ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

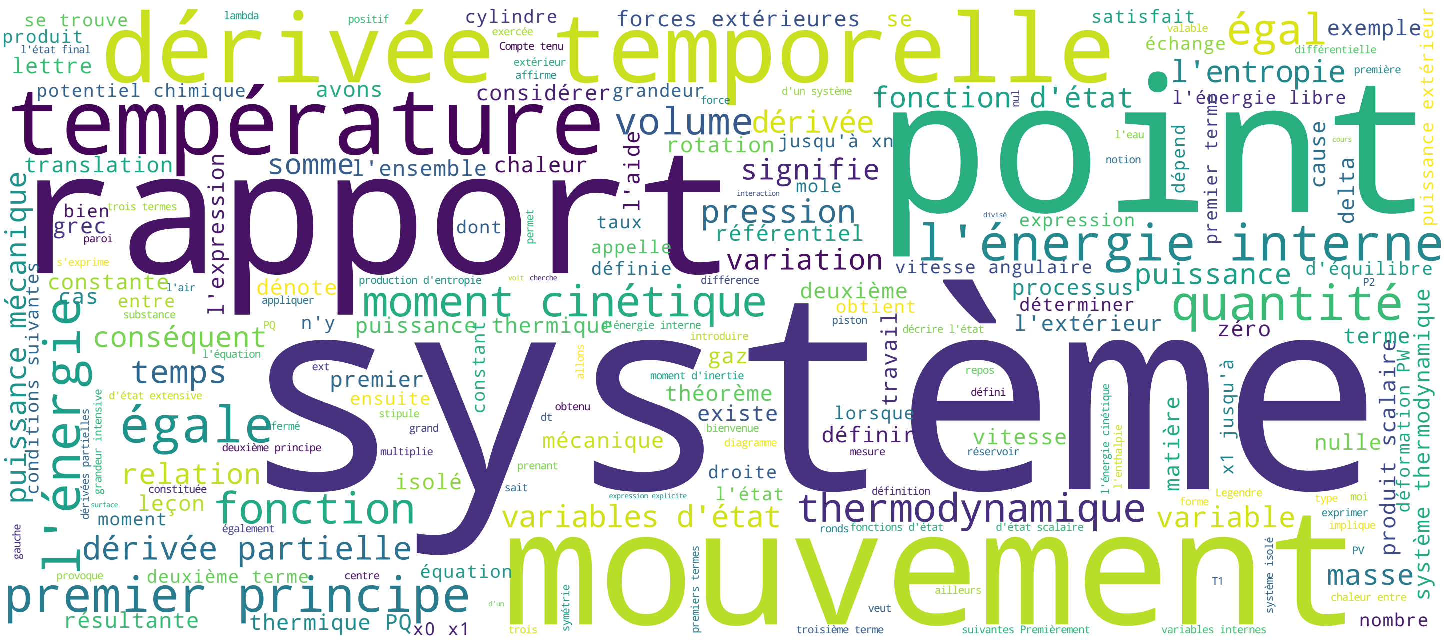
RESCIF
Réseau d'excellence des sciences de l'ingénieur de la Francophonie

Thermodynamique

Premier principe

Dr. Sylvain Bréchet

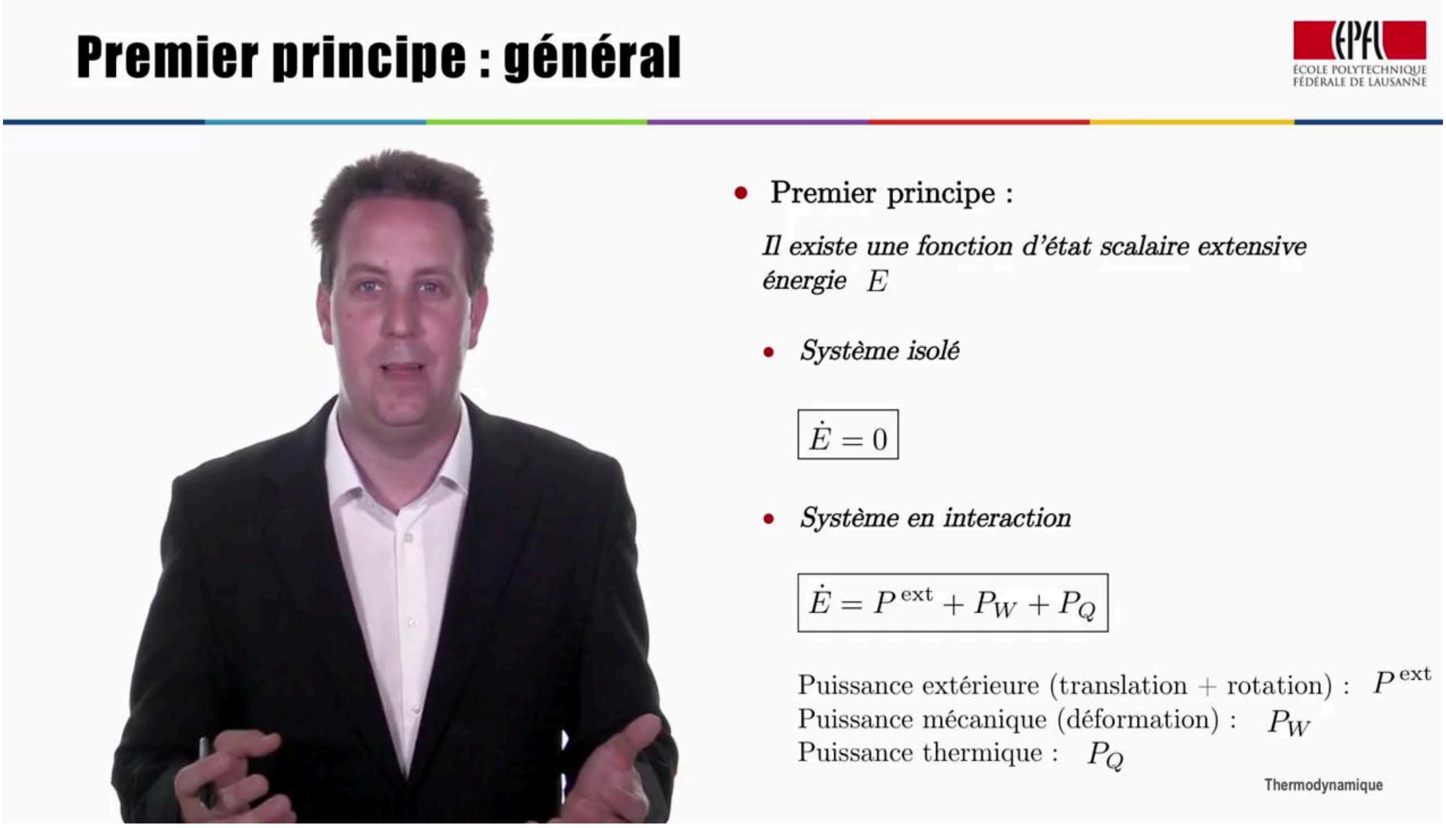
James Prescott Joule, 1818 - 1889



Search MOOC

Video

EPFL

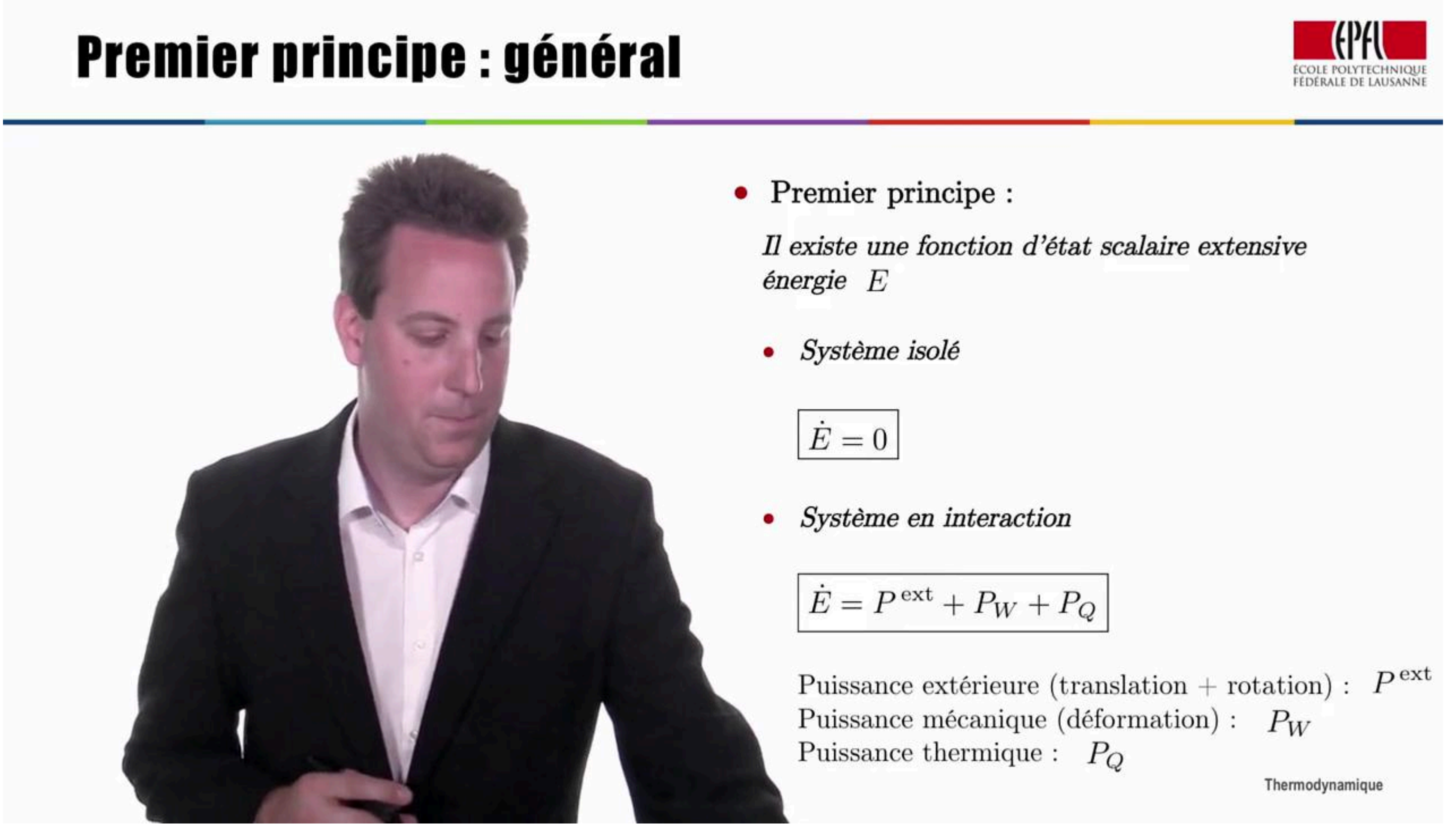


Bonjour et bienvenue à se moque de la thermodynamique. Cette leçon est consacrée au premier principe. La thermodynamique repose sur deux principes fondamentaux qui sont le premier principe et le deuxième principe. C'est à l'aide de ces deux principes qu'on peut dégager des lois. Premièrement, dans cette leçon, nous allons formuler le premier principe. De manière générale, nous allons essayer de considérer deux extensions de ce premier principe en translation d'abord, puis en rotation. Ensuite, et c'est à l'aide de ce premier principe, dans un deuxième temps, qu'on va pouvoir établir un lien explicite entre la thermodynamique et la mécanique. Pour pouvoir établir ce lien, on va introduire les grandeurs fondamentales qui sont l'énergie, l'énergie cinétique en translation d'abord, en rotation ensuite, et l'énergie interne. Et c'est grâce à cette notion d'énergie interne qu'on sera en mesure de formuler le premier principe dans le référentiel ou le système est au repos. Commençons par la formulation générale du premier principe de la thermodynamique. Ce premier principe stipule que pour tout système thermodynamique, il existe une fonction d'état scalaires et extensives qu'on appelle l'énergie et qu'on dénote par la lettre.

Notes

Summary

0m 05s

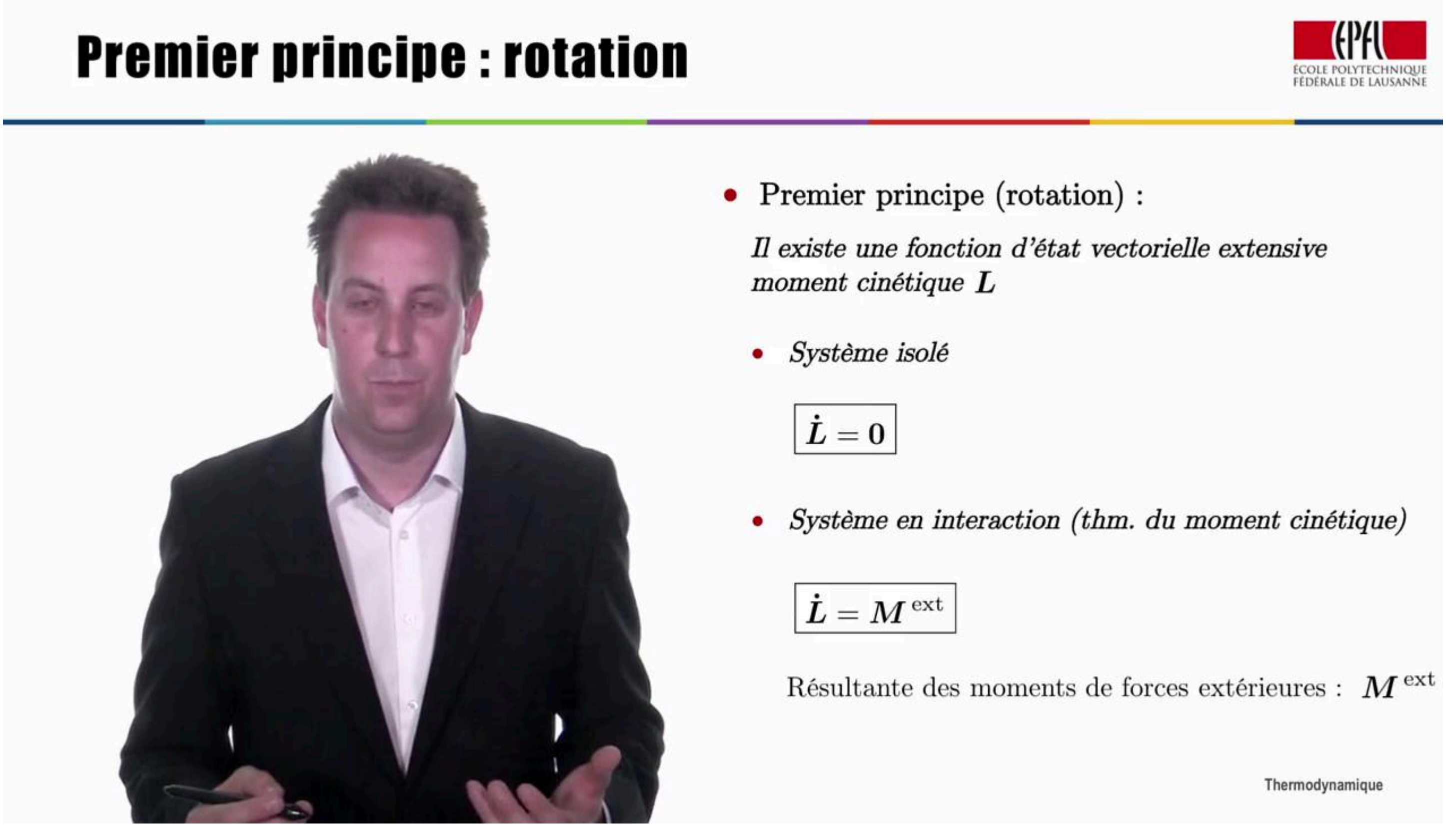


Elle satisfait les deux conditions suivantes. Premièrement, si le système est isolé, la dérivée temporelle de l'énergie est nulle, ce qui signifie que l'énergie est une constante. Deuxièmement, si le système est en interaction avec l'extérieur, la cause de la variation de l'énergie à cause de la dérivée temporelle de l'énergie est une puissance. Alors, il y a trois types de puissance qui provoquent la variation de la première. Le premier type de puissance, c'est la puissance extérieure et extérieure qui provoque la modification d'états de mouvement de translation ou l'état de mouvement de rotation. Le deuxième type de puissance est la puissance mécanique, la puissance mécanique qui provoque la déformation du système. Cette puissance mécanique, on la dénote par un p. W. Et puis le troisième type de puissance, c'est la puissance thermique qu'on dénote par 1PQ et qui décrit les échanges de chaleur entre le système et l'extérieur.

Notes

Summary

1m 40s

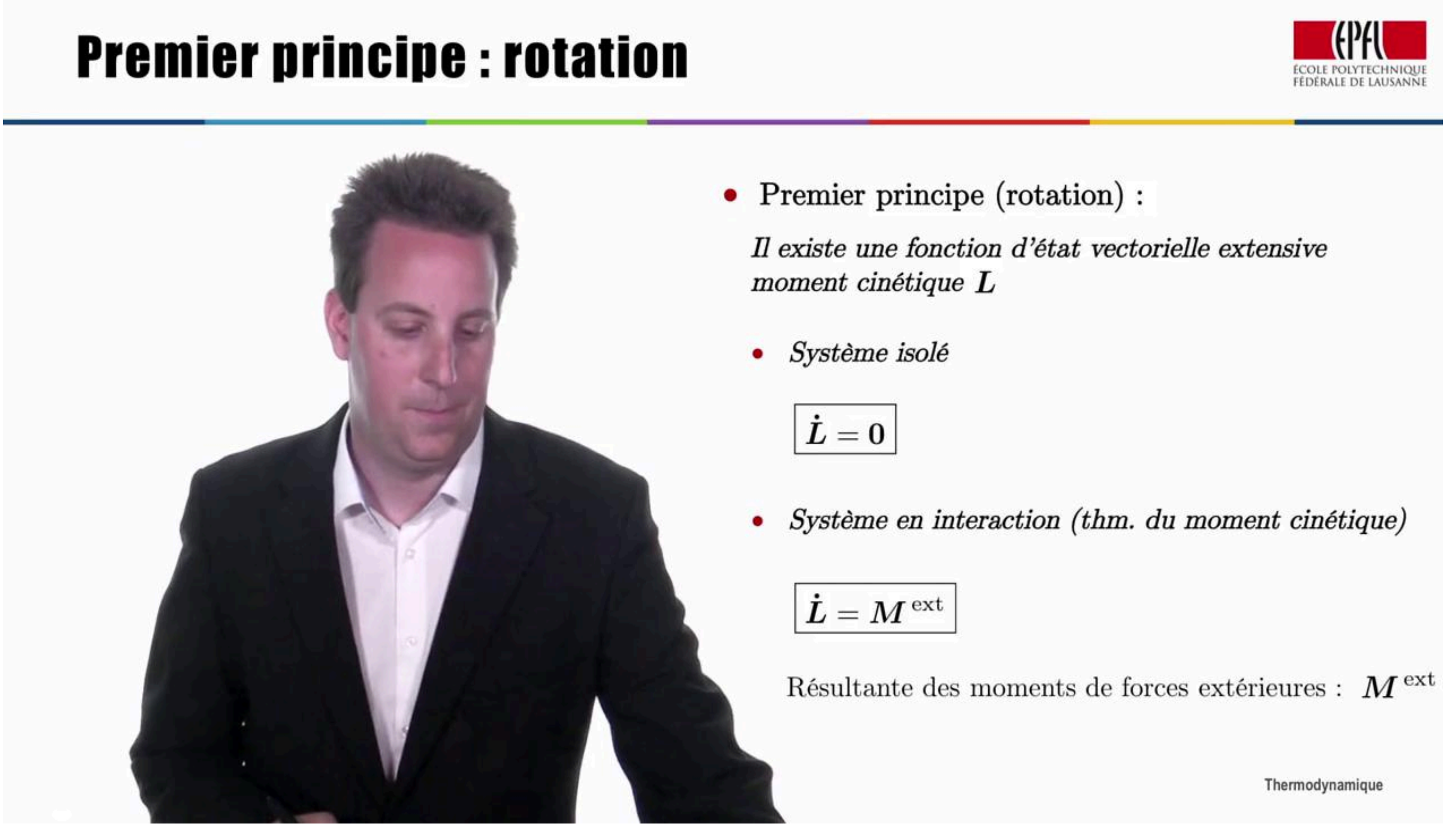


On peut à présent étendre ce premier principe à la translation. Cette extension stipule que pour tout système thermodynamique, il existe une fonction d'état vectorielle extensive qu'on appelle la quantité de mouvement et qu'on va dénoté par la lettre P. Elle satisfait les deux conditions suivantes. Si le système est isolé, la dérivée temporelle de la quantité de mouvement est nulle. Cela signifie que la quantité de mouvement est une constante. En d'autres termes, le système est en mouvement rectiligne uniforme. Si le système est en interaction. Deuxièmement. La cause qui provoque la variation de la quantité de mouvement du système. C'est la résultante des forces extérieures f. Ext. Donc la dérivée temporelle de la quantité de mouvement est égale à la résultante des forces extérieures. Ceci s'appelle le théorème du centre de masse. En mécanique. La deuxième extension du premier principe a trait à la rotation. Elle stipule que pour tout système thermodynamique, il existe une fonction d'état vectorielle extensive qu'on appelle le moment cinétique et qu'on dénote par la lettre L. Elle satisfait les deux conditions suivantes.

Notes

Summary

3m 01s

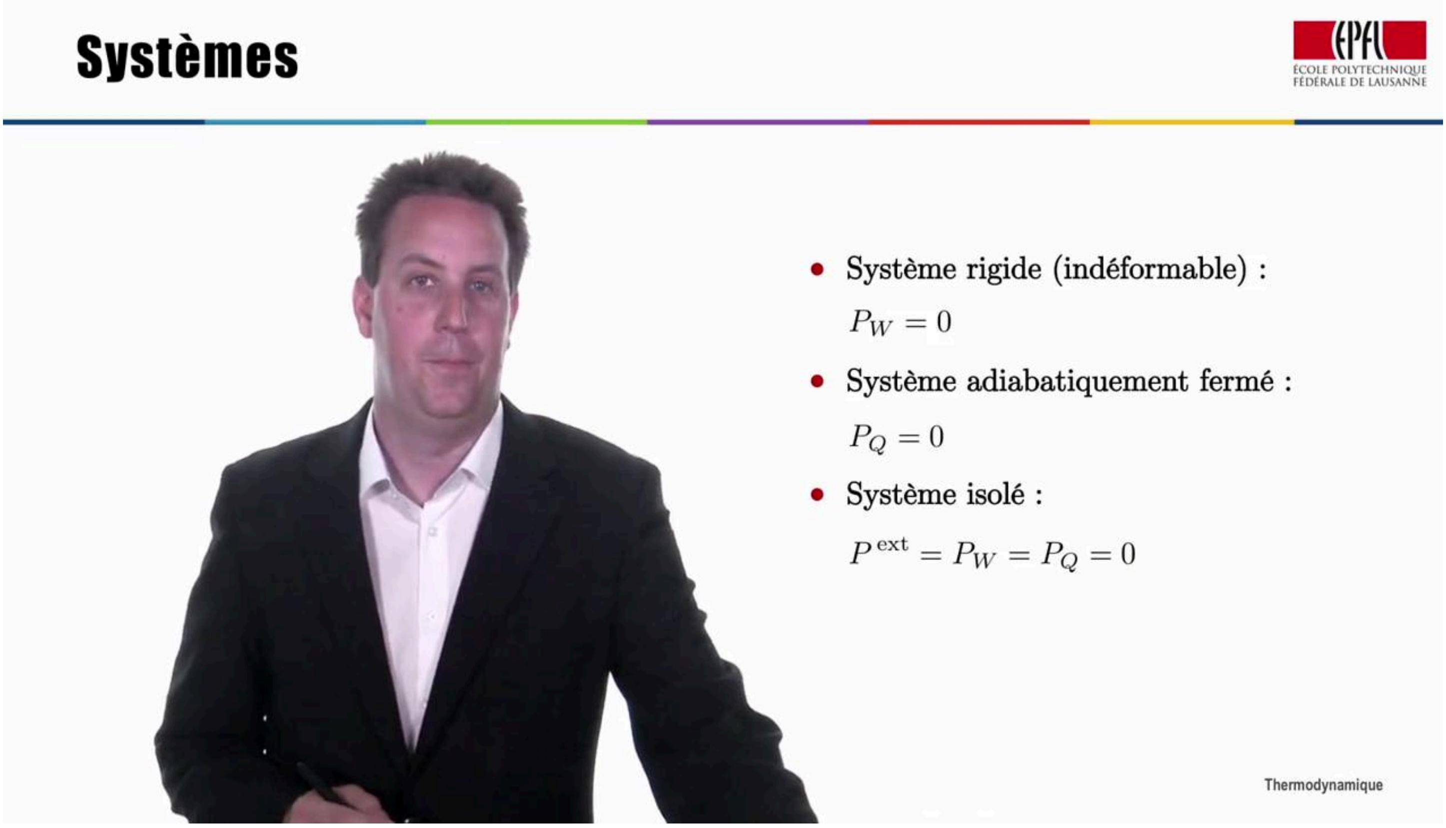


Premièrement, si le système est isolé, la dérivée temporelle du moment cinétique est nulle, ce qui signifie que le moment cinétique est une constante. Par conséquent, dans ce cas là, le système est en mouvement circulaire uniforme. Deuxièmement, si le système est en interaction avec l'extérieur. La cause de la variation du moment cinétique. C'est la résultante des moments de forces extérieures extérieures. Par conséquent, la dérivée temporelle du moment cinétique est. Le point est égale à la résultante des moments de forces extérieures. Ceci est bien connu en mécanique puisqu'il s'agit du théorème du moment cinétique.

Notes

Summary

4m 28s



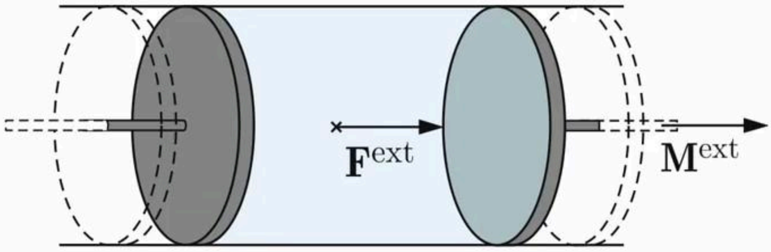
À l'aide de ces puissances qu'on vient de définir, on peut catégoriser les différents types de système thermodynamique. Si le système est rigide, c'est à dire indéformable, la puissance mécanique de déformation PW sera nulle. Si le système est adiabatique fermé, c'est à dire qu'il n'y a pas d'échange de chaleur entre le système et l'extérieur. Dans ce cas là, la puissance thermique PQ sera nulle. Si le système est isolé, c'est à dire qu'il n'y a aucune interaction entre le système et l'extérieur, toutes les puissances sont nulles, ce qui signifie que la puissance extérieure, la puissance mécanique de déformation PW et la puissance thermique PQ sont nulles.

Notes

Summary

5m 18s

Thermodynamique et mécanique



- Variables d'état extensives :

  $\{\boldsymbol{P}, \boldsymbol{L}, X_0, X_1, .., X_n\}$

- Quantité de mouvement + théorème du centre de masse :

  $\boldsymbol{P} = M\,\boldsymbol{v} \qquad \Rightarrow \qquad \boldsymbol{F}^{\,\text{ext}} = \dot{\boldsymbol{P}} = M\,\dot{\boldsymbol{v}}$

- Moment cinétique + théorème du moment cinétique :

  $\boldsymbol{L} = I\,\boldsymbol{\omega} \qquad \Rightarrow \qquad \boldsymbol{M}^{\,\text{ext}} = \dot{\boldsymbol{L}} = I\,\dot{\boldsymbol{\omega}}$

Thermodynamique

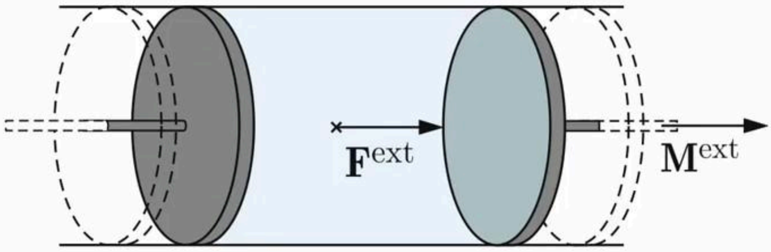
Grâce à ce premier principe, on est maintenant en mesure d'établir un lien explicite entre la thermodynamique et la mécanique. Pour cela, on va considérer un système. Qui est suffisamment général pour pouvoir permettre ce lien. Ce système est le suivant. Il s'agit d'un gaz homogène qui se trouve dans un cylindre qui est refermé par deux pistons qui sont libres de coulisser dans le cylindre. Ce cylindre peut être un mouvement de translation dans l'espace et il peut également être un mouvement de rotation autour de son axe central de symétrie. Pour pouvoir décrire l'état de ce système, il va falloir spécifier les variables d'état extensives correspondantes pour décrire l'état de mouvement en translation du système. Il faudra choisir comme variables d'état la quantité de mouvement P pour décrire l'état de mouvement de rotation de ce système autour de son axe de symétrie, il faudra choisir comme variables états extensives le moment cinétique L et en toute généralité, il faut encore ajouter des variables d'état extensives internes qui permettent de décrire la thermodynamique interne du gaz. Ces variables sont les variables x0 x1 jusqu'à xn. La quantité de mouvement du système.

Notes

Summary

6m 14s

Thermodynamique et mécanique



- Variables d'état extensives :

  $\{\boldsymbol{P}, \boldsymbol{L}, X_0, X_1, .., X_n\}$

- Quantité de mouvement + théorème du centre de masse :

  $\boldsymbol{P} = M\,\boldsymbol{v} \qquad \Rightarrow \qquad \boldsymbol{F}^{\,\mathrm{ext}} = \dot{\boldsymbol{P}} = M\,\dot{\boldsymbol{v}}$

- Moment cinétique + théorème du moment cinétique :

  $\boldsymbol{L} = I\,\boldsymbol{\omega} \qquad \Rightarrow \qquad \boldsymbol{M}^{\,\mathrm{ext}} = \dot{\boldsymbol{L}} = I\,\dot{\boldsymbol{\omega}}$

Thermodynamique

P est égal au produit de la masse. Fois la vitesse V. Ici, on peut appliquer le théorème du centre de masse qui affirme que la résultante des forces extérieures f ext est égale à la dérivée temporelle de la quantité de mouvement des points. Étant donné que le gaz est enfermé dans le cylindre, la masse est constante, ce qui signifie que p est égal à m v point. Le moment cinétique du système est défini comme le produit du moment d'inertie par rapport à l'axe de symétrie. Fois la vitesse angulaire oméga. On peut appliquer le théorème du moment cinétique qui affirme. Que la résultante des moments de force extérieure m ext est égale à. La dérivée temporelle du moment cinétique est le point. Comme le moment d'inertie est constant, elle pointe également i oméga point.

Notes

Summary

7m 44s

Energie, énergie cinétique et énergie interne

- Energie fonction d'état :
  $E\left(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{L}, X_0, X_1, .., X_n\right)$
- Grandeurs intensives conjuguées :
  - Vitesse
    $$\boldsymbol{v} = \frac{\partial E\left(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{L}, X_0, X_1, .., X_n\right)}{\partial \boldsymbol{P}} = \frac{\boldsymbol{P}}{M}$$
  - Vitesse angulaire
    $$\boldsymbol{\omega} = \frac{\partial E\left(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{L}, X_0, X_1, .., X_n\right)}{\partial \boldsymbol{L}} = \frac{\boldsymbol{L}}{I}$$
- Energie :
  $$E\left(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{L}, X_0, X_1, .., X_n\right) = \frac{1}{2}\boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{P} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{L} + U(X_0, X_1, .., X_n)$$

Thermodynamique

l'Énergie de ce système est une fonction d'état. C'est donc une fonction des différentes variables d'état du système et est fonction de p, de l et de l'ensemble des x, c'est à dire x0, x1 jusqu'à xn. Peut maintenant définir les grandeurs intensives, conjugué respectivement à la quantité de mouvement P et au moment cinétique L. La grandeur conjuguée à la quantité de mouvement p, c'est la vitesse V qui, dans une perspective thermodynamique, est définie comme la dérivée de l'énergie par rapport à la quantité de mouvement p. Par ailleurs, on sait que la vitesse est obtenue en prenant le rapport de la quantité de mouvement p sur la masse M. La vitesse angulaire est elle définie comme la grandeur intensive conjuguée au moment cinétique l. Dans une démarche thermodynamique, elle est définie comme la dérivée partielle de par rapport à l. Par ailleurs, on sait qu'elle est égale au rapport du moment cinétique l divisé par le moment d'inertie. Compte tenu de ses deux relations pour la vitesse et la vitesse angulaire. On est maintenant en mesure d'exprimer explicitement cette énergie en fonction des variables p, l et de l'ensemble des X. Cette énergie est constituée de trois termes. Le premier terme.

Notes

Summary

8m 52s

Dérivée temporelle de l'énergie

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

- Dérivée temporelle de l'énergie :

$$\dot{E}\left(\boldsymbol{P},\boldsymbol{L},X_0,X_1,..,X_n\right)=\boldsymbol{v}\cdot\dot{\boldsymbol{P}}+\boldsymbol{\omega}\cdot\dot{\boldsymbol{L}}+\dot{U}(X_0,X_1,..,X_n)$$

- Théorèmes du centre de masse et du moment cinétique :

$$\dot{E}=\boldsymbol{F}^{\,\text{ext}}\cdot\boldsymbol{v}+\boldsymbol{M}^{\,\text{ext}}\cdot\boldsymbol{\omega}+\dot{U}$$

- Puissance extérieure (translation + rotation) :

$$P^{\,\text{ext}}=\boldsymbol{F}^{\,\text{ext}}\cdot\boldsymbol{v}+\boldsymbol{M}^{\,\text{ext}}\cdot\boldsymbol{\omega}\quad\Rightarrow\quad\dot{E}=P^{\,\text{ext}}+\dot{U}$$

- Premier principe :

$$\dot{E}=P^{\,\text{ext}}+P_W+P_Q$$

- Premier principe (référentiel au repos) :

$$\dot{U}=P_W+P_Q$$

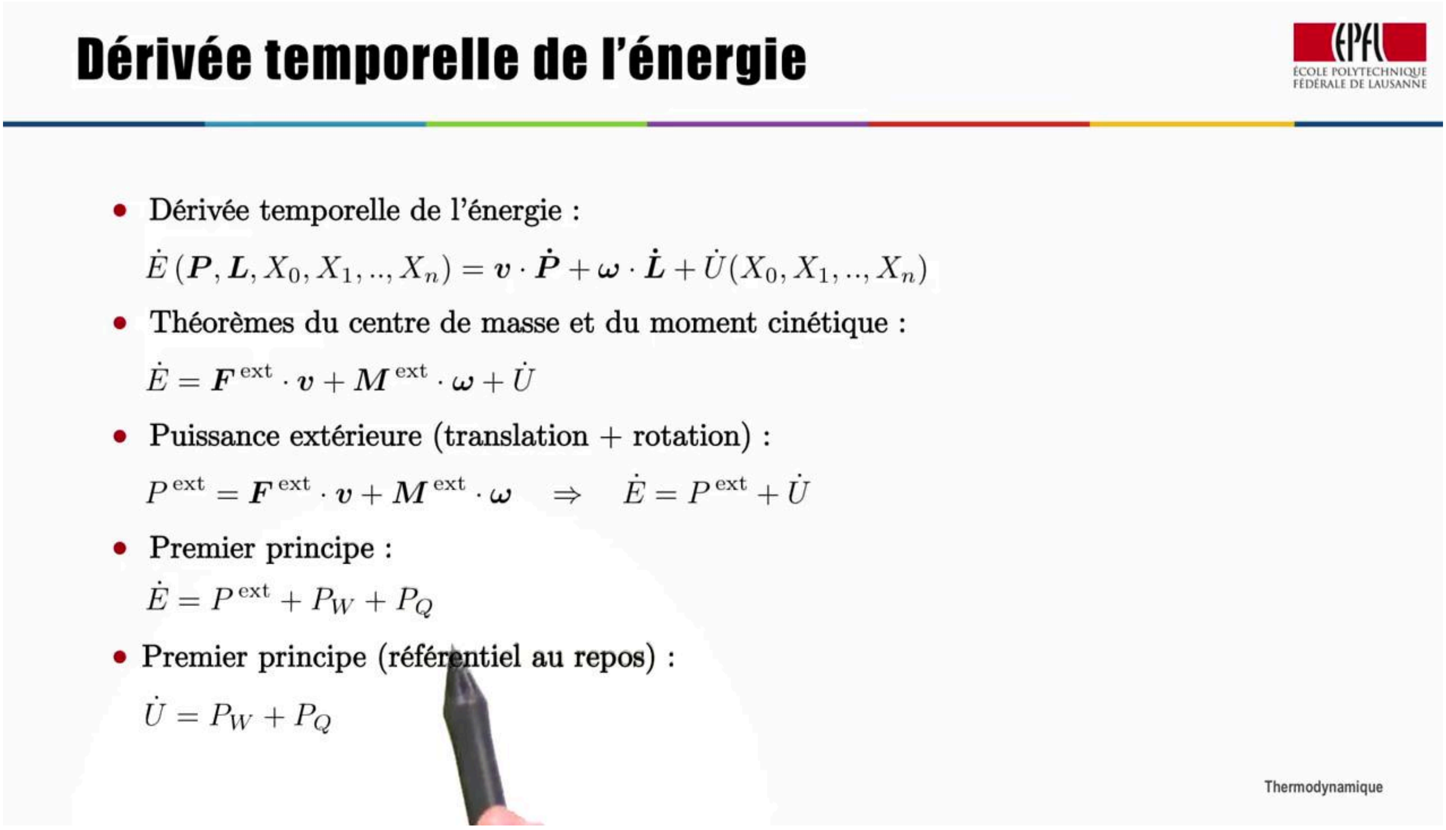
Thermodynamique

Correspond à l'énergie cinétique de translation. Il s'exprime comme une demi du produit scalaire de la vitesse pour la quantité de mouvement. Le deuxième terme correspond à l'énergie cinétique de rotation. Il s'exprime comme une demi du produit scalaire entre la vitesse angulaire et le moment cinétique, et il reste un troisième terme. Ce troisième terme est indépendant de l'état de mouvement. Il est indépendant des variables PL. Il dépend uniquement des variables internes x0, x1 jusqu'à XN. Ce type d'énergie est donc l'énergie interne du système. Dans le cas particulier. Ou P et elles sont nulles, c'est à dire qu'il n'y a pas d'état de mouvement. Dans ce cas et dans ce cas seulement, l'énergie du système se réduit à l'énergie interne. l'Énergie interne U s'interprète donc comme l'énergie du système dans le référentiel ou le système est au repos. On cherche à déterminer la thermodynamique de ce système. Dans le mot thermodynamique, il y a le mot dynamique. Le mot dynamique signifie qu'on s'intéresse à une évolution temporelle. On fait donc des dérivées qui dépendent du temps. La première étape va consister à. Déterminer la dérivée temporelle de l'énergie.

Notes

Summary

10m 24s



l'Énergie est une fonction d'état qui dépend des variables d'état du système. La dérivée temporelle de l'énergie sera constituée de trois termes. Le premier terme est obtenu en prenant la dérivée partielle de l'énergie par rapport à la quantité de mouvement. Puis on prend le produit scalaire avec la dérivée de la quantité de mouvement par rapport au temps. Le deuxième terme est obtenu en prenant la dérivée partielle de l'énergie par rapport au moment cinétique. Puis on prend le produit scalaire avec la dérivée temporelle du moment cinétique. Et puis le troisième terme, c'est tout simplement la dérivée temporelle de l'énergie interne. Qui dépend des variables internes. X0 x1 jusqu'à xn. Maintenant, on cherche à exprimer la dérivée temporelle de P, la dérivée temporelle de l en termes des causes qui leur donnent naissance, c'est à dire de la résultante des forces extérieures d'une part, et de la résultante des moments de forces extérieures. D'autre part, on fait ceci à l'aide des théorèmes du centre de masse et du moment cinétique. Si on regarde maintenant cette dérivée par rapport au temps de l'énergie. Eh bien, par la mécanique, on reconnaît les deux premiers termes.

Notes

Summary

12m 01s

Dérivée temporelle de l'énergie

- Dérivée temporelle de l'énergie :

$$\dot{E}\left(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{L}, X_0, X_1, .., X_n\right) = \boldsymbol{v} \cdot \dot{\boldsymbol{P}} + \boldsymbol{\omega} \cdot \dot{\boldsymbol{L}} + \dot{U}(X_0, X_1, .., X_n)$$

- Théorèmes du centre de masse et du moment cinétique :

$$\dot{E} = \boldsymbol{F}^{\,\text{ext}} \cdot \boldsymbol{v} + \boldsymbol{M}^{\,\text{ext}} \cdot \boldsymbol{\omega} + \dot{U}$$

- Puissance extérieure (translation + rotation) :

$$P^{\,\text{ext}} = \boldsymbol{F}^{\,\text{ext}} \cdot \boldsymbol{v} + \boldsymbol{M}^{\,\text{ext}} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad \Rightarrow \quad \dot{E} = P^{\,\text{ext}} + \dot{U}$$

- Premier principe :

$$\dot{E} = P^{\,\text{ext}} + P_W + P_Q$$

- Premier principe (référentiel au repos) :

$$\dot{U} = P_W + P_Q$$

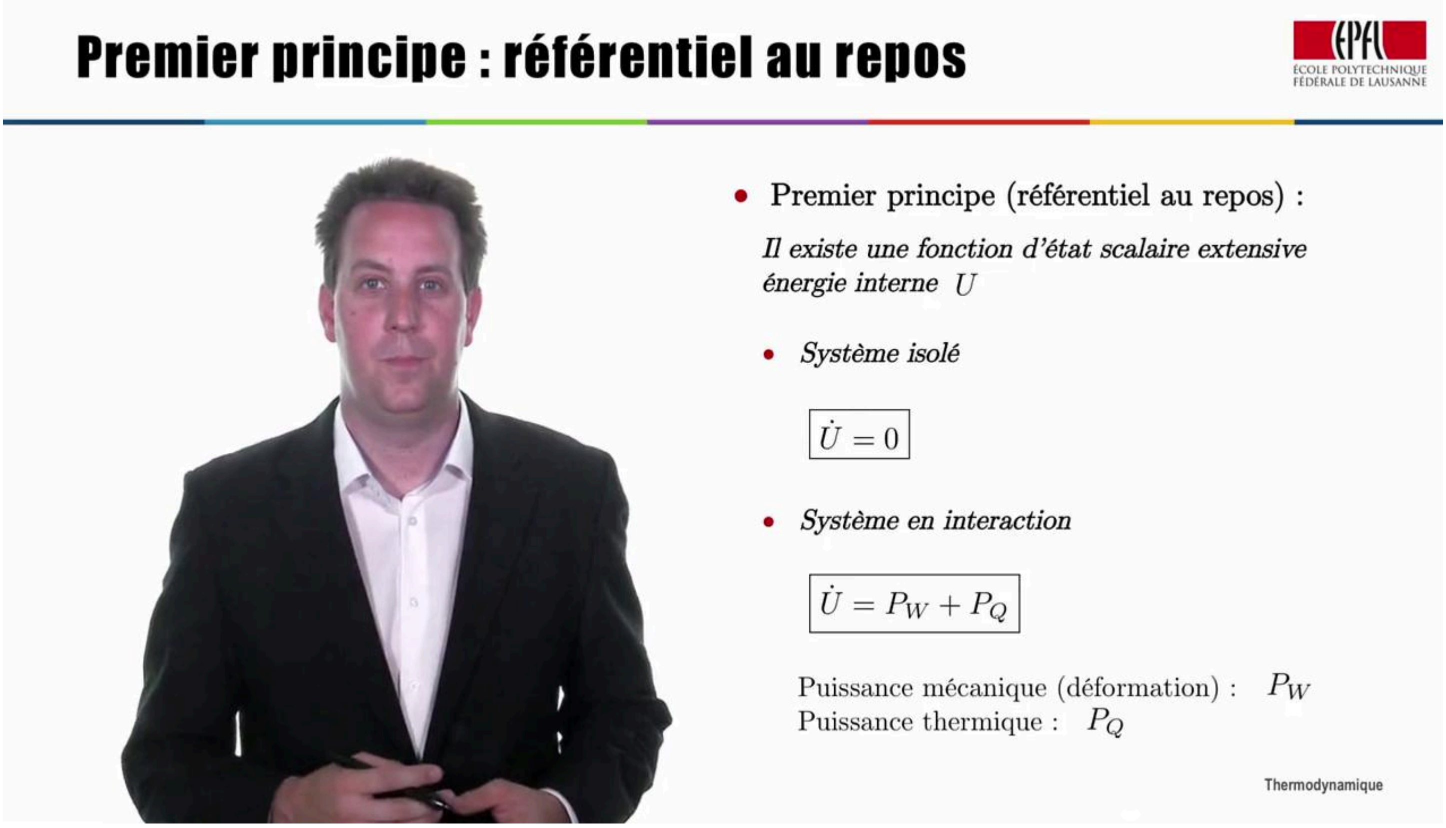
Thermodynamique

Les deux premiers termes correspondent à la puissance extérieure. Qui permet de modifier l'état de mouvement de translation et de rotation du système. C'est la puissance telle qu'on la définit en mécanique du solide, indéformable et extérieur. Et constituée de deux termes. Le premier terme est le produit scalaire de l'effet extérieur avec la vitesse et le deuxième terme est le produit scalaire de m extérieur avec la vitesse angulaire. Par conséquent, on peut exprimer la dérivée par rapport au temps de l'énergie, comme la somme de la puissance extérieure p.ex. et de la dérivée par rapport au temps de l'énergie interne du point. On peut maintenant comparer. Cette expression de la dérivée par rapport au temps de l'énergie, avec l'expression de la dérivée par rapport au temps de l'énergie obtenue par le premier principe qui stipule que cette dérivée de l'énergie par rapport au temps est égale à l'extérieur. Plus pw, plus pq. En comparant ces deux équations. On obtient ce qu'on appelle le premier principe dans le référentiel. Au bout, le système est au repos. C'est à dire qu'on a une expression explicite de la dérivée temporelle de l'énergie interne du point qui est égale à la somme de deux contributions la puissance mécanique de déformation PW et la puissance thermique PQ.

Notes

Summary

13m 21s



On peut maintenant reformuler le premier principe de manière formelle dans le référentiel ou le système est au repos. Dans ce référentiel là. Le premier principe stipule qu'il existe une fonction d'état scalaire extensive, appelée énergie interne, qu'on dénote par la lettre u satisfait les deux conditions suivantes. Premièrement, si le système est isolé, la dérivée temporelle de l'énergie interne du point est nulle, ce qui signifie que l'énergie interne u est une constante. Deuxièmement, si le système est en interaction avec l'extérieur, la cause de la variation de l'énergie interne. Le point est justement due à deux puissances la puissance mécanique de déformation PWR et la puissance thermique PQ.

Notes

Summary

14m 53s