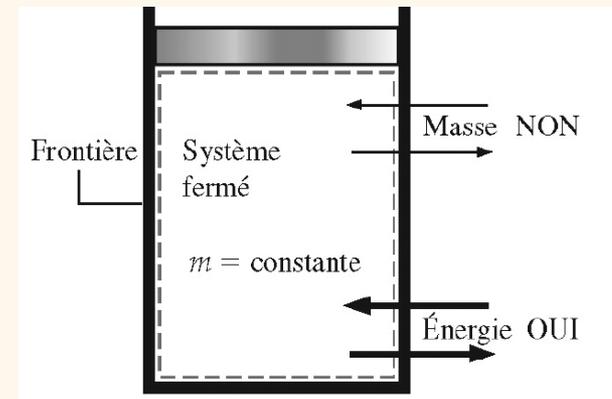
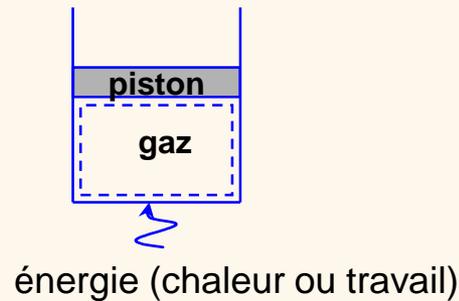
- Un système est une partie de L'univers qui fait l'objet de notre étude. Par exemple : une planète, une maison, un bateau,...etc.
- Un système est délimité par une frontière (réelle ou imaginaire, fixe ou imaginaire, fixe ou mobile).
- L'environnement est tout ce qui est à l' extérieur de la frontière d'un système donné.
- L'interaction entre un système et son environnement se fait à travers la frontière du système. Ainsi, celle-ci doit être clairement définie.



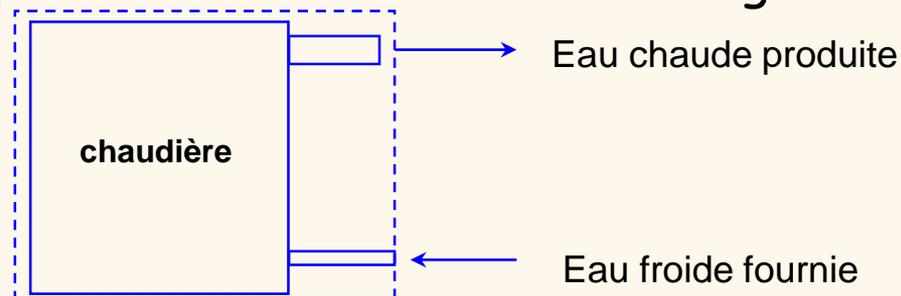
TYPES DE SYSTÈMES

2 types de systèmes thermodynamiques

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



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



VARIABLES THERMODYNAMIQUES « PROPRIÉTÉS »

- Une propriété est une quantité caractéristique du système. Par exemple : masse, volume, pression,...
- C'est une quantité qui est indépendante de l'évolution antérieure du système.
- Ainsi, le travail effectué ou le flux de chaleur à travers la frontière d'un système ne sont pas des propriétés.

VARIABLES THERMODYNAMIQUES

« PROPRIÉTÉS »

- ❑ Variables intensives: indépendantes de la masse (pression, température, masse volumique).
- ❑ Variables extensives: dépendantes de la masse (masse totale, volume, quantité de mouvement).
- ❑ Pour savoir si une propriété est intensive ou extensive, il suffit de diviser le système en deux, et voir si la valeur de cette valeur changera

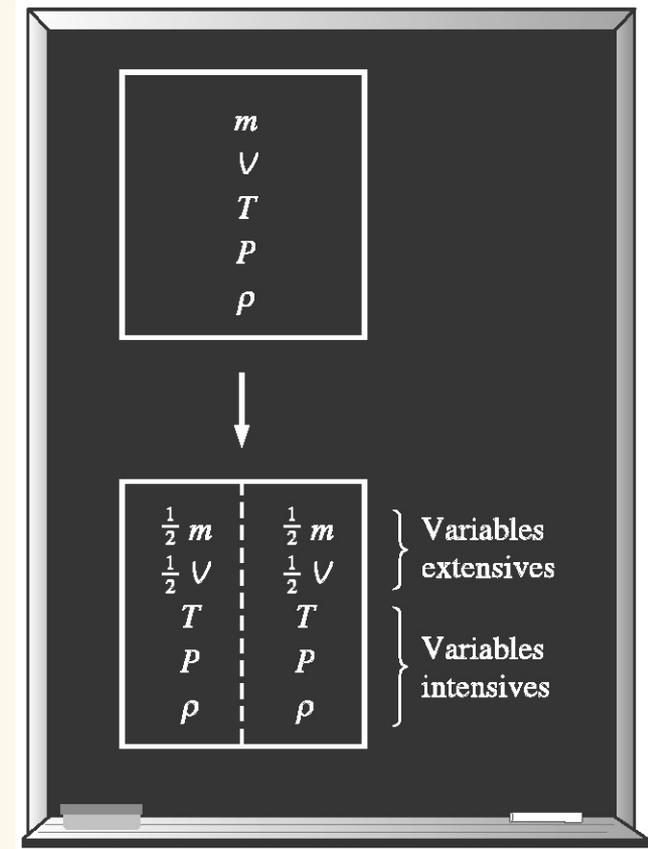


FIGURE 1.15
Différence entre les propriétés intensives et les propriétés extensives.

ÉVOLUTION

C'est une transformation faisant passer le système d'un état initial à un état final, ce qui implique le changement de la valeur d'au moins une propriété.

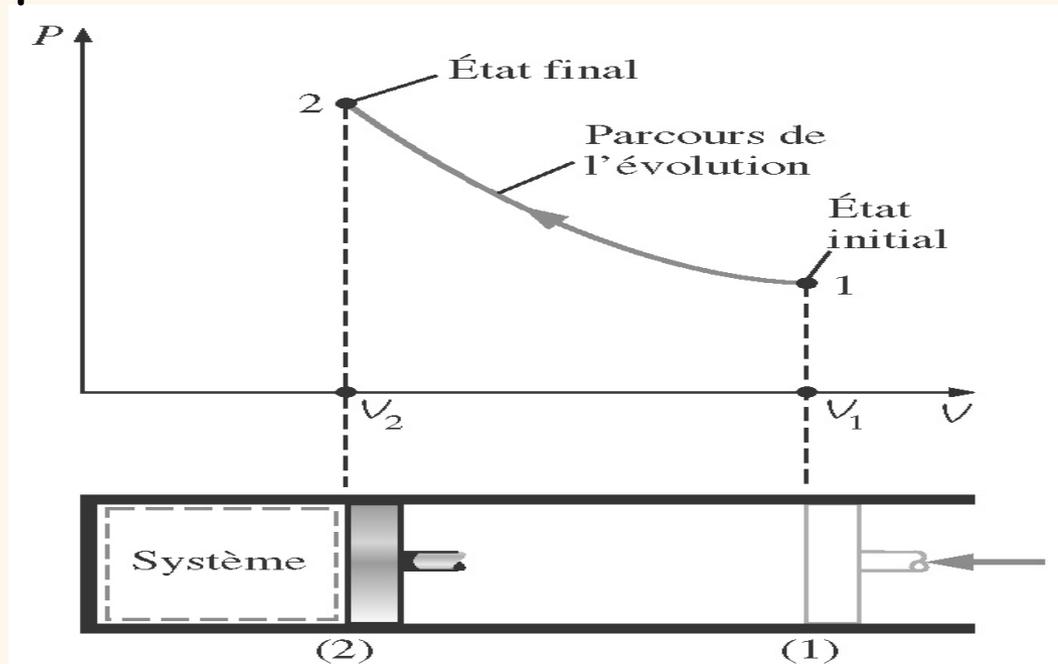


FIGURE 1.23

Évolution de compression dans un diagramme $P-V$.

ÉTAT

Substance peut exister dans des états différents définis par des variables macroscopiques observables: température, pression, densité.

ÉVOLUTION QUASI STATIQUE

Évolution au cours de laquelle la déviation de l'équilibre thermodynamique est infinitésimale.

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

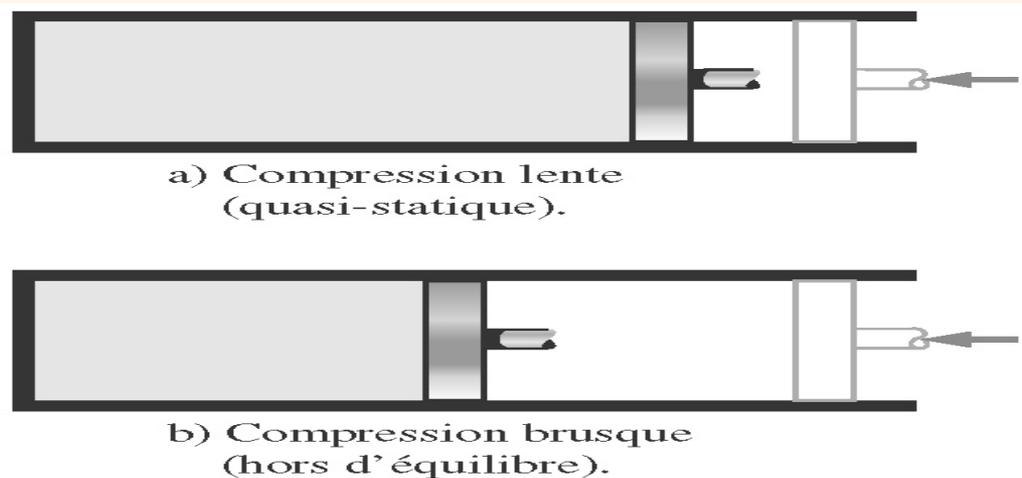
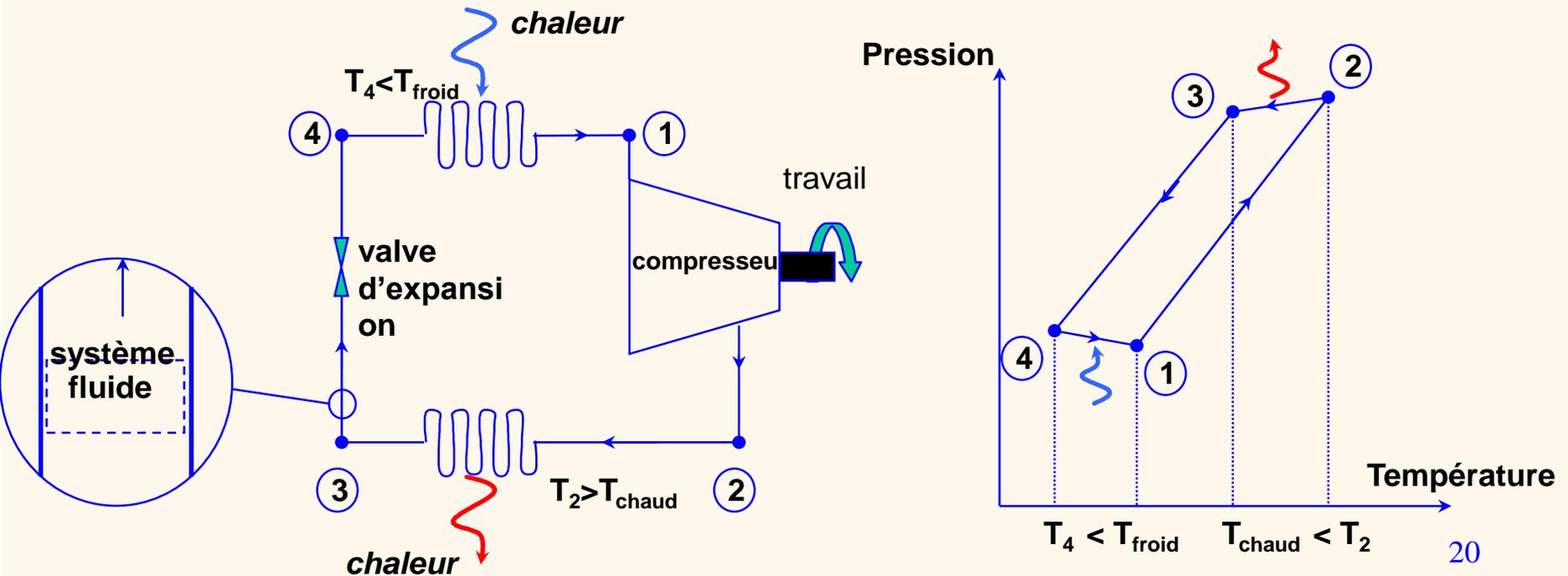


FIGURE 1.22

Évolution quasi statique et évolution hors d'équilibre.

CYCLE

Parcours décrit par un système passant par un certain nombre de changements d'état ou d'évolutions différentes et retournant finalement à son état initial.

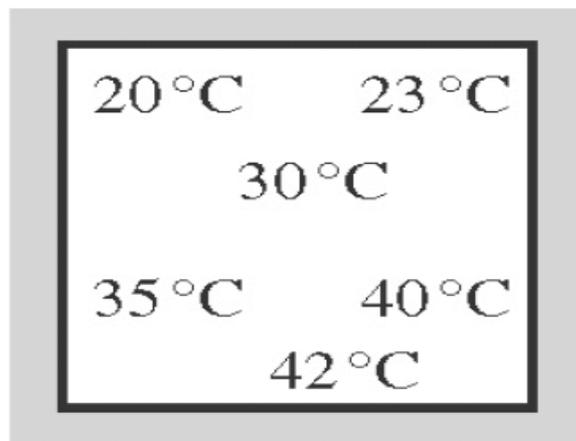


ÉQUILIBRE THERMODYNAMIQUE

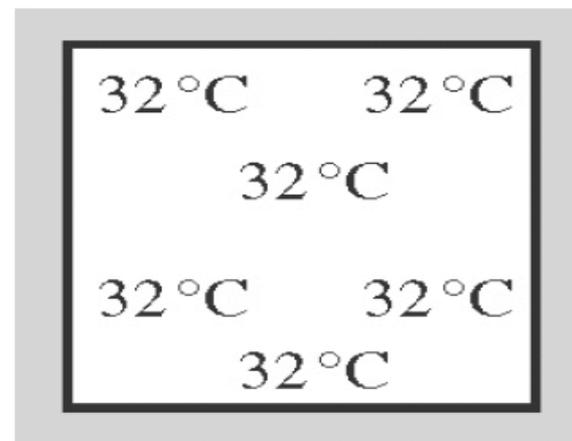
État stable où les propriétés du système ne changent pas avec le temps (Équilibre mécanique, chimique, thermique, électrique, nucléaire, etc.)

- Moteur d'une voiture roulant à vitesse constante sur autoroute.
- Café ou bière à la température de la pièce.
- Ordinateur fonctionnant en régime établi.

ÉQUILIBRE THERMODYNAMIQUE



a) Avant.



b) Après.

FIGURE 1.20

Systeme fermé atteignant l'équilibre thermique.

PHASE

C'est un état de la matière dont la composition chimique et la structure physique sont homogènes. Une substance peut se trouver dans une des trois phases : liquide, solide, gazeuse

SUBSTANCE PURE

- C'est une substance dont la composition chimique est uniforme et constante.
 - Elle peut exister en deux phases, mais qui doivent avoir la même composition. Par exemple, la vapeur d'eau et l'eau liquide.
 - Un mélange de gaz peut être considéré comme une substance pure si ses composantes ne produisent pas de réactions chimiques.
- exemples:**
- eau + vapeur d'eau + glace → substance pure
 - air liquide + air gazeux (compositions chimiques différentes) → pas une substance pure

SYSTÈME D'UNITÉS

i) Système International d'Unités (SI):

- **Unités primaires:** unités pour mesurer des quantités fondamentales:
 - masse, **Kg**
 - longueur, **M**
 - temps, **S**
 - température, **K**
 - courant électrique, **A**
 - luminosité, candela (**cd**)
 - quantité de matière, mole (**mol**)

- **Unités secondaires:** unités pour mesurer des quantités dérivées:
 - volume
 - vitesse
 - force,
 - énergie,
 - 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 d'origine britannique, utilisé 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

-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 $1^{\circ}F$.

Attention à l'homogénéité des unités!

MASSE VOLUMIQUE ET VOLUME MASSIQUE

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

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

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

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

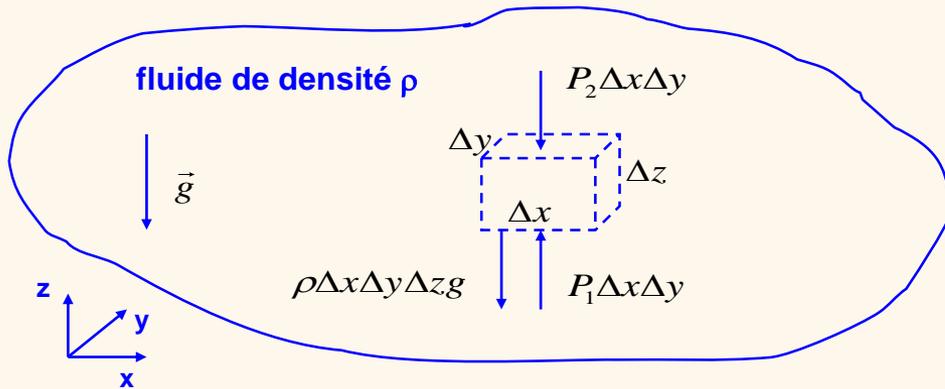
$$\rho = \frac{M}{V}$$

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

SI *EES*

PRESSION

i) Variation de la pression dans un champ de gravité
force par unité d'aire exercée par un fluide sur une surface, normale (perpendiculaire) à la surface



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

$$\frac{P_2 - P_1}{\Delta z} \equiv \frac{\Delta P}{\Delta z} = -\rho g \quad \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta z} = -\rho g \Rightarrow \frac{dP}{dz} = -\rho g$$

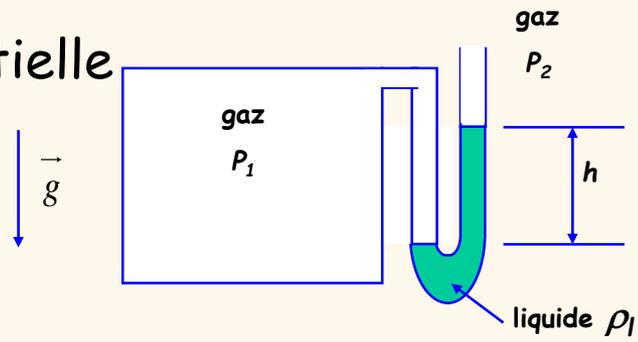
Si $\rho = \text{cste}$

$$\int_{P_{ref}}^P dP = -\rho g \int_{z_{ref}}^z dz \Rightarrow P = P_{ref} + \rho g h \quad \text{où} \quad h \equiv z_{ref} - z$$

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

ii) Instruments de mesure de pression

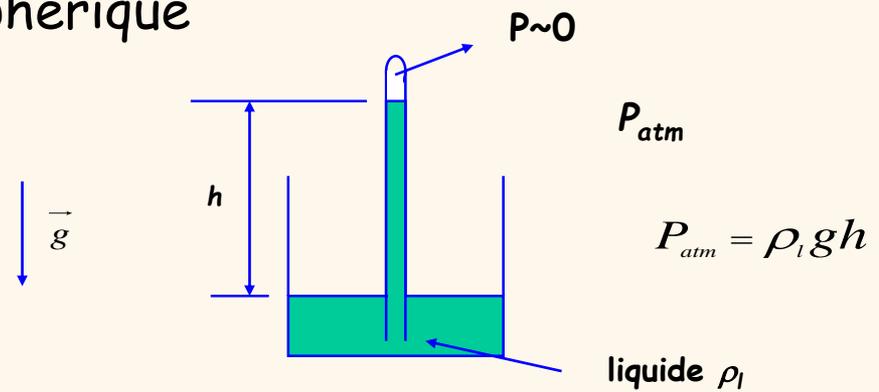
- manomètre: pression différentielle



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

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

- baromètre: pression atmosphérique



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

-unité:

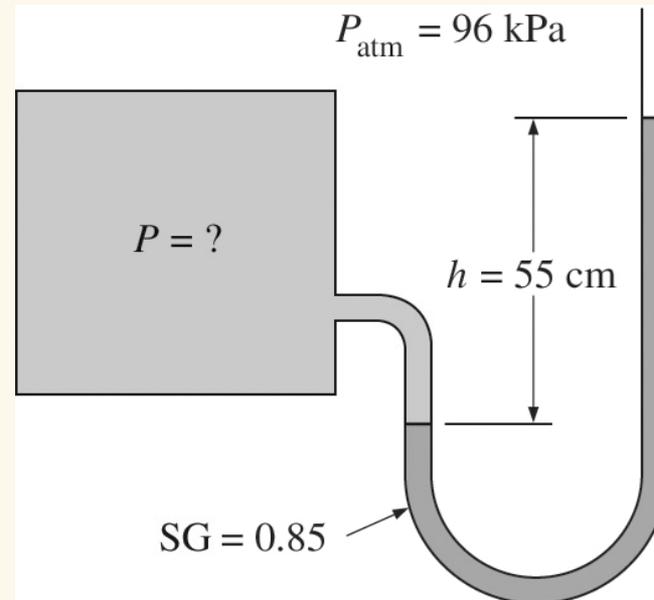
- Le pascal (Pa)
- 1Pa=1N/m²
- 1bar=10⁵Pa=10²kPa=0.1MPa
- 1atm=101.325kPa

PRESSION

Exemple

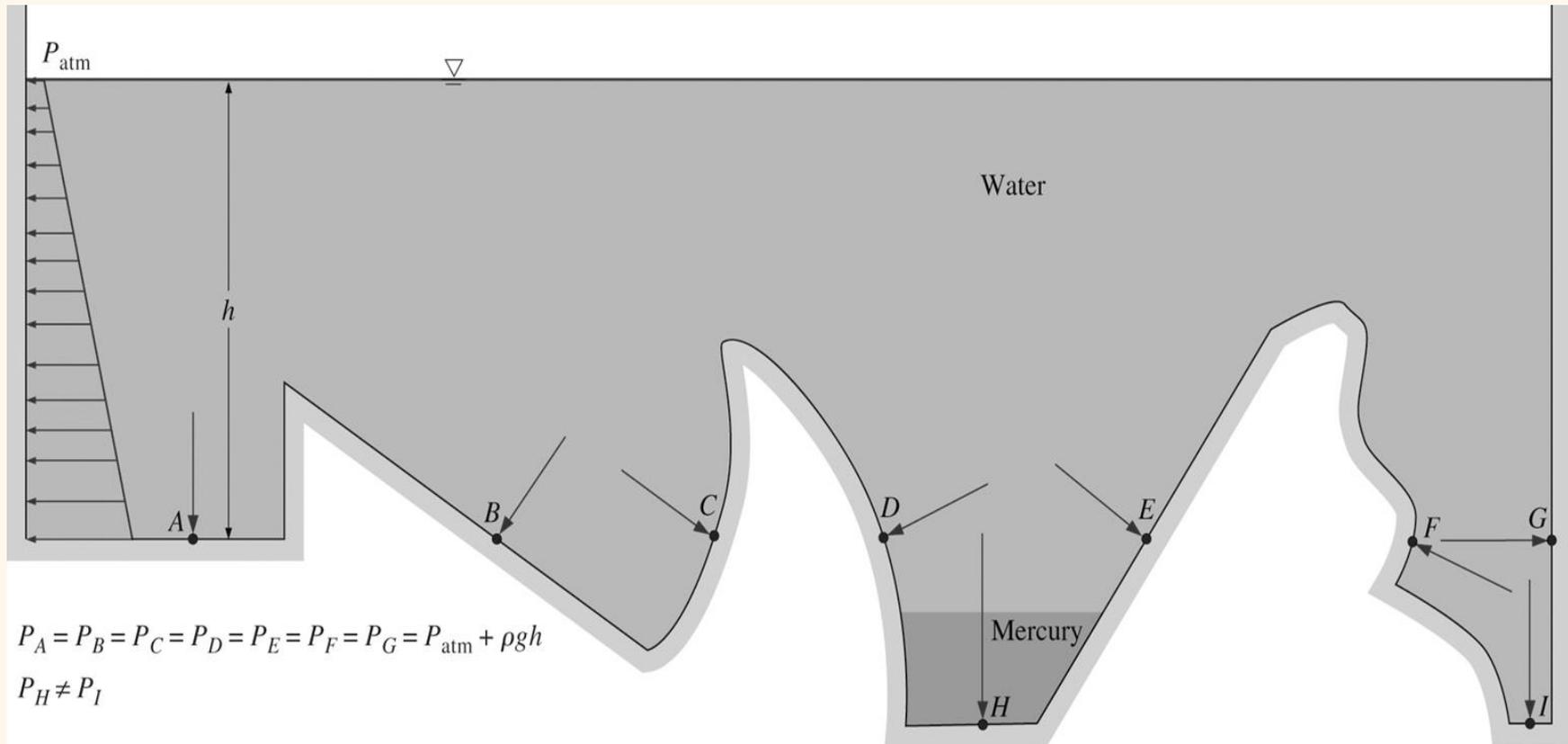
Un manomètre est utilisé pour mesurer la pression dans un réservoir. Le manomètre contient un fluide dont la masse volumique relative est de 0.850, la hauteur h de la colonne est de 55cm et la pression atmosphérique, de 96kpa. Quelle est la pression absolue dans le réservoir?

Rep: 100.6 kPa



PRESSION

La pression dans un plan horizontal demeure inchangée quelque soit la géométrie, à condition que le liquide qui est au dessus est le même

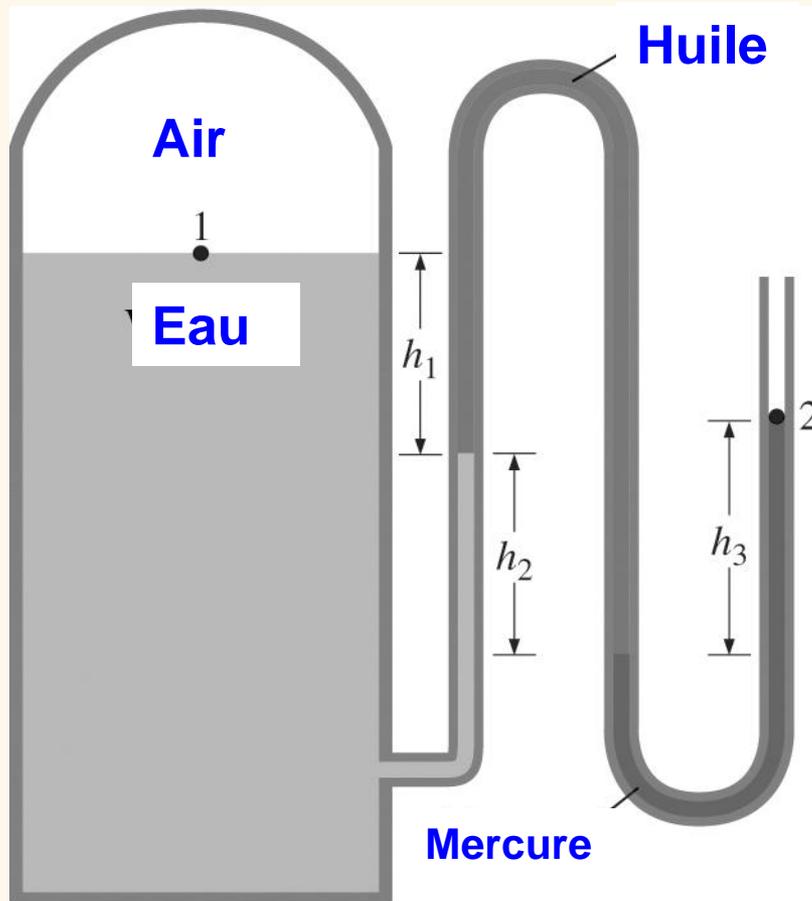


Ref: Livre Cengel et Boles

PRESSION

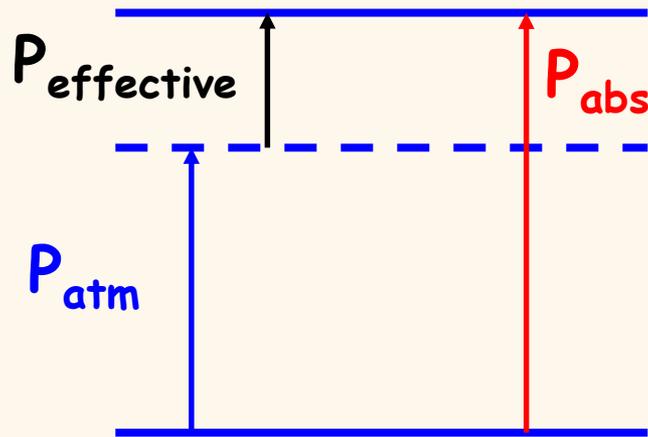
Exercice

Montrer que : $P_1 = P_{atm} - \rho_{eau} gh_1 - \rho_{huile} gh_2 + \rho_{mercure} gh_3$



Ref: Livre Cengel et Boles

PRESSION



$$P_{abs} = P_{atm} + P_{effective}$$

Vide absolue

Pression absolue = pression atmosphérique + pression effective

Lorsque la pression est inférieure à la pression atmosphérique on parle alors de dépression P_{vide}

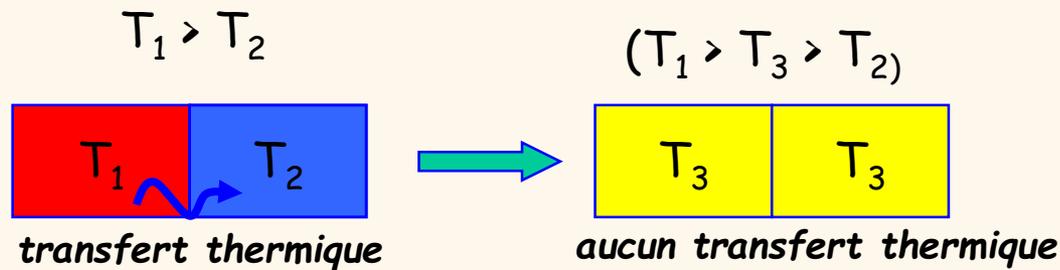
$$P_{vide} = P_{atm} - P_{abs}$$

Exemple

La lecture de la jauge à vide d'un réservoir indique une dépression de 40kPa. La pression atmosphérique est autour de 101kPa. Quelle est la pression absolue du réservoir? **Rep. 61kPa**

TEMPÉRATURE

□ Deux systèmes ont atteint l'équilibre thermique quand il n'y a plus de transfert de chaleur entre eux. Dans ce cas, ils se trouvent à la même température.

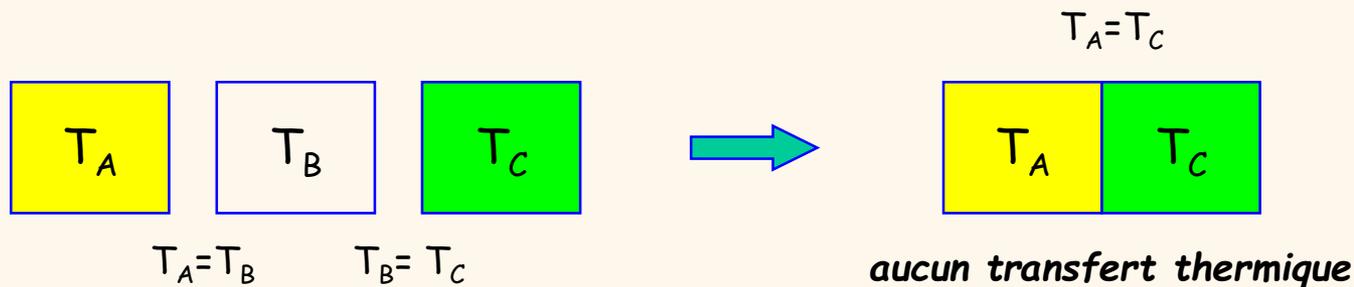


□ La température est une mesure de l'énergie potentielle thermique.

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

Si deux corps se trouvent à la même température qu'un troisième corps, ils sont eux aussi à la même température



ii) Échelles de température

□ $T(K) = T(^{\circ}C) + 273$ (Kelvin)

□ $T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + 460$ (Rankine)

iii) Instruments de mesure

□ thermomètre à gaz: 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 RÉOLUTION 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

LECTURE SECTION DU LIVRE

Section 1.1, 1.2 à 1.12 du livre, «THERMODYNAMIQUE, une approche pragmatique», Y.A. Çengel, M.A. Boles et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2ed 2014.