

## 2.5 Thermodynamique

### 2.5.1 Introduction et notions fondamentales

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

*Stéphane Hallé, M.Sc.A., Ph.D.*

*Patrick Belzile, ing., M.ing.*

*Pierre-Luc Paradis, M.ing.*

*Mathieu Patin, M.ing.*

# Question



ENR2020

- Comment nomme-t-on l'énergie à apporter pour changer d'état ?
  - A. Sensible
  - B. Nucléaire
  - C. Latente
  - D. Interne
  - E. Aucune de ces réponses

# Question



ENR2020

- Comment nomme-t-on l'énergie à apporter pour changer d'état ?
  - C. Latente

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Notions fondamentales

# Plan de la présentation

- *Introduction et objectifs de la capsule*
- Notions fondamentales

**Note:** Il est strictement impossible de faire un résumé exhaustif de toutes les notions de thermodynamique requises pour soutenir la conception de plus de 50% des procédés, systèmes et équipements impliqués dans la production d'énergie renouvelable.

# Introduction et objectifs

- Qu'est-ce que la thermodynamique ?
  - *Therme*: chaleur
  - *Dynamis*: puissance
  - Science de l'énergie
  - Fondée sur l'observation expérimentale (Lois de la thermodynamique)

# Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
  - Appréhender les notions fondamentales de thermodynamique;
  - Comprendre les lois qui régissent l'évolution d'un système;
  - Connaître les cycles thermodynamiques les plus utilisés pour les énergies renouvelables.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Notions fondamentales***
- Lois de la thermodynamique
- Notion d'efficacité
- Les cycles thermodynamiques
- Exergie
- Conclusion

# Notions fondamentales

## Énergie macroscopique

- Énergie potentielle (gravité)

$$PE = mgz$$

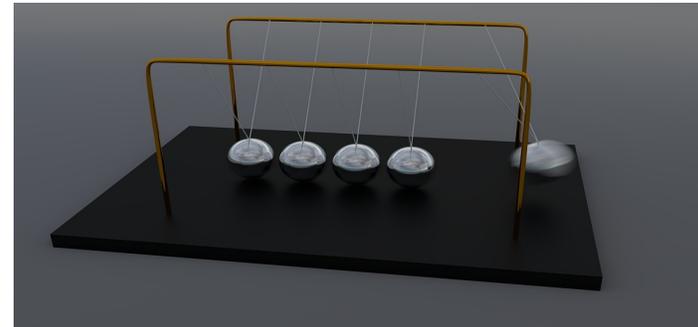
- m: masse [kg]
- g: constante gravitationnelle = 9,81 [m/s<sup>2</sup>]
- z: hauteur [m]
- PE [J]



- Énergie cinétique

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

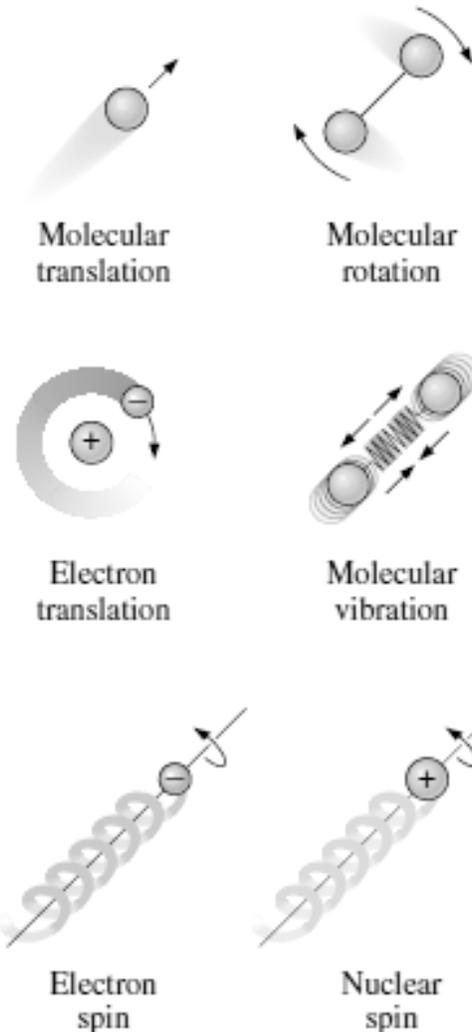
- m: masse [kg]
- v: vitesse [m/s]
- KE [J]



# Notions fondamentales

## Énergie interne (U)

- Chimique
  - Cohésion entre noyau et électron
- Nucléaire
  - Cohésion du noyau
- Travail (W)
- Thermique (Q)
  - Sensible (changement de température)
  - Latente (changement de phase)



# Notions fondamentales

## Énergie interne (U)

- Énergie sensible

$$\Delta Q_s = m c (T_2 - T_1)$$

- $m$ : Masse [kg]
- $T$ : Température [K]
- $c$ : Capacité thermique massique [J/(kg.K)]
- $Q_s$ : Énergie sensible [J]

= Capacité thermique massique isobare ( $c_p$ )

Si évolution à pression constante  
(Chaleur spécifique à pression constante)

= Capacité thermique massique isochore ( $c_v$ )

Si évolution à volume constante  
(Chaleur spécifique à volume constant)

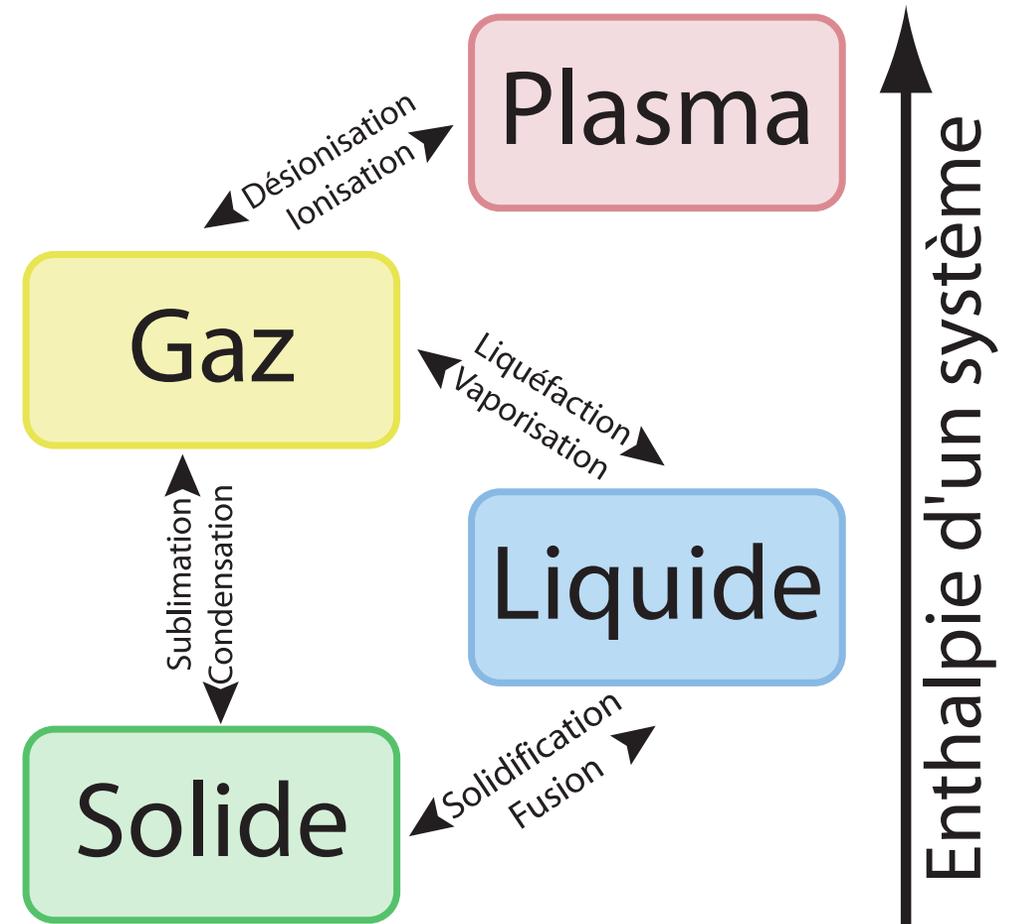
# Notions fondamentales

## Énergie interne (U)

- Énergie latente

$$\Delta Q_l = m L_{1 \rightarrow 2}$$

- $m$ : Masse [kg]
- $L_{1 \rightarrow 2}$ : Chaleur latente de changement d'un état 1 vers un état 2 =  $-L_{2 \rightarrow 1}$  [J/kg]
- $Q_l$ : Énergie latente [J]



# Notions fondamentales

## Énergie interne (U)

- Énergie latente à pression atmosphérique (eau)
  - Fusion 333,7 kJ/kg
  - Vaporisation 2257,1 kJ/kg
- On a donc avantage, lorsque c'est possible, à utiliser un changement de phase liquide-gaz (vapeur) plutôt que solide-liquide (glace).

# Notions fondamentales

Saturation (boiling) pressure of water at various temperatures

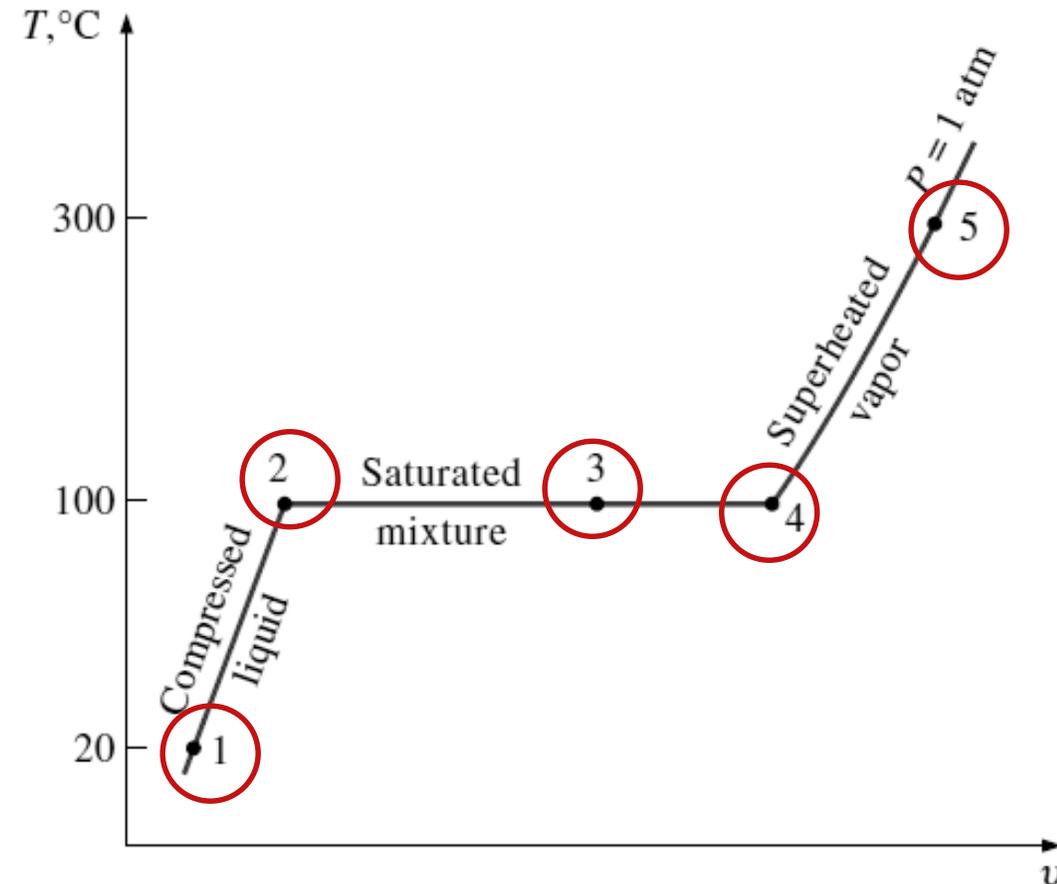
## Énergie interne (U)

- L'eau bout-elle toujours à 100°C ?
  - Ça dépend de la pression!

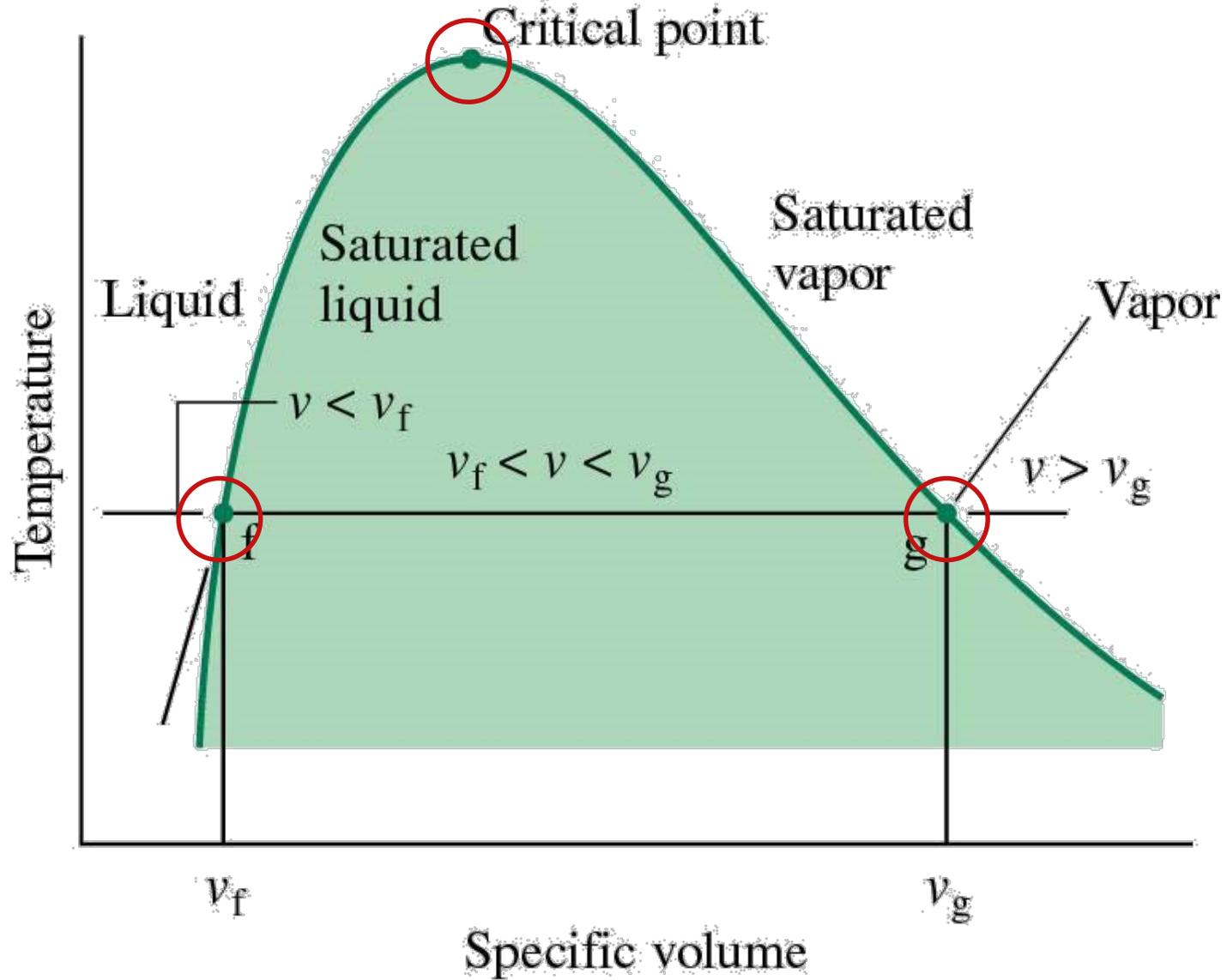
Temperature, $T, ^\circ\text{C}$	Saturation pressure, $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$
-10	0.26
-5	0.40
0	0.61
5	0.87
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1554
250	3973
300	8581

# Notions fondamentales

- Changement de phase
  1. Liquide comprimé
  2. Liquide saturé
  3. Mélange saturé (coexistence liquide et gaz)
  4. Vapeur saturée
  5. Vapeur surchauffée



# Notions fondamentales



# Notions fondamentales

- Indice f pour liquide saturé
- Indice g pour vapeur saturée
- $v_f$  = Volume massique du liquide saturé
- $v_g$  = Volume massique de la vapeur saturée

$$v_{fg} = v_g - v_f$$

- $x$  = Titre en vapeur

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$$

Sat. Temp. °C $T$		Specific volume $m^3/kg$	
		Sat. liquid $v_f$	Sat. vapor $v_g$
85	57.83	0.001 033	2.828
90	70.14	0.001 036	2.361
95	84.55	0.001 040	1.982

# Notions fondamentales

- Tables de thermodynamique
- Interpolation linéaire

Pression de vapeur de l'eau	
T	P
150 °C	476,0 kPa
160 °C	618,1 kPa

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

Si  $T = 158$  [°C]

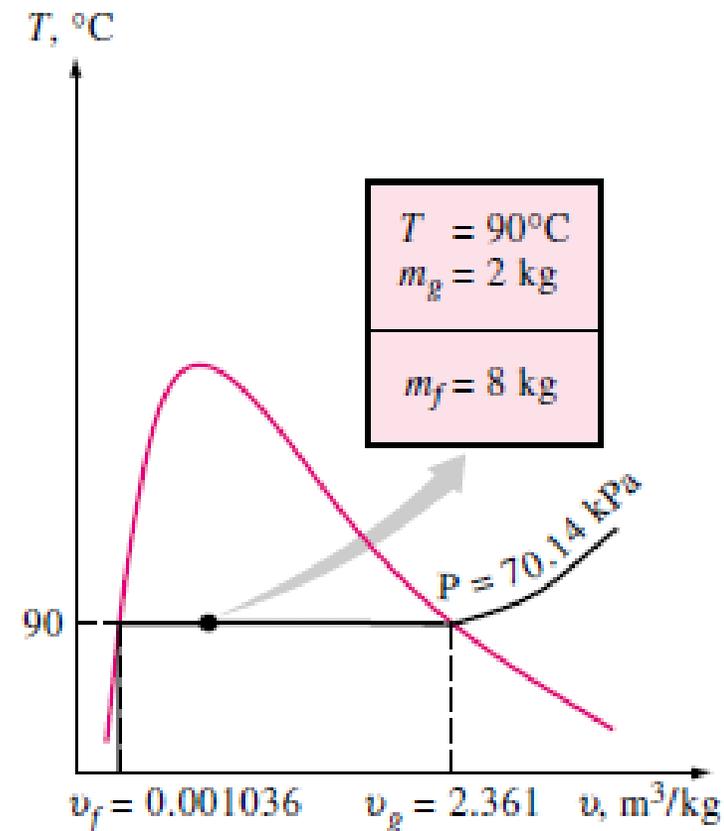
$P = ?$  [kPa]

# Notions fondamentales

- Un réservoir contient 10 kg d'eau à 90°C. Si 8 kg d'eau sont sous forme liquide et le reste sous forme de vapeur, déterminez:

- a) La pression dans le réservoir
- b) Le volume du réservoir
- c) L'enthalpie du mélange

$$v_{moyen} = v_f + xv_g$$



# Notions fondamentales

## Enthalpie

- Association de l'énergie interne et des forces de pression

$$H = U + PV$$

- $U$  : Energie interne [J]
  - $P$  : pression [Pa]
  - $V$  : Volume [m<sup>3</sup>]
  - $H$  enthalpie [J],  $h$  enthalpie massique [J/kg]
- Représente l'énergie totale d'un système thermodynamique

\*\*En thermodynamique, on utilise des lettres minuscules pour des variables indépendantes de la masse (par unité de masse (kg))\*\*

# Notions fondamentales

## Loi des gaz parfaits

- Loi régissant le comportement d'un gaz idéal

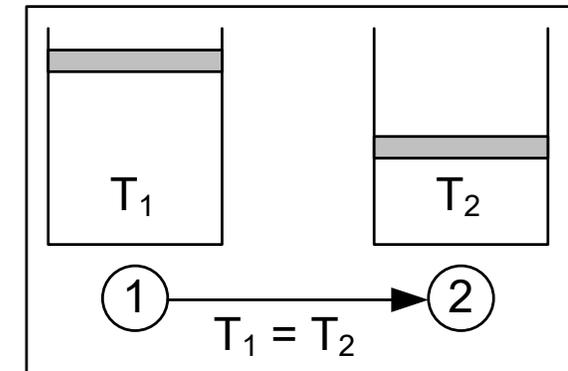
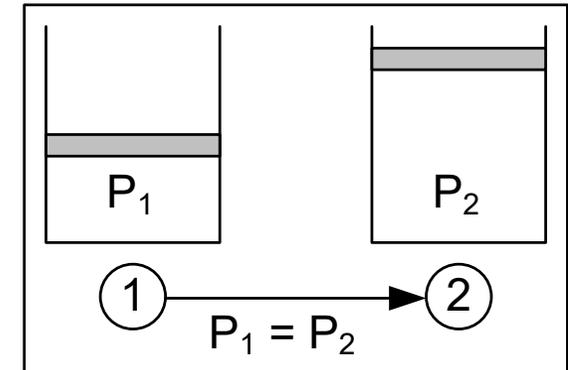
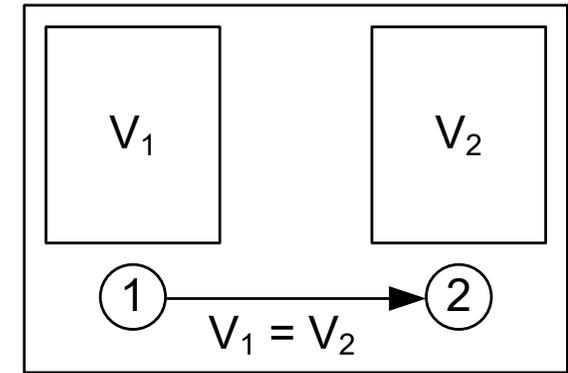
$$PV = nRT$$

- $P$  : pression [Pa]
- $V$  : volume [ $\text{m}^3$ ]
- $n$  : quantité de matière [mol]
- $R$  : constante universelle des gaz parfaits = 8,314 J/K.mol
- $T$  : température [K]

# Notions fondamentales

## Évolutions particulières

- Évolution ISOCHORE (à volume constant)
- Évolution ISOBARE (à pression constante)
- Évolution ISOTHERME (à température constante)



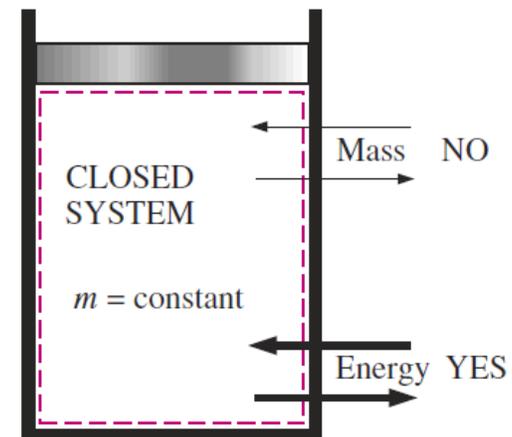
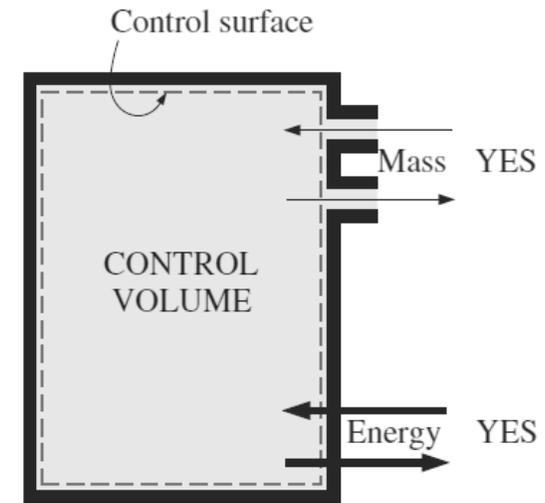
# Exemple 1– Système fermé

Un élément électrique de 2 kW plongé dans 5 kg d'eau fonctionne durant 10 min. Pendant ce temps, 300 kJ de chaleur sont perdus de l'eau au profit du milieu extérieur. De combien de degrés la température de l'eau augmentera-t-elle (utilisez  $c_p = 4,18 \text{ KJ/kgK}$ )?

- a) 0,4°C
- b) 43,1°C
- c) 57,4°C
- d) 71,8°C
- e) 180,0°C

# Notions fondamentales

- Systèmes ouverts
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- Systèmes fermés
  - pas de transfert de masse!





**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

