

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)

$$PE = mgz$$

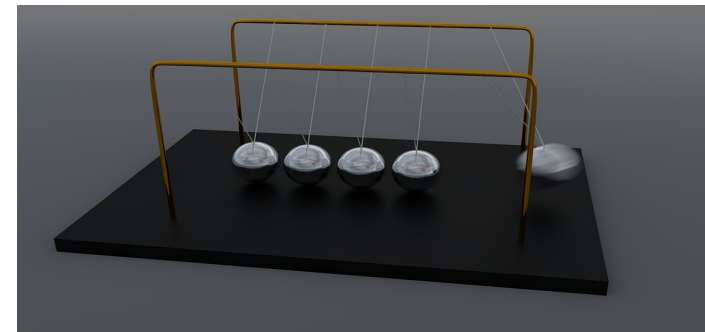
- m: masse [kg]
- g: constante gravitationnelle = 9,81 [m/s²]
- z: hauteur [m]
- PE [J]



- Énergie cinétique

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

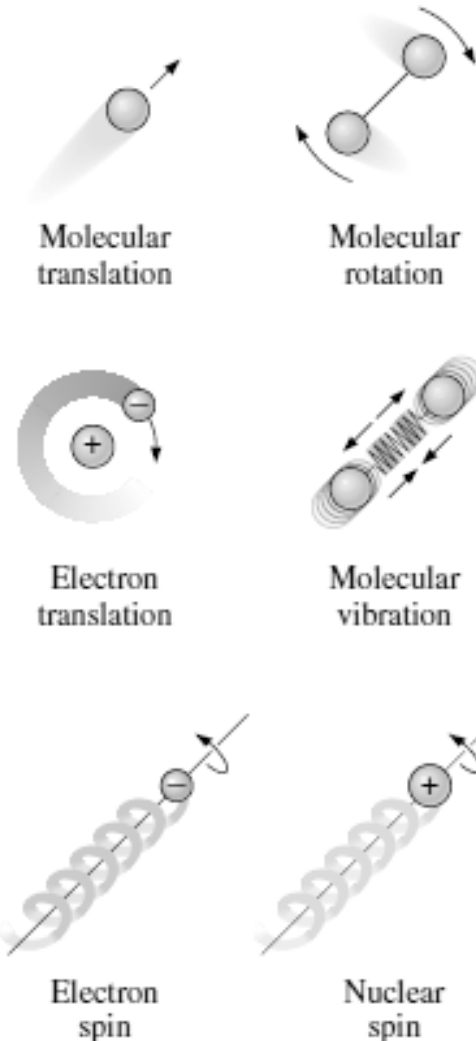
- m: masse [kg]
- v: vitesse [m/s]
- KE [J]



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)

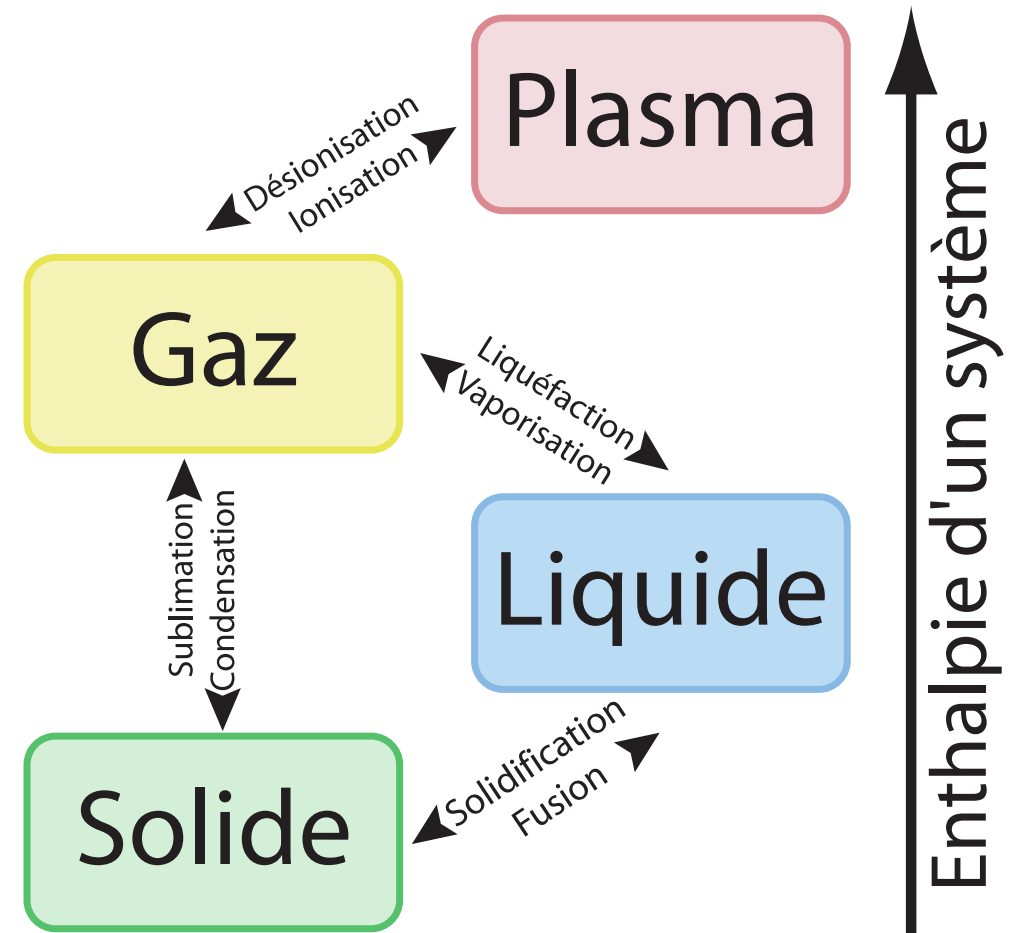
Notions fondamentales

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

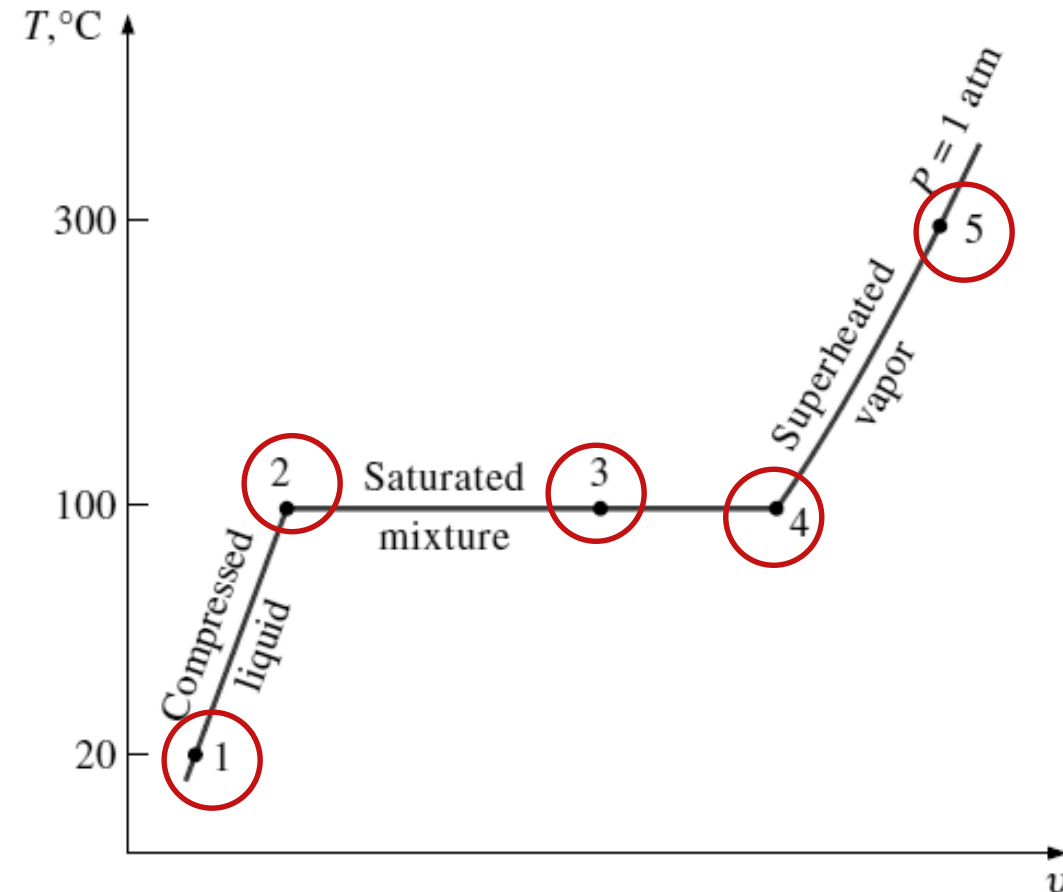
Énergie interne (U)

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

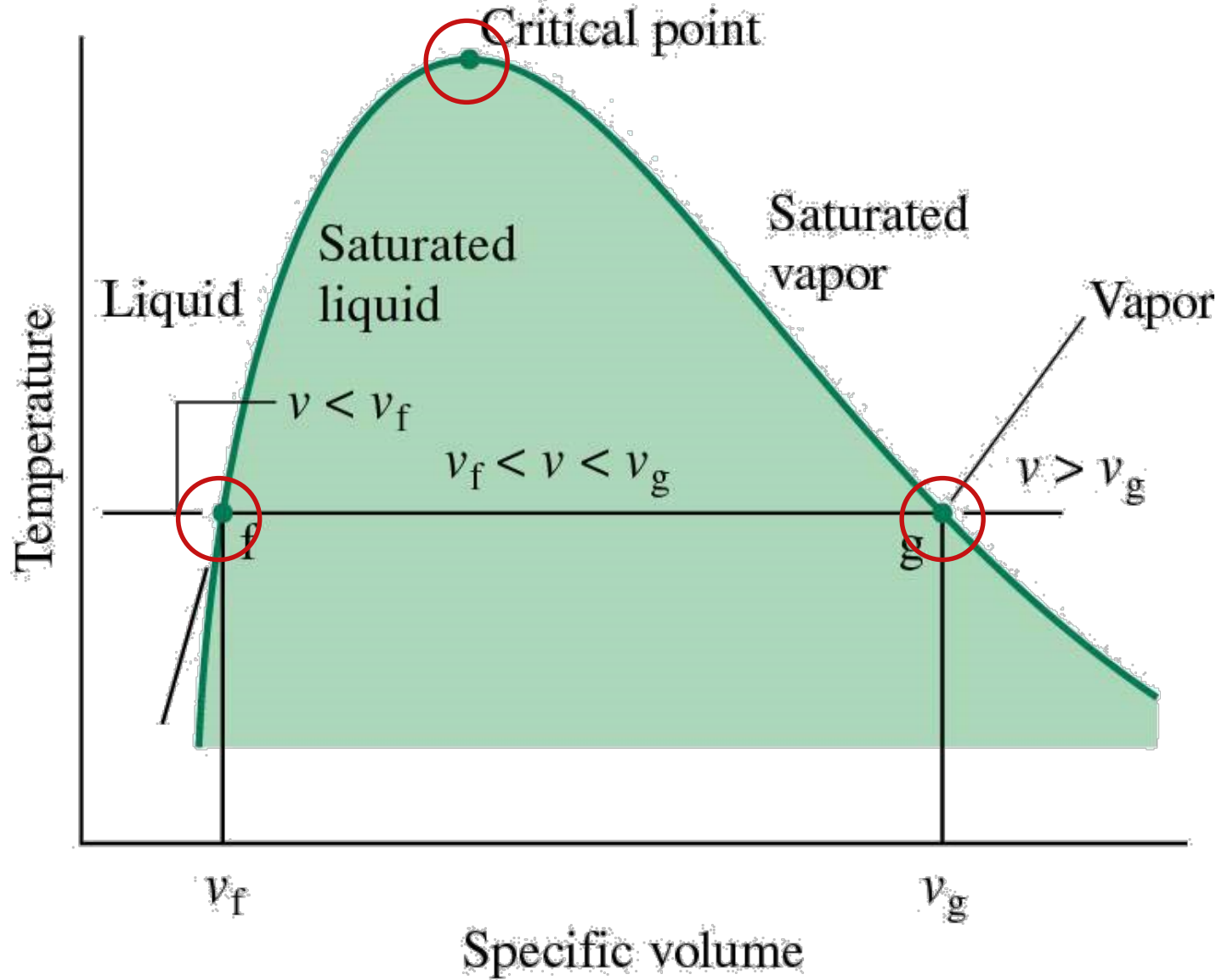
Temperature, $T, ^\circ\text{C}$	Saturation pressure, $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$
-10	0.26
-5	0.40
0	0.61
5	0.87
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1554
250	3973
300	8581

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. press °C kPa T P_{sat}		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

↑ Specific temperature
↑ Specific volume of saturated liquid
↑ Specific volume of saturated vapor

Corresponding saturation pressure
Specific volume of saturated vapor

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]

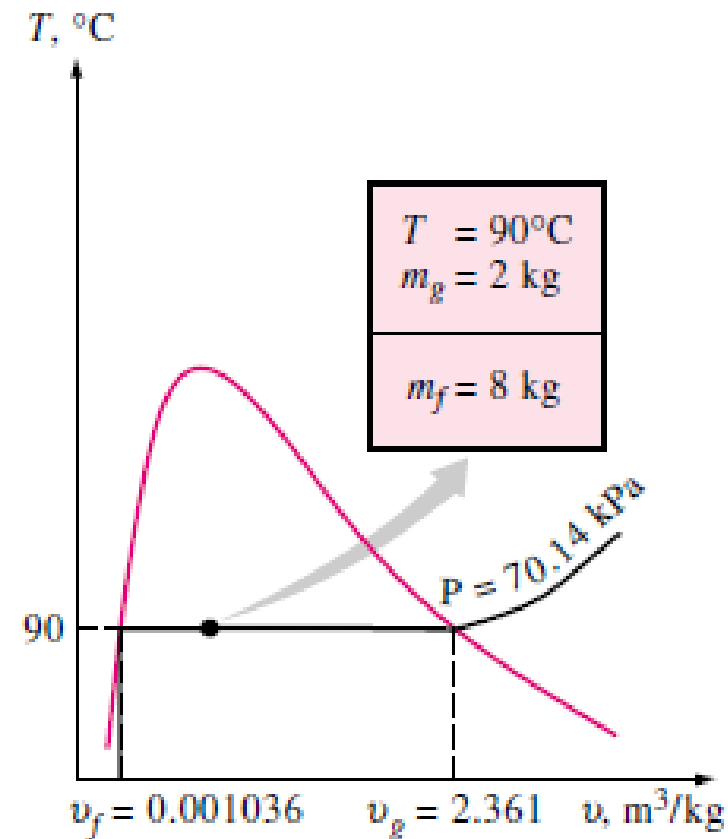
$P = ?$ [kPa]

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 [m³]
 - 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

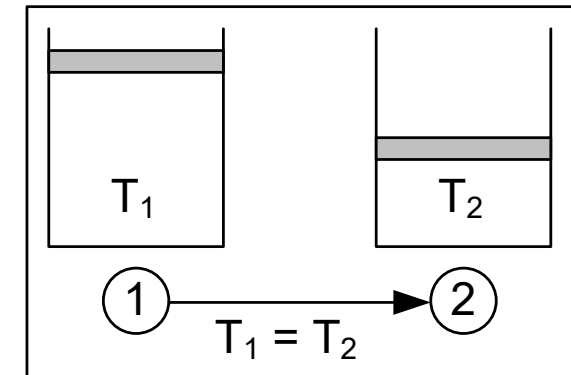
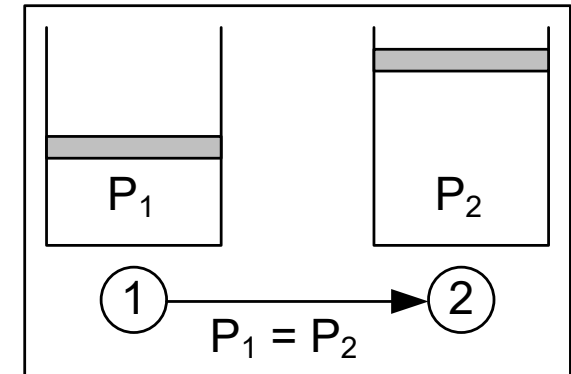
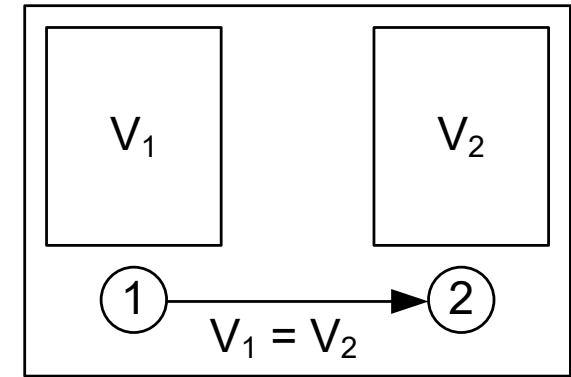
$$PV = nRT$$

- P : pression [Pa]
- V : volume [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

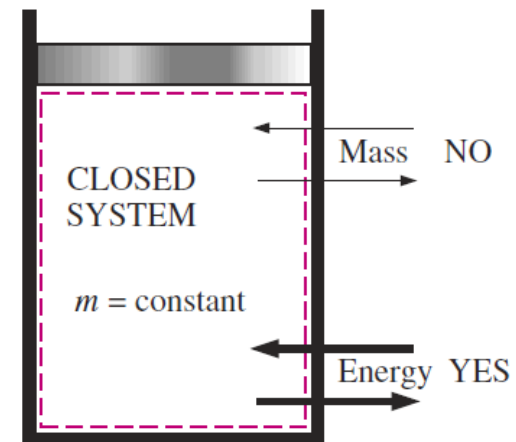
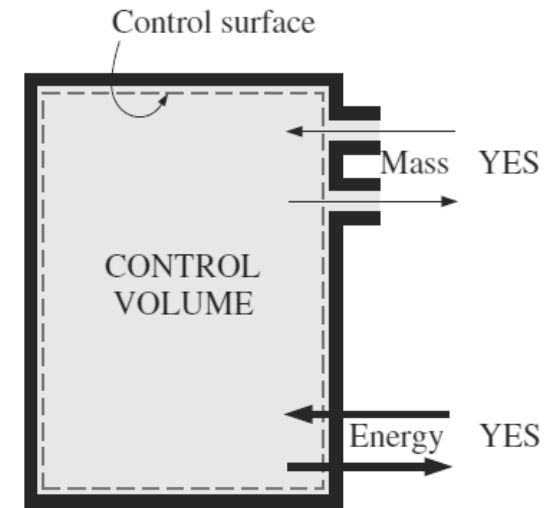
Un élément électrique de 2 kW plongé dans 5 kg d'eau fonctionne durant 10 min. Pendant ce temps, 300 kJ de chaleur sont perdus de l'eau au profit du milieu extérieur. De combien de degrés la température de l'eau augmentera-t-elle (utilisez $c_p = 4,18 \text{ KJ/kgK}$)?

- 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

