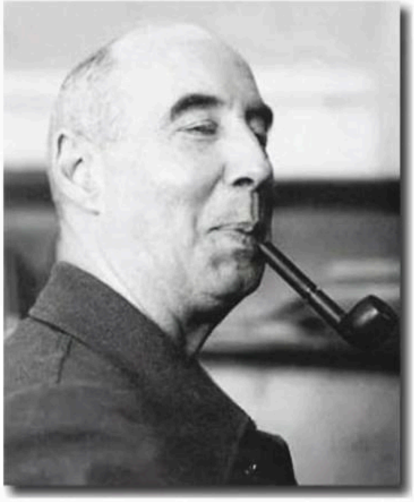
ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

RESCIF
Réseau d'excellence des sciences de l'ingénieur de la Francophonie

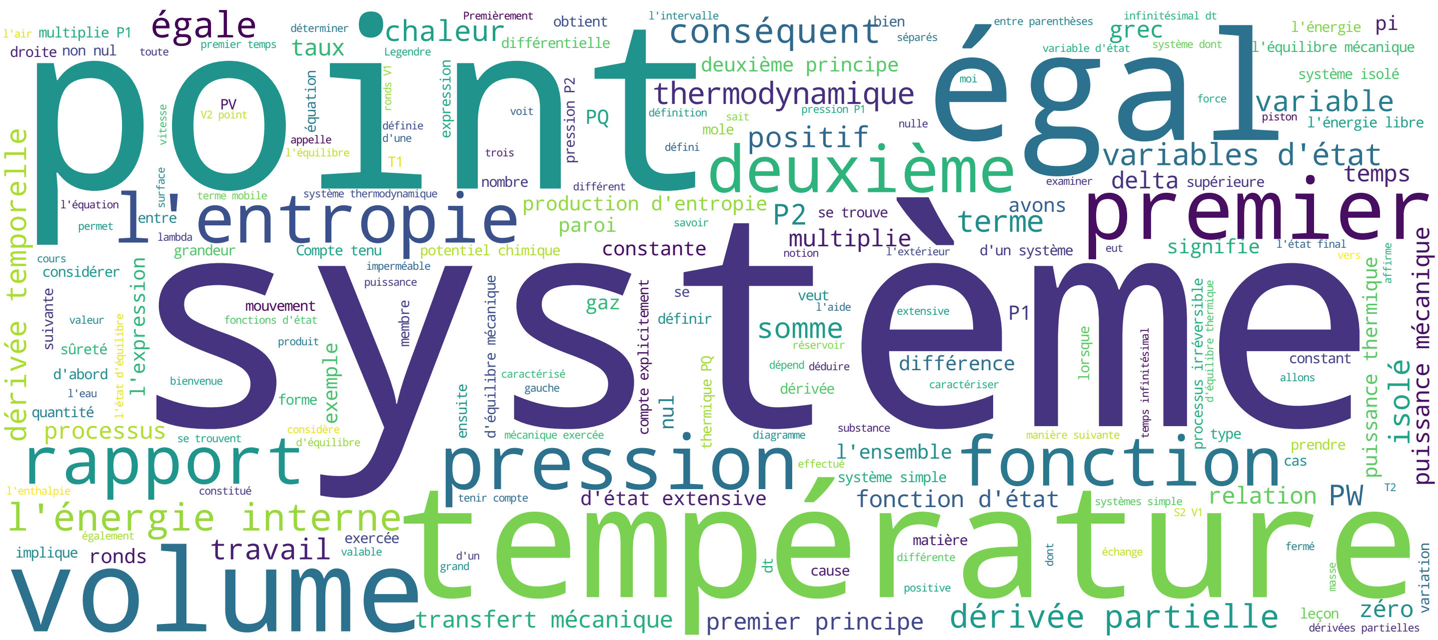
Thermodynamique

Equilibre mécanique et transfert mécanique

Dr. Sylvain Bréchet



Ernst Carl Gerlach Stückelberg, 1905 - 1984



Search MOOC

Video

EPFL

Bonjour et bienvenue a se moque de thermodynamique. Cette leçon est consacrée à l'équilibre mécanique et aux transferts mécaniques. Pour ce faire, on va considérer un système isolé qui est constitué de deux sous systèmes simples qui sont séparés par une paroi dit à terme mobile et imperméable. Dans un premier temps, on va établir la condition d'équilibre mécanique et dans un deuxième temps, on va examiner le transfert mécanique.

Notes

Summary

0m 05s

Paroi diatherme mobile et imperméable

- **Système isolé :** $P_Q = P_W = 0$
- **Sous-systèmes simples (1) et (2)**
- **Variables d'état extensives :**
  - Entropies S_1 et S_2
  - Volumes V_1 et V_2
- **Equilibre thermique :**

$$T(S_1, V_1) = T(S_2, V_2)$$

- **Premier principe (sous-systèmes 1 et 2) :**

$$\dot{U}_1(S_1, V_1) = T(S_1, V_1)\,\dot{S}_1 - p_1(S_1, V_1)\,\dot{V}_1 = P_Q^{(21)} + P_W^{(21)}$$
$$\dot{U}_2(S_2, V_2) = T(S_2, V_2)\,\dot{S}_2 - p_2(S_2, V_2)\,\dot{V}_2 = P_Q^{(12)} + P_W^{(12)}$$

- **Energie interne (fonction d'état extensive) :**

$$U(S_1, S_2, V_1, V_2) = U_1(S_1, V_1) + U_2(S_2, V_2)$$

- **Premier principe (système isolé) :**

$$\dot{U}(S_1, S_2, V_1, V_2) = \dot{U}_1(S_1, V_1) + \dot{U}_2(S_2, V_2)$$
$$= P_Q^{(21)} + P_W^{(21)} + P_Q^{(12)} + P_W^{(12)} = 0$$

- **Identités :**

$$\dot{U}_1(S_1, V_1) = -\,\dot{U}_2(S_2, V_2)$$
$$P_Q^{(12)} + P_W^{(12)} = -\,P_Q^{(21)} - P_W^{(21)}$$

Thermodynamique

On considère donc un système isolé. Qui est constitué de deux sous systèmes simple sous système simple un ici sous système simple, deux là, qui sont séparés par une paroi dit à terme mobile et imperméable vu que le système est isolé. La puissance thermique PQ est la puissance mécanique PW qui sont exercées par l'extérieur sur le système. Elles nul ? Pour caractériser la thermodynamique de ce système, il faut deux types de variables d'état extensive. Tout d'abord l'entropie. Ensuite le volume. Pour chaque sous système simple, il faut une variable entropie et une variable volume. Les quatre variables d'état sont donc un S2, V1 et V2. On suppose que ce système a déjà atteint l'état d'équilibre thermique. Quand un système atteint un équilibre thermique, ça veut dire que les deux sous systèmes ont la même température. La température est une fonction d'état, c'est donc une fonction des variables d'état de chaque sous système. Par conséquent, l'équilibre thermique s'écrit de la manière suivante. La température T du premier sous système, qui est une fonction de S1 et devient, est égale à la température T du deuxième sous système, qui est une fonction de S2 et de V2.

Notes

Summary

0m 32s

Paroi diatherme mobile et imperméable

- **Système isolé :** $P_Q = P_W = 0$
- **Sous-systèmes simples (1) et (2)**
- **Variables d'état extensives :**
  - **Entropies** S_1 et S_2
  - **Volumes** V_1 et V_2
- **Equilibre thermique :**

  $T(S_1, V_1) = T(S_2, V_2)$

- **Premier principe (sous-systèmes 1 et 2) :**

  $$\dot{U}_1(S_1,V_1) = T(S_1,V_1)\,\dot{S}_1 - p_1(S_1,V_1)\,\dot{V}_1 = P_Q^{(21)} + P_W^{(21)}$$
  $$\dot{U}_2(S_2,V_2) = T(S_2,V_2)\,\dot{S}_2 - p_2(S_2,V_2)\,\dot{V}_2 = P_Q^{(12)} + P_W^{(12)}$$

- **Energie interne (fonction d'état extensive) :**

  $$U(S_1,S_2,V_1,V_2) = U_1(S_1,V_1) + U_2(S_2,V_2)$$

- **Premier principe (système isolé) :**

  $$\dot{U}(S_1,S_2,V_1,V_2) = \dot{U}_1(S_1,V_1) + \dot{U}_2(S_2,V_2) = P_Q^{(21)} + P_W^{(21)} + P_Q^{(12)} + P_W^{(12)} = 0$$

- **Identités :**

  $$\dot{U}_1(S_1,V_1) = -\dot{U}_2(S_2,V_2)$$
  $$P_Q^{(12)} + P_W^{(12)} = -P_Q^{(21)} - P_W^{(21)}$$

Thermodynamique

l'Énergie interne, la température et la pression sont des fonctions d'état. Ce sont donc des fonctions des variables d'état de chaque sous système. Le un point CT est un point moins t1 v un point. Le premier principe nous affirme que la cause de la variation temporelle de un. C'est. Les puissances thermiques et mécaniques qui sont exercées par le deuxième sous système sur le premier sous système, à savoir PQ deux un et PW deux un. De manière similaire deux points. CT. Est ce 2.01 p2 ? V. Deux point. Et la cause de la variation de l'énergie interne du deuxième sous système. D'après le premier principe, c'est la puissance thermique et la puissance mécanique exercée par le premier sous système sur le deuxième sous système, c'est à dire PQ un deux et PW un deux. l'Énergie interne, c'est une fonction d'état, donc l'énergie interne. Pour l'ensemble du système, c'est une fonction de l'ensemble des variables d'état du système, c'est à dire que c'est une fonction de S1, S2, V1 et V2, une fonction d'état extensive. Donc l'énergie interne u du système. Et la somme de l'énergie interne de ce système. Un de l'énergie interne deux. Du sous système. Deux. On peut maintenant prendre la dérivée temporelle de cette relation.

Notes

Summary

2m 08s

Paroi diatherme mobile et imperméable

- **Système isolé :** $P_Q = P_W = 0$
- **Sous-systèmes simples (1) et (2)**
- **Variables d'état extensives :**
  - **Entropies** S_1 et S_2
  - **Volumes** V_1 et V_2
- **Equilibre thermique :**

$$T(S_1, V_1) = T(S_2, V_2)$$

- **Premier principe (sous-systèmes 1 et 2) :**

$$\dot{U}_1(S_1, V_1) = T(S_1, V_1)\,\dot{S}_1 - p_1(S_1, V_1)\,\dot{V}_1 = P_Q^{(21)} + P_W^{(21)}$$
$$\dot{U}_2(S_2, V_2) = T(S_2, V_2)\,\dot{S}_2 - p_2(S_2, V_2)\,\dot{V}_2 = P_Q^{(12)} + P_W^{(12)}$$

- **Energie interne (fonction d'état extensive) :**

$$U(S_1, S_2, V_1, V_2) = U_1(S_1, V_1) + U_2(S_2, V_2)$$

- **Premier principe (système isolé) :**

$$\dot{U}(S_1, S_2, V_1, V_2) = \dot{U}_1(S_1, V_1) + \dot{U}_2(S_2, V_2) = P_Q^{(21)} + P_W^{(21)} + P_Q^{(12)} + P_W^{(12)} = 0$$

- **Identités :**

$$\dot{U}_1(S_1, V_1) = -\dot{U}_2(S_2, V_2)$$
$$P_Q^{(12)} + P_W^{(12)} = -P_Q^{(21)} - P_W^{(21)}$$

Thermodynamique

Huit points, c'est un point plus deux point. D'après le premier principe. Il y eut un point. CPQ de un, pw de un et u deux point. CPQ un deux plus PW un deux. Par conséquent, si le système est isolé, le premier principe nous affirme que le point est nul. Donc on en tire deux identités. Tout d'abord, il y eut un point qui est égal à moins de points. Et puis PQ un de plus pw un deux qui est égal à moi. PQ deux un moins pw deux un.

Notes

Summary

3m 56s

Dérivée partielle de l'entropie

- **Dérivées temporelles de l'entropie :**

$$\dot{S}_1 = \frac{1}{T(S_1, V_1)} \left(\dot{U}_1 (S_1, V_1) + p_1 (S_1, V_1) \dot{V}_1 \right)$$
$$\dot{S}_2 = \frac{1}{T(S_2, V_2)} \left(\dot{U}_2 (S_2, V_2) + p_2 (S_2, V_2) \dot{V}_2 \right)$$

- **Système isolé :**

$$\dot{U}_2 (S_2, V_2) = - \dot{U}_1 (S_1, V_1) \quad \text{et} \quad \dot{V}_2 = - \dot{V}_1$$

- **Dérivée temporelle de l'entropie :**

$$\dot{S} = \frac{1}{T(S_1, V_1)} \left(p_1 (S_1, V_1) - p_2 (S_2, V_2) \right) \dot{V}_1$$

- **Identités :** $dS = \dot{S}\, dt$ et $dV_1 = \dot{V}_1\, dt$

- **Dérivée partielle de l'entropie :**

$$\frac{\partial S}{\partial V_1} = \frac{1}{T(S_1, V_1)} \left(p_1(S_1, V_1) - p_2(S_2, V_2) \right)$$

Thermodynamique

On doit maintenant tenir compte explicitement de l'extensibilité, de l'entropie et du volume. L'entropie est une variable d'état extensive, donc l'entropie S du système est la somme de l'entropie S un du premier sous système et de l'entropie S deux du deuxième sous système. Le volume est aussi une variable d'état extensive. Par conséquent, le volume V du système est la somme du volume V1 du premier sous système et du volume V2 du deuxième sous système. On peut maintenant prendre des dérivés temporels de ces variables d'état. Tout d'abord ce point un point plus est deux points. Puis ensuite 20 points. Qui est égal avait un points plus élevé deux points. Finalement, on tient compte explicitement du fait que le système est isolé si le système est isolé. D'après le deuxième principe est ce point est égal à Pi de s qui est positif ou nul. Et si le système est isolé, le volume du système est constant, donc v points est nul, ce qui implique que v un point est égal à -22 points. Par conséquent, si le volume d'un sous système augmente, le volume de l'autre sous système va diminuer et vice versa à l'aide de l'expression qu'on a établie tout à l'heure pour eu un point et u de points.

Notes

Summary

4m 43s

Equilibre mécanique

- **Dérivée partielle de l'entropie :**

$$\frac{\partial S}{\partial V_1} = \frac{1}{T(S_1, V_1)} \Big(p_1(S_1, V_1) - p_2(S_2, V_2) \Big)$$

- **Deuxième principe (condition d'équilibre) :**

$$\frac{\partial S}{\partial V_1} = 0 \qquad \text{(maximum d'entropie)}$$

- **Equilibre mécanique :**

$$\boxed{p_1 \left(S_1, V_1\right) = p_2 \left(S_2, V_2\right)}$$

Le premier et le deuxième principes requièrent que les pressions des sous-systèmes aient la même valeur à l'équilibre mécanique.

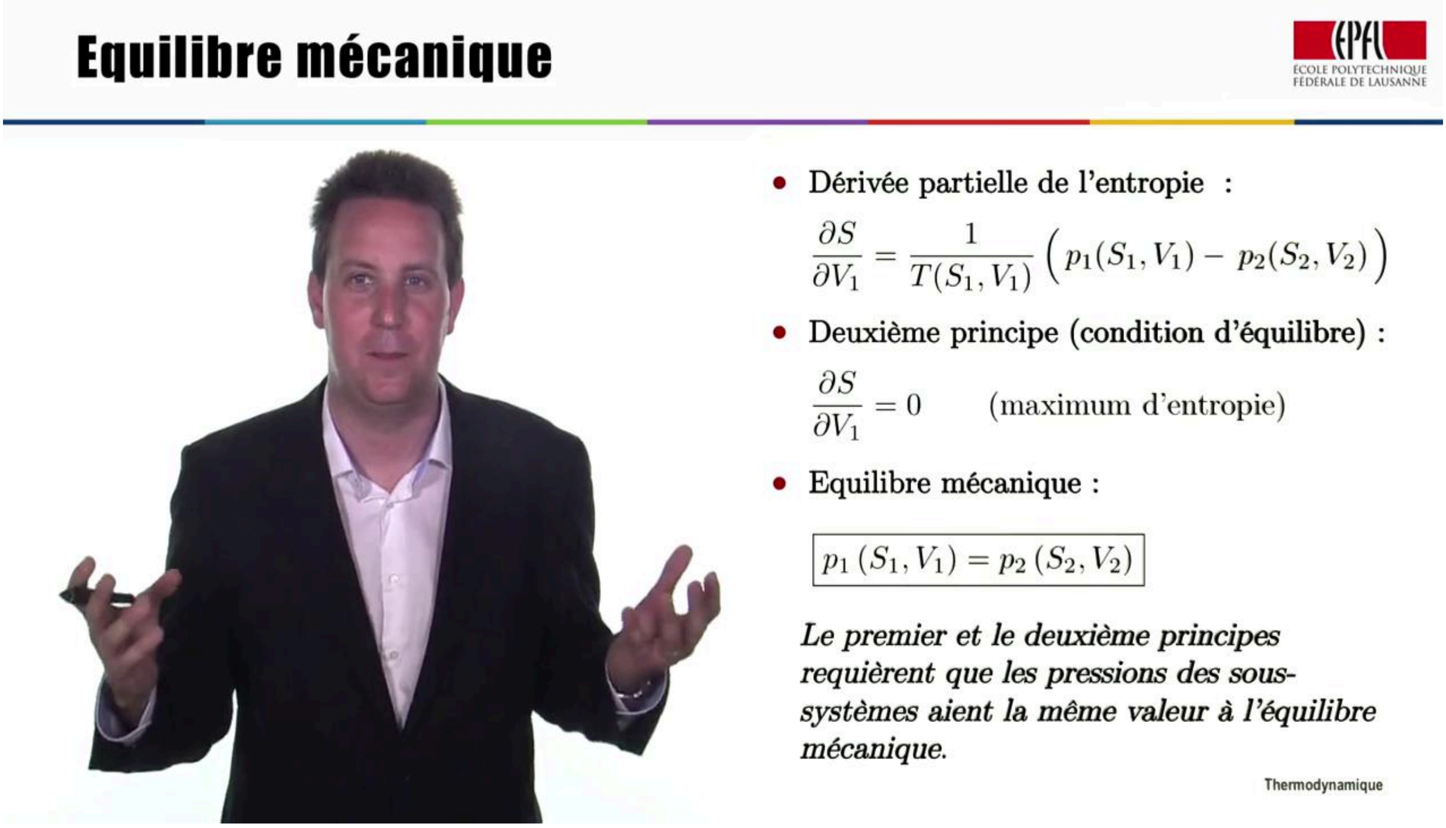
Thermodynamique

On peut maintenant déduire des expressions pour s un point et s de points. S 1.71 sur la température qui multiplie U un point plus p1. V un point et S 2.71 sur T qui multiplie u deux points plus p2 v deux points. On va maintenant tenir compte explicitement du fait que le système est isolé, c'est à dire que u de points est égal à moins et un point. Et que V2 points est égale à moins v1 un point. Ce qui nous permet de déduire l'expression explicite. La dérivée temporelle de l'entropie du système est le point qui est la somme de un point et de s deux point. Ceci s'écrit donc un surtout qui multiplie P1 moins p2 le toutefois v un point. On veut maintenant remettre en forme cette équation pour faire apparaître explicitement des différentielles. Donc on a multiplie par l'intervalle de temps infinitésimal dt et on obtient dans le membre de gauche DS et dans le membre de droite. Le dernier terme, c'est la différentielle du volume du premier sous système, c'est à dire d'hévéa. On peut donc maintenant prendre la dérivée partielle de l'entropie par rapport au volume du premier sous système des ronds s sur des ronds vient qui est égal à un sûreté qui multiplie la différence des pressions, c'est à dire P1 et P2.

Notes

Summary

6m 07s



Le deuxième principe de la thermodynamique, et plus exactement la condition d'équilibre du deuxième principe, affirme que l'entropie est maximale à l'équilibre, par conséquent à l'équilibre, la dérivée partielle de l'entropie par rapport au volume du premier sous système, c'est à dire des ronds s sur des ronds V1 et nuls. Compte tenu de l'expression qui se trouve sur la première ligne, c'est à dire des ronds sur des ronds V1. Un sûreté qui multiplie P1 et moins P2. Compte tenu de cette expression du maximum d'entropie, on obtient la condition d'équilibre mécanique, à savoir que les termes qui se trouvent entre parenthèses dans la première expression doivent s'annuler, ce qui implique. L'équilibre mécanique. La pression du premier sous système P1 doit être égale à la pression du deuxième sous système P2. Par conséquent, le premier et le deuxième principe requiert que les pressions des sous systèmes et la même valeur à l'équilibre mécanique avant que le système atteigne l'état d'équilibre mécanique.

Notes

Summary

7m 46s

Transfert mécanique

- **Dérivée temporelle de l'entropie** $(p_1 \neq p_2)$:

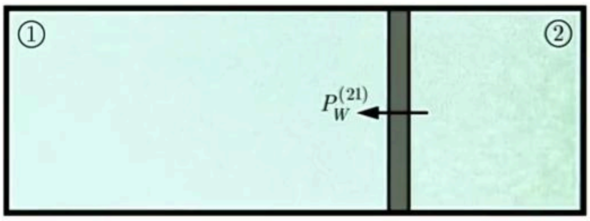
$$\dot{S} = \frac{1}{T\left(S_1, V_1\right)}\Big(p_1\left(S_1, V_1\right) - p_2\left(S_2, V_2\right)\Big)\,\dot{V}_1$$

- **Système isolé (procesus irréversible) :**

$$\dot{S} = \Pi_S > 0$$

- **Taux de production d'entropie :**

$$\Pi_S = \frac{1}{T\left(S_1, V_1\right)}\Big(p_1\left(S_1, V_1\right) - p_2\left(S_2, V_2\right)\Big)\,\dot{V}_1 > 0$$



- **Transfert mécanique :**
  - Travail effectué : $p_+ \quad \Rightarrow \quad p_-$
  - Processus irréversible : $\Pi_S > 0$
  - Nul à l'équilibre mécanique : $p_1 = p_2$

- $p_1 > p_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_1 > 0 \quad \Rightarrow \quad P_W^{(12)} = -\,p_1\left(S_1, V_1\right)\dot{V}_2 = p_1\left(S_1, V_1\right)\dot{V}_1 > 0$
- $p_2 > p_1 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_1 < 0 \quad \Rightarrow \quad P_W^{(21)} = -\,p_2\left(S_2, V_2\right)\dot{V}_1 > 0$

Thermodynamique

Il y a un transfert mécanique qui s'opère entre les deux sous systèmes. L'équilibre mécanique est caractérisé par l'égalité des pressions des deux sous systèmes. Par conséquent, durant le transfert mécanique, la pression P1 du premier sous système est différente de la pression P2 du deuxième sous système. Pour examiner ces transferts mécaniques, on va se baser sur l'expression de la dérivée temporelle de l'entropie. Est ce point ? C'est un sûreté qui multiplie p1 mois, P2 fois, v un point. P1 est différent de P2. De plus, vu qu'il y a un transfert mécanique. Le volume v1 du premier sous système va varier. Donc il est non nul, ce qui implique que. Est ce point et non nul ? De plus, on a un système qui est isolé. Pour un système isolé. Ce point est égal au taux de production d'entropie Pi de S. Vu que ce point est non nul et qu'il est égal à Pi de S. Il doit donc être positif, ce qui signifie qu'on a affaire à un processus irréversible. L'expression explicite du taux de production d'entropie est donc la suivante. Puis de s, c'est sur la température qui multiplie P1 et P2. Soit 20 points de baisse, est positif. Il faut maintenant distinguer deux cas de figure.

Notes

Summary

9m 02s

Transfert mécanique

- **Dérivée temporelle de l'entropie** $(p_1 \neq p_2)$:

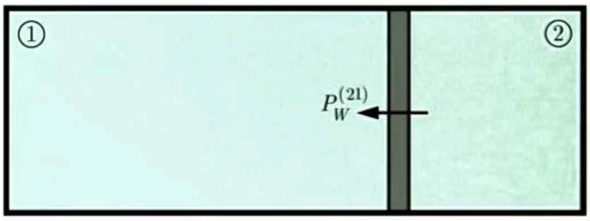
$$\dot{S} = \frac{1}{T(S_1,V_1)}\Big(p_1(S_1,V_1) - p_2(S_2,V_2)\Big)\dot{V}_1$$

- **Système isolé (procesus irréversible) :**

$$\dot{S} = \Pi_S > 0$$

- **Taux de production d'entropie :**

$$\Pi_S = \frac{1}{T(S_1,V_1)}\Big(p_1(S_1,V_1) - p_2(S_2,V_2)\Big)\dot{V}_1 > 0$$



- **Transfert mécanique :**
  - Travail effectué : $p_+ \quad \Rightarrow \quad p_-$
  - Processus irréversible : $\Pi_S > 0$
  - Nul à l'équilibre mécanique : $p_1 = p_2$

- $p_1 > p_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_1 > 0 \quad \Rightarrow \quad P_W^{(12)} = -p_1(S_1,V_1)\dot{V}_2 = p_1(S_1,V_1)\dot{V}_1 > 0$
- $p_2 > p_1 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_1 < 0 \quad \Rightarrow \quad P_W^{(21)} = -p_2(S_2,V_2)\dot{V}_1 > 0$

Thermodynamique

Dans le premier cas, on considère que la pression B1 du premier sous système est supérieure à la pression P2 du deuxième sous système. Ceci implique que la différence. Des deux termes qui se trouvent ici entre parenthèses est positive. Par conséquent, pour que pi de s soit positif, il faut que 20 un points soit lui aussi positif. La puissance mécanique exercée par le premier sous système assure le deuxième sous système. PW deux est défini comme moins. P1 v2 point. On sait par ailleurs que V de point est égal à V un point, donc p w un deux cp1 v un point qui est positif. Par conséquent, si la pression du premier sous système est supérieure à la pression P2 du deuxième sous système, il y a un travail qui est effectué par le premier sous système sur le deuxième sous système, c'est à dire que la paroi va se déplacer vers la droite. Deuxième cas de figure. P2 est supérieur à P1. Dans ce cas là, la différence des deux termes qui apparaissent dans l'expression du taux de production d'entropie est négative. Pour copie de S soit défini positif, il faut alors que 21 points soient aussi négatifs. La puissance mécanique exercée par le sous système de son sous système un PW deux est définie comme P2.

Notes

Summary

10m 36s

Transfert mécanique

- **Dérivée temporelle de l'entropie** $(p_1 \neq p_2)$:

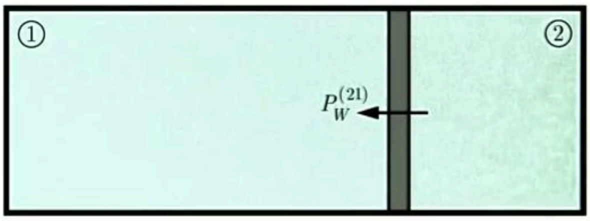
$$\dot{S} = \frac{1}{T(S_1, V_1)} \Big(p_1(S_1, V_1) - p_2(S_2, V_2) \Big) \dot{V}_1$$

- **Système isolé (procesus irréversible) :**

$$\dot{S} = \Pi_S > 0$$

- **Taux de production d'entropie :**

$$\Pi_S = \frac{1}{T(S_1, V_1)} \Big(p_1(S_1, V_1) - p_2(S_2, V_2) \Big) \dot{V}_1 > 0$$



- **Transfert mécanique :**
  - Travail effectué : $p_+ \Rightarrow p_-$
  - Processus irréversible : $\Pi_S > 0$
  - Nul à l'équilibre mécanique : $p_1 = p_2$

- $p_1 > p_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_1 > 0 \quad \Rightarrow \quad P_W^{(12)} = -p_1(S_1, V_1)\dot{V}_2 = p_1(S_1, V_1)\dot{V}_1 > 0$
- $p_2 > p_1 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_1 < 0 \quad \Rightarrow \quad P_W^{(21)} = -p_2(S_2, V_2)\dot{V}_1 > 0$

Thermodynamique

V. Un point. Elle est donc positive. Par conséquent, si la pression P2 du sous système deux est supérieure à la pression P1 du sous système un. Le sous système deux va effectuer un travail sur le sous système un. Ce travail. Va correspondre à un déplacement de la paroi vers la gauche. Par conséquent. Lors d'un transfert mécanique. Le travail est effectué par le sous système dont la pression est la plus élevée. Notée B+ sur le sous système dont la pression est la moins élevée, notée P mois, ce transfert mécanique est un processus irréversible, c'est à dire que pi de s est positif. Et ce transfert mécanique va progressivement. Amener le système vers un état d'équilibre mécanique et à l'équilibre mécanique. P1 est égal à P2, c'est à dire que le transfert mécanique est nul.

Notes

Summary

12m 13s