ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

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

Thermodynamique

Travail, chaleur et oscillateur harmonique amorti

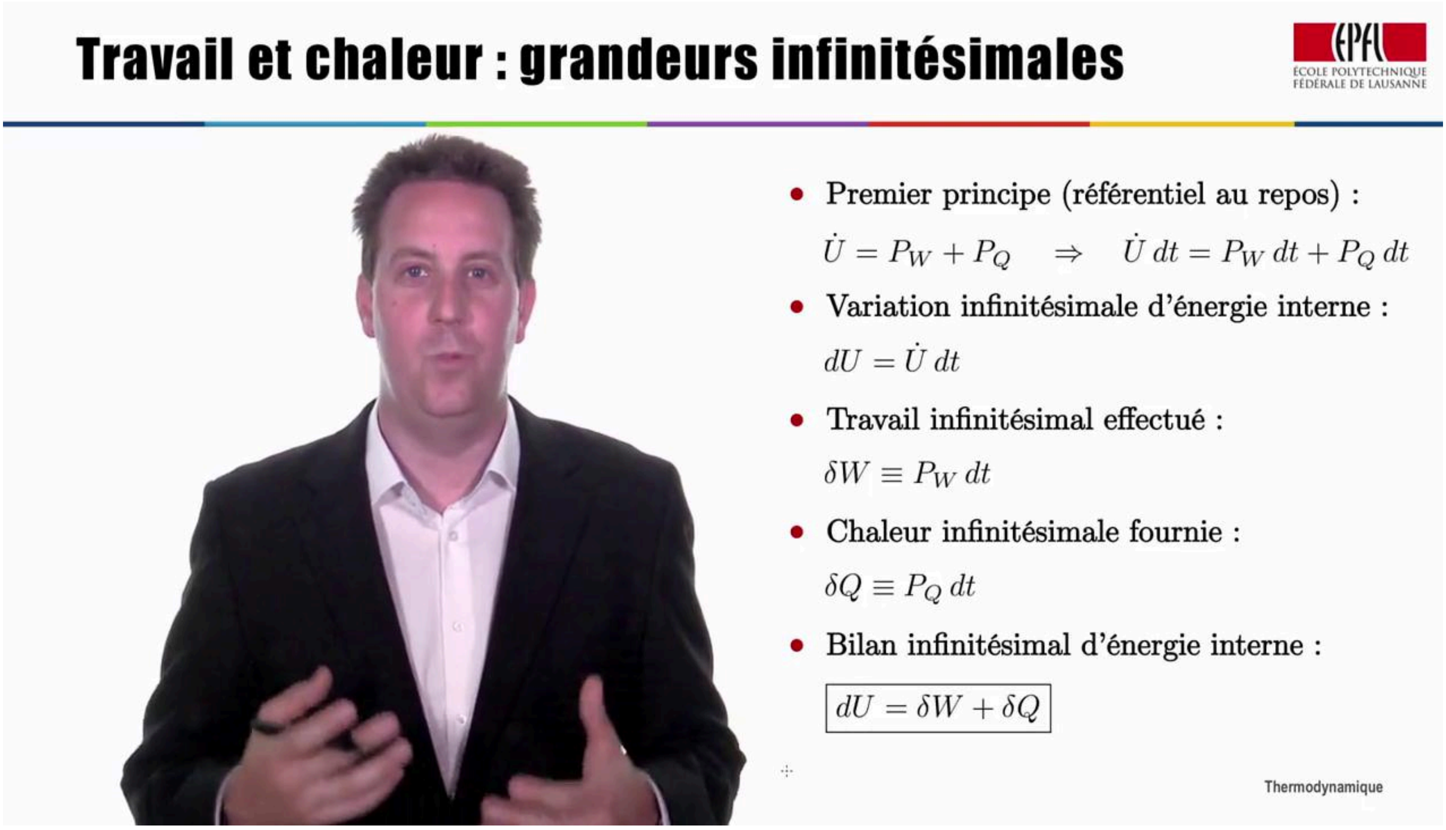
Dr. Sylvain Bréchet

James Prescott Joule, 1818 - 1889

Search MOOC

Video

EPFL

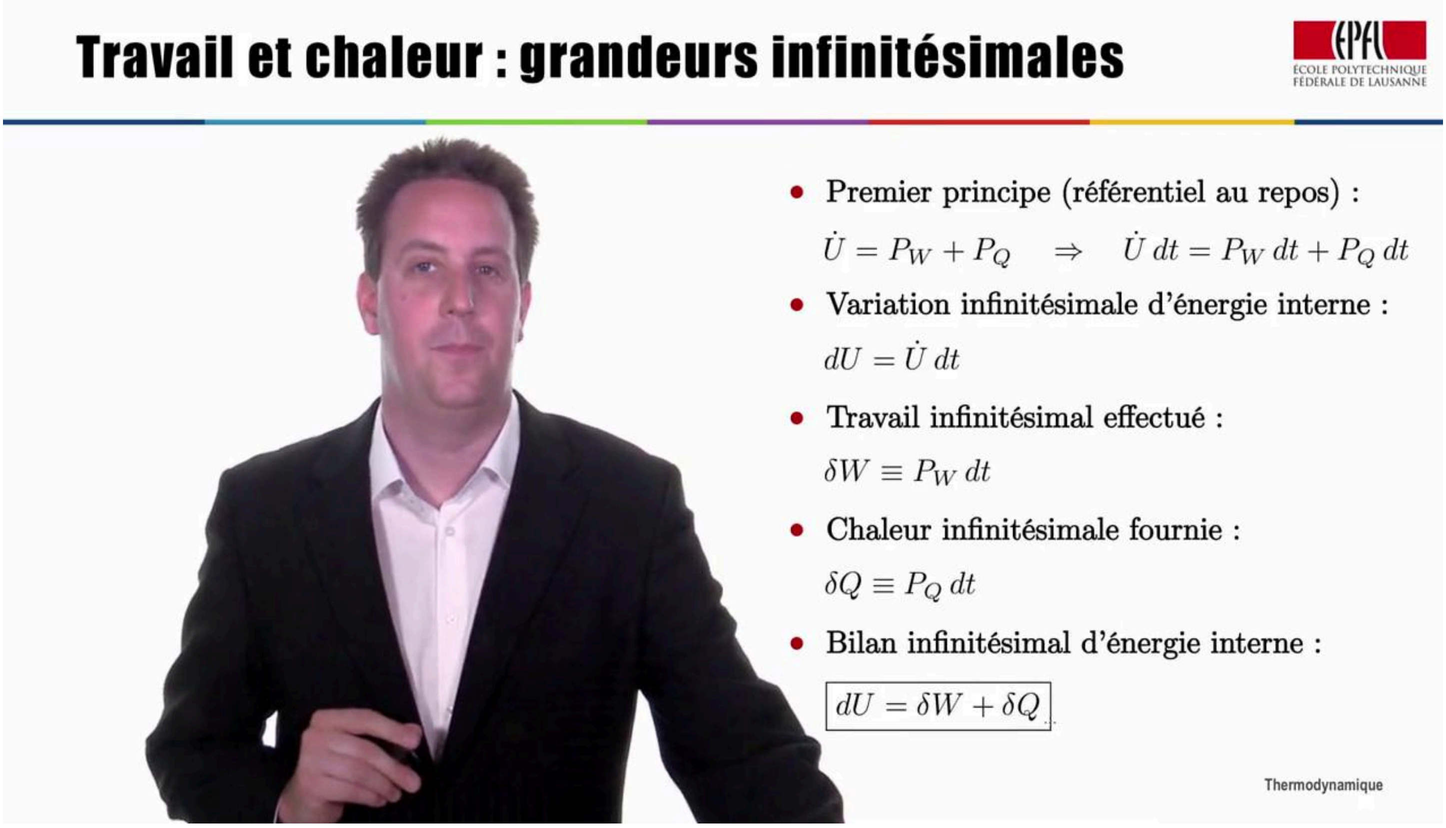


Bonjour et bienvenue à ce mot de thermodynamique. Dans cette leçon, on va définir les notions fondamentales en thermodynamique que sont le travail, la chaleur et l'énergie interne. On verra que l'énergie interne est une fonction d'état. On établira ensuite un bilan d'énergie interne. Et pour terminer, on va considérer un exemple d'application de tout ce qu'on a vu jusqu'à maintenant, qui est l'oscillateur harmonique amorti dans un fluide. On va le considérer dans une approche thermodynamique. Commençons donc par le travail et la chaleur et on va définir les grandeurs infinitésimales de travail et de chaleur. Pour cela, on va se baser sur le premier principe exprimé dans le référentiel ou le système est au repos. Dans ce référentiel. Le premier principe nous dit la chose suivante la dérivée par rapport au temps de l'énergie interne du point est la somme de deux puissances la puissance mécanique de déformation PW et la puissance thermique P. On peut maintenant multiplier cette relation par un intervalle de temps infinitésimal dt. Il y a donc eu point dt égal pw dt plus pq dt. On peut définir la variation infinitésimale d'énergie interne. C'est une différentielle. C'est début des hubs.

Notes

Summary

0m 05s



Peut aussi s'écrire comme des u sur dt, x, dt, d, u sur dt c huit point. Et donc d u s'écrit comme un point dt. On peut introduire maintenant le travail infinitésimal effectué sur le système qu'on va dénoter delta W. La lettre W vient de l'allemand work ou l'anglais work, et le symbole delta signifie qu'il ne s'agit pas d'une différentielle. Le travail infinitésimal effectué sur le système delta W est défini comme le produit de la puissance mécanique de déformation et w fois l'intervalle de temps infinitésimale dt. De manière similaire, on peut définir la chaleur infinitésimale fournie au système. On la dénote delta q. Le Q se réfère à l'allemand Cayley, qui signifie en français source, source de chaleur, et le delta signifie que la chaleur infinitésimale n'est pas une différentielle. On définit cette chaleur infinitésimale fournie au système delta Q comme le produit de la puissance thermique PQ pour l'intervalle de temps infinitésimale DT. Fort de ces trois définitions, on peut à présent réécrire l'expression du premier principe multiplié par le temps infinitésimal dt. Et on obtient le bilan infinitésimal d'énergie interne. Qui nous dit que la différentielle de l'énergie interne des U et la somme du travail infinitésimal effectué sur le système delta W et de la chaleur infinitésimale fournie au système delta Q.

Notes

Summary

1m 44s

Travail et chaleur

- Bilan infinitésimal d'énergie interne :

  $dU = \delta W + \delta Q$

- Processus : (état initial « i » $\rightarrow$ final « f »)
  - Variation d'énergie interne :

    $$\Delta U_{if} = \int_{U_i}^{U_f} dU = U_f - U_i$$

  - Travail effectué :

    $$W_{if} = \int_i^f \delta W = \int_{t_i}^{t_f} P_W \, dt$$

  - Chaleur fournie :

    $$Q_{if} = \int_i^f \delta Q = \int_{t_i}^{t_f} P_Q \, dt$$

- Bilan d'énergie interne : $\boxed{\Delta U_{if} = W_{if} + Q_{if}}$

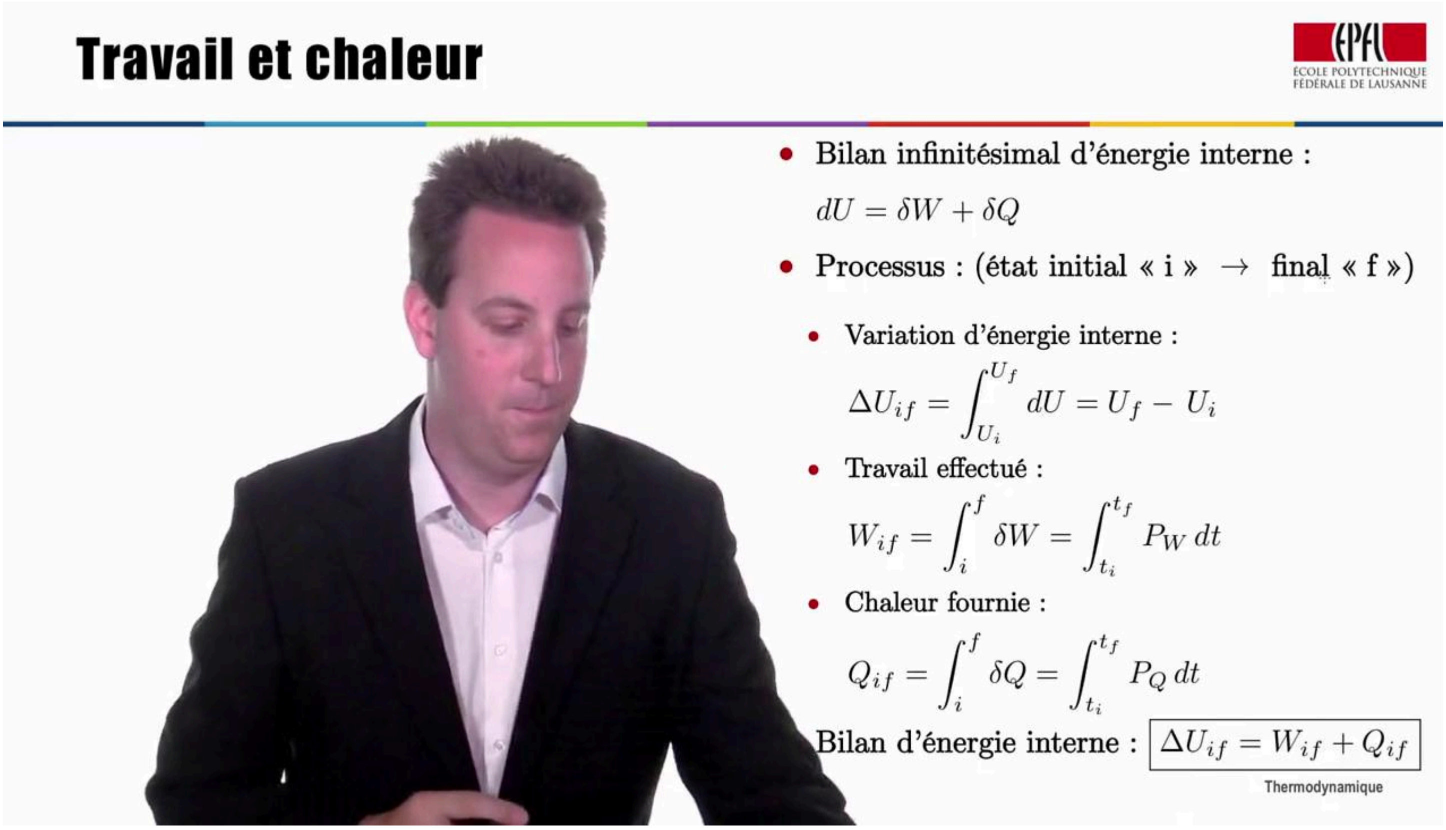
Thermodynamique

On va maintenant déterminer le travail et la chaleur. Pour un processus qui n'est pas nécessairement un processus infinitésimal, pour un processus quelconque qui va de l'état initial Y. À l'état final. F. Pour obtenir ce travail et cette chaleur, on va devoir intégrer l'équation de bilan infinitésimal d'énergie interne de l'état initial I à l'état final. F. Commençons par la variation d'énergie interne entre ces deux états. On a des notes Delta U et F. C'est l'intégrale de la différentielle de l'énergie interne d u et donc elle va simplement être égale à la à l'énergie interne finale du F. l'Énergie interne initiale U. Le travail qui est effectué durant ce processus, on le dénote w. F. Il est égal à l'intégrale de l'état initial. I à l'état final. F du travail infinitésimal effectué sur le système Delta W. Ce travail infinitésimal, on l'a défini précédemment, il est égal au produit de la puissance mécanique de déformation PW pour l'intervalle de temps infinitésimal dt. On peut maintenant définir la chaleur fournie au système. Durant ce processus, on la dénote. Q y. F. C'est l'intégrale de l'état initial à l'état final. F La chaleur infinitésimale fournie au système Delta. Q.

Notes

Summary

3m 41s



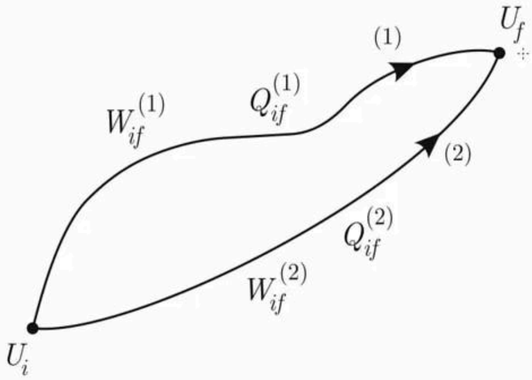
Qu'on a défini comme étant le produit de la puissance thermique PQ pour l'intervalle de temps infinitésimal DT qu'on intègre du temps initial pays au temps final TF. À l'aide de ces trois définitions. On est maintenant en mesure d'annoncer le bilan d'énergie interne durant le processus qui va de l'état initial I à l'état final. Ce bilan d'énergie interne était annoncé de la manière suivante la variation d'énergie interne du système durant ce processus Delta U et F est égale à la somme du travail effectué w f et de la chaleur fournie q i f.

Notes

Summary

5m 24s

Energie interne : fonction d'état



- Processus : (état initial « i » $\rightarrow$ final « f »)
  - Variation d'énergie interne : $\Delta U_{if} = U_f - U_i$
  - Travail effectué : $W_{if}^{(1)} \neq W_{if}^{(2)}$
  - Chaleur fournie : $Q_{if}^{(1)} \neq Q_{if}^{(2)}$

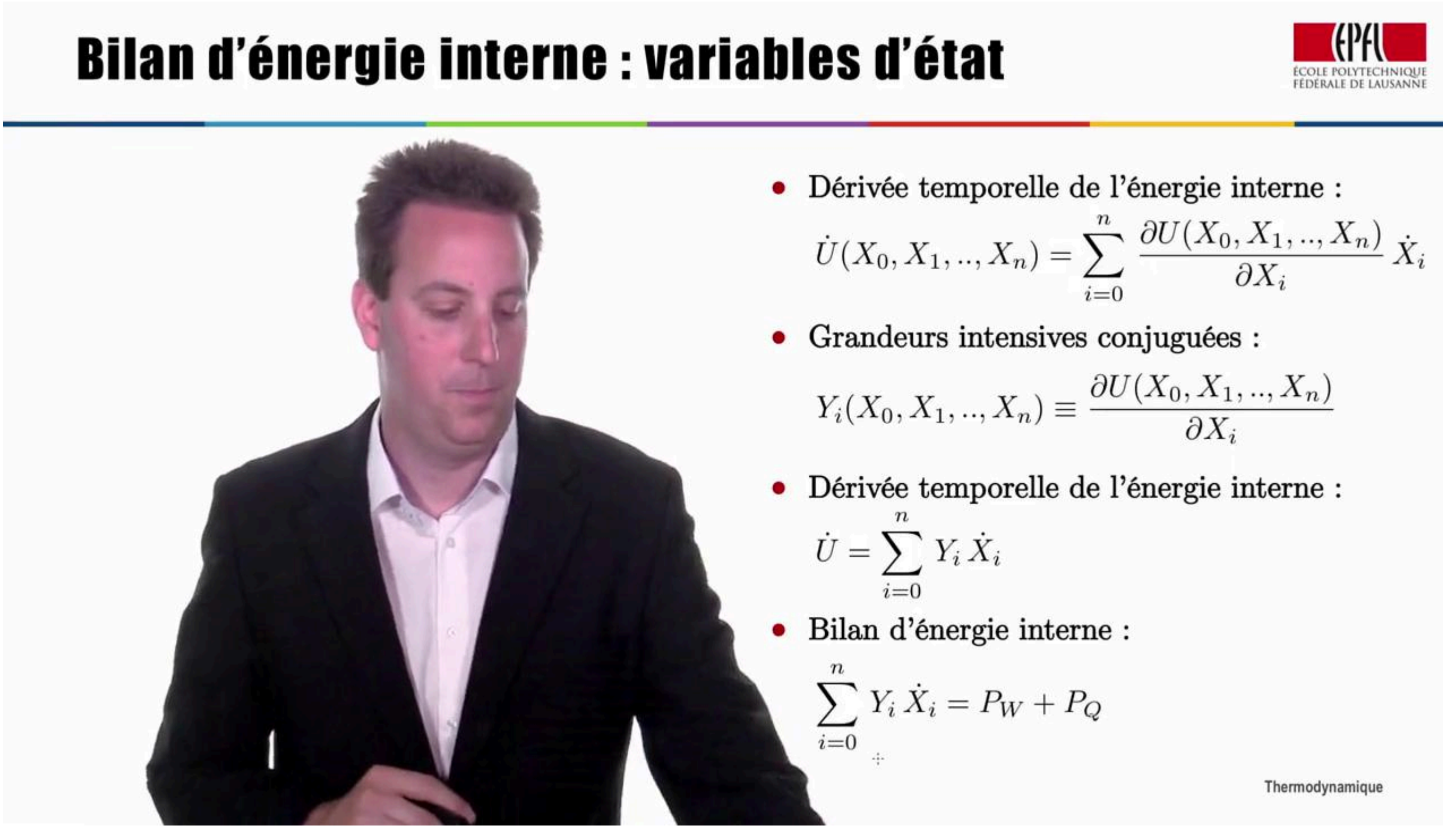
Thermodynamique

l'Énergie interne est une fonction d'état, contrairement au travail et à la chaleur. Pour la comprendre, on va considérer deux processus qui vont d'un état initial i un état final f. La variation d'énergie interne durant ces processus. Delta I F dépend uniquement de l'état final f et de l'état initial. Sept. l'Énergie interne de l'état final. l'Énergie interne de l'état initiale. Par conséquent, cette variation d'énergie interne est indépendante du processus choisi. Qu'on prenne le processus. Un. Ou le processus. Deux On aura exactement la même variation d'énergie interne. Mais ca dépend uniquement de l'état et pas du processus. l'Énergie interne est une fonction d'état. Ceci n'est pas le cas pour le travail effectué et la chaleur fournie. Le travail effectué lors du premier processus wj f1. N'est en général pas le même du travail effectué durant le deuxième processus. W. ISF. Deux. On a exactement le même constat pour la chaleur fournie par la chaleur fournie durant le premier processus. QF1 n'est en général pas la même que la chaleur fournie durant le deuxième processus. Q IF deux. Donc le travail et la chaleur dépendent du processus et pas seulement de l'État. Par conséquent, ces grandeur ne sont pas des fonctions d'État. Ceci est un résultat important.

Notes

Summary

6m 14s



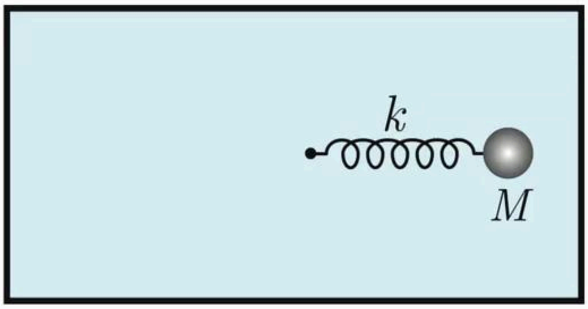
À présent, on veut déterminer le bilan d'énergie interne. À l'aide des variables d'état du système. Donc on va explicitement calculer la dérivée temporelle de l'énergie en termes d'énergie interne, qui est une fonction des variables internes x0 x1 jusqu'à XN. La dérivée temporelle de l'énergie interne s'écrit comme la dérivée partielle de par rapport à la variable x x fois x y point. Ensuite la somme sur toutes les variables internes, c'est à dire qu'on va sommer l'indécis de zéro à n. On peut introduire ensuite des grandeurs intensives qui sont conjuguées au variable extensive variable extensive delta, la variable y i et la variable conjuguée à la variable x y et les fonctions de toutes les variables d'état, c'est à dire que les fonctions de x0 x1 jusqu'à xn. On l'a définie comme la dérivée partielle de u par rapport à xj. En utilisant cette définition, on peut réécrire la dérivée temporelle de l'énergie interne du point comme la somme de zéro à n de i y a six points. Ce qui nous permet d'obtenir un bilan d'énergie interne qui s'exprime en fonction des variables d'état du système. C'est la somme de zéro à n de i y x y point qui est égal à BW plus PQ.

Notes

Summary

8m 06s

Oscillateur harmonique amorti : système isolé



- Variables d'état : $\{\boldsymbol{P}, \boldsymbol{r}, X_0\}$
- Energie (cinétique + interne) :

$$E(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{r}, X_0) = \frac{\boldsymbol{P}^2}{2M} + U(\boldsymbol{r}, X_0)$$

- Energie interne (pot. élastique + autre) :

$$U(\boldsymbol{r}, X_0) = \Phi(\boldsymbol{r}) + U(\boldsymbol{0}, X_0)$$

$$\Phi(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{2}\, k\, \boldsymbol{r}^2$$

Thermodynamique

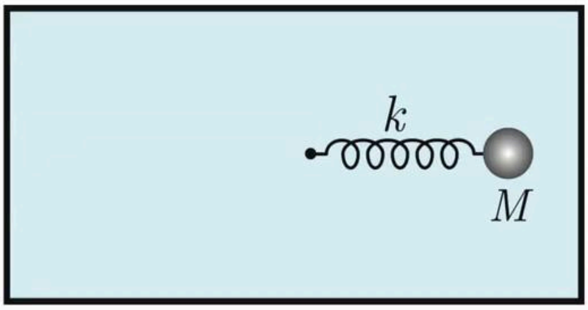
On va à présent considérer un exemple qui est tiré de la mécanique et qu'on va aborder dans un cadre thermodynamique. Il s'agit de l'oscillateur harmonique amorti. Cet oscillateur harmonique amorti est constitué d'un point matériel de masse M qui est attaché à un ressort de longueur à vide nulle et de constantes élastiques K. Cet oscillateur harmonique se trouve dans un fluide visqueux. Et l'ensemble de ce système est isolé. Pour décrire ce système, il faut d'abord choisir les variables d'état appropriées. En mécanique, pour décrire la dynamique d'un oscillateur harmonique amorti, on a besoin de deux variables. La quantité de mouvement P et la position R. En mécanique. Pour un oscillateur harmonique amorti, l'énergie mécanique décroît au cours du temps. Ce qu'il y a dissipation. Or ici, le système est isolé, ce qui signifie que l'énergie est constante. Par application du premier principe. Par conséquent, il doit exister une autre forme d'énergie qui va croître au cours du temps pour compenser la perte d'énergie mécanique. Cette autre forme d'énergie va dépendre d'une variable qui n'est pas une variable associée au mouvement du point matériel.

Notes

Summary

9m 48s

Oscillateur harmonique amorti : système isolé



- Variables d'état : $\{\, \boldsymbol{P},\ \boldsymbol{r},\ X_0 \,\}$
- Energie (cinétique + interne) :

$$E(\boldsymbol{P}, \boldsymbol{r}, X_0) = \frac{\boldsymbol{P}^2}{2M} + U(\boldsymbol{r}, X_0)$$

- Energie interne (pot. élastique + autre) :

$$U(\boldsymbol{r}, X_0) = \Phi\,(\boldsymbol{r}) + U(\boldsymbol{0}, X_0)$$

$$\Phi\,(\boldsymbol{r}) = \frac{1}{2}\, k\, \boldsymbol{r}^2$$

Thermodynamique

Cette autre variable extensive, dont on ne connaît pas la nature pour l'instant et qu'on va essayer d'identifier à la fin de cet exemple. C'est la variable x zéro, on la dénote x zéro. l'Énergie de cet oscillateur harmonique. Une fonction d'état. Fonction des variables d'état p, r et x0. Elle est constituée de deux contributions. La première, c'est p carré sur deux m, c'est l'énergie cinétique. La deuxième, c'est ud RX0, c'est l'énergie interne. Cette énergie interne est elle même constituée de deux contributions. On a d'abord une énergie potentielle élastique fi de r qui est égale à une demi de k r carré. C'est un résultat bien connu de mécanique et on a ensuite une autre contribution qui est de zéro zéro. Donc cette contribution dépend essentiellement de cette autre variable. X zéro.

Notes

Summary

11m 16s

Oscillateur harmonique amorti : bilan d'énergie

- Système isolé : $\dot{E} = 0$
- Dérivée temporelle de l'énergie :

$$\dot{E} = \boldsymbol{v} \cdot \dot{\boldsymbol{P}} + \frac{\partial U(\boldsymbol{r}, X_0)}{\partial \boldsymbol{r}} \cdot \dot{\boldsymbol{r}} + \frac{\partial U(\boldsymbol{r}, X_0)}{\partial X_0} \dot{X}_0$$

- Dérivées partielles :

$$\frac{\partial U(\boldsymbol{r}, X_0)}{\partial \boldsymbol{r}} = \frac{d\Phi(\boldsymbol{r})}{d\boldsymbol{r}} = \frac{d\left(1/2\, k\, \boldsymbol{r}^2\right)}{d\boldsymbol{r}} = k\,\boldsymbol{r}$$

$$\frac{\partial U(\boldsymbol{r}, X_0)}{\partial X_0} \equiv Y_0$$

- Bilan d'énergie : $\boldsymbol{v} \equiv \dot{\boldsymbol{r}}$

$$\left(\dot{\boldsymbol{P}} + k\,\boldsymbol{r}\right) \cdot \boldsymbol{v} + Y_0\, \dot{X}_0 = 0$$

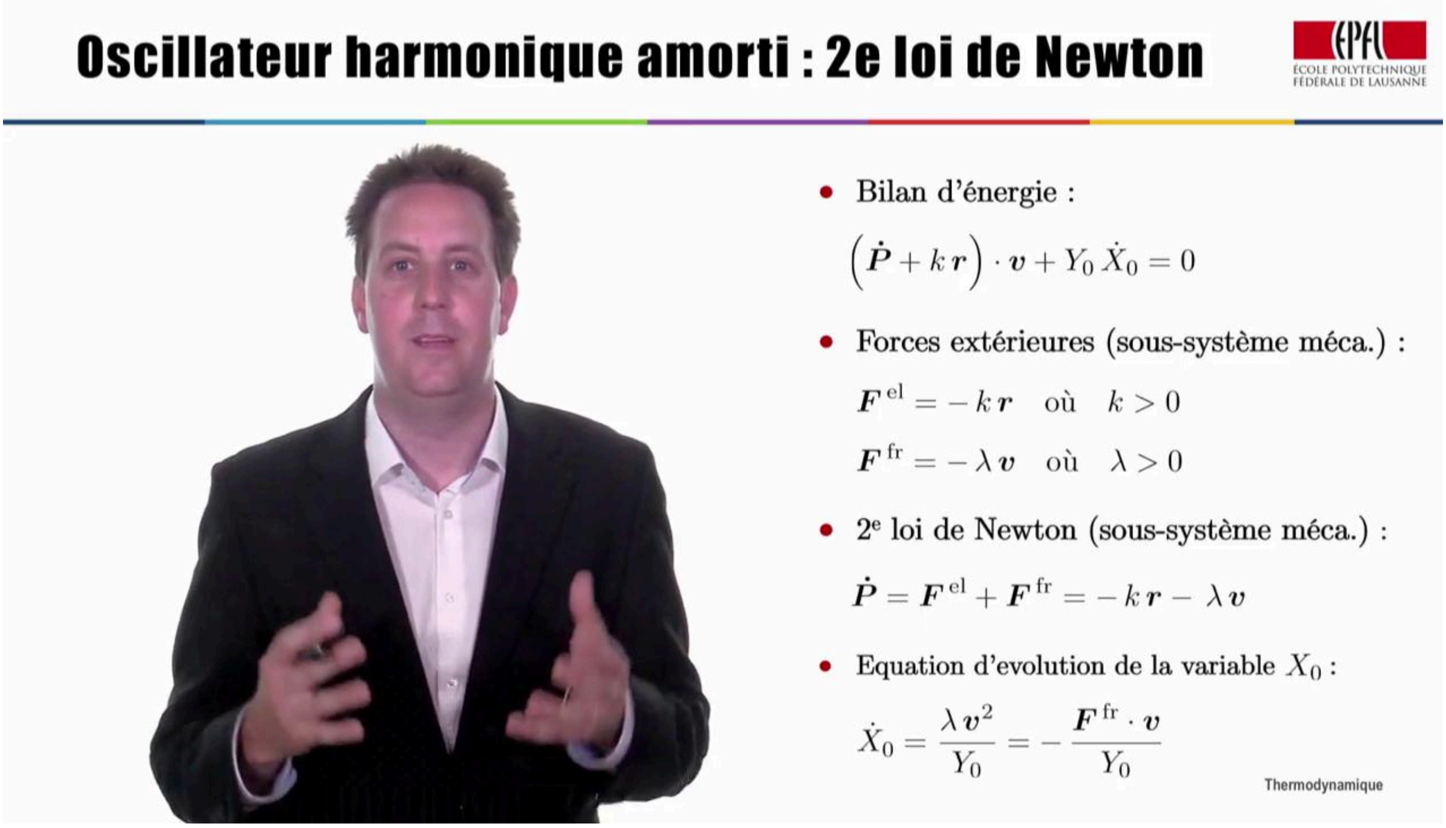
Thermodynamique

Le système étant isolé par application du premier principe. l'Énergie est une constante, donc la dérivée par rapport au temps de l'énergie au point est nulle. Cette dérivée temporelle de l'énergie. On peut la développer puisque l'énergie est une fonction d'état qui dépend de la quantité de mouvement de la position R et de la variable x0. Le point est donc constitué de trois termes. Le premier terme, c'est la dérivée de l'énergie par rapport à la quantité de mouvement, c'est à dire la vitesse produit scalaire avec la dérivée par rapport au temps de la quantité de mouvement p. Le deuxième terme. C'est la dérivée partielle de l'énergie par rapport à la position R. Qui est égal à la dérivée partielle d'énergie interne par rapport à la position R produit scalaire avec R. Pour le troisième terme, c'est la dérivée partielle de l'énergie par rapport à zéro qui est égale à la dérivée partielle d'énergie interne par rapport à x0 XX0 point maintenant examinée d'un peu plus près. Les dérivées partielles qui apparaissent dans cette expression de la dérivée temporelle de l'énergie. Tout d'abord, la dérivée partielle de l'énergie interne par rapport à la position est égale à la dérivée totale.

Notes

Summary

12m 19s

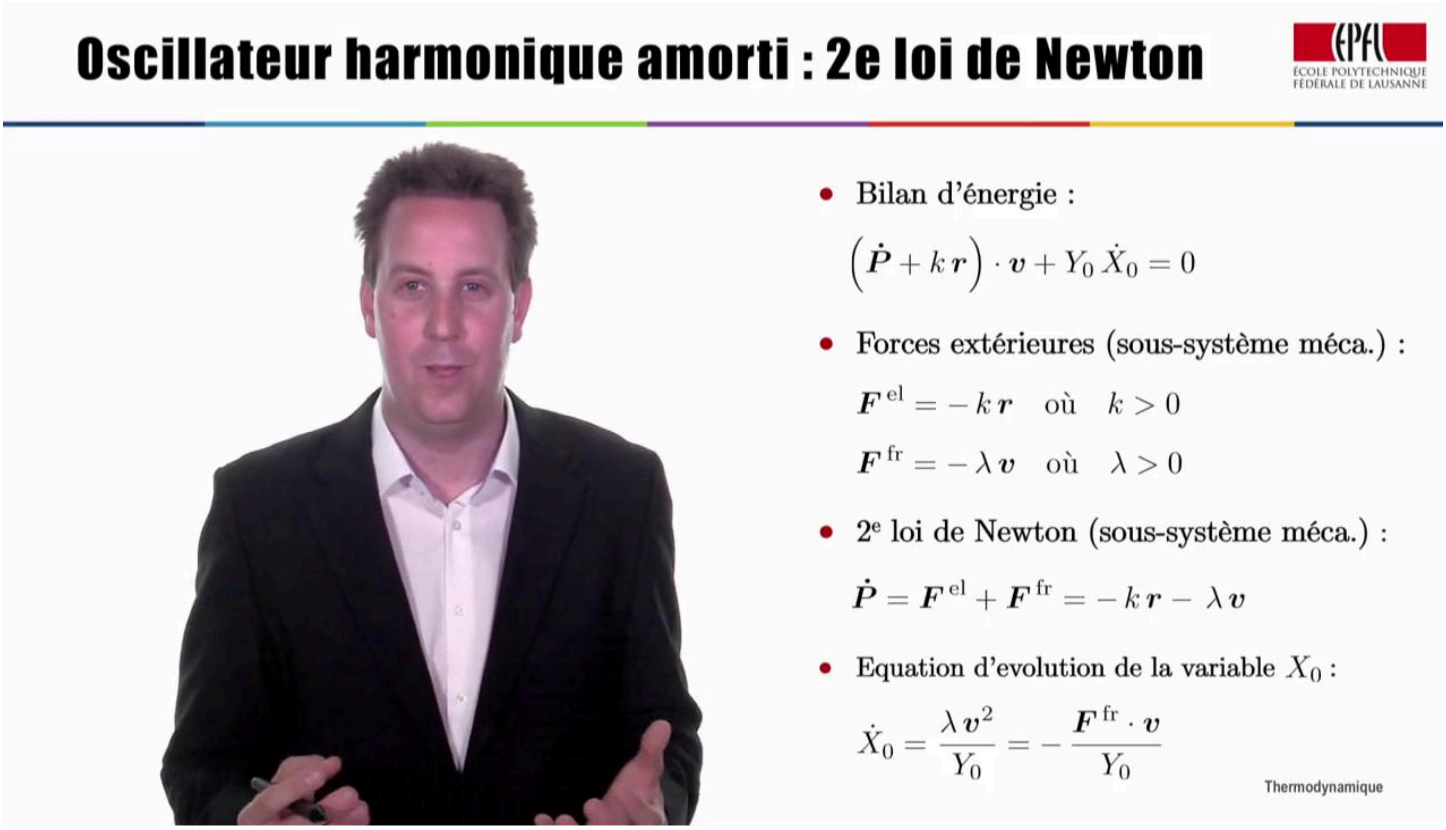


De l'énergie potentielle élastique filaire par rapport à la position R. l'Énergie potentielle élastique. C'est une demie de carrière car on peut mettre le facteur une demie, le facteur K en évidence. Il nous reste la dérivée de R carré par rapport à R qui vaut tout simplement deux r le facteur une demie. Le facteur deux se simplifie. Il nous reste donc qu'à R. Et puis, d'après la convention d'écriture qu'on a choisi, la grandeur intensive I zéro et la grandeur conjuguée à la grandeur extensive qui est une variable d'état qui est x zéro. De plus, en utilisant le fait que la vitesse est la dérivée temporelle de la position. On peut réécrire l'expression de la dérivée temporelle de l'énergie. Qui est nul. Est ce que le système est isolé ? Sous la forme suivante. C'est p point plus scalaire. Produit scalaire avec la vitesse plus I0X 0.0. Afin de détailler cette équation de bilan d'énergie, on doit à présent considérer le sous système mécanique constitué du point matériel. Ce sous système mécanique et sujet à des forces extérieures. Ces forces extérieures sont la force élastique k. R ou k est définie positive. C'est la constante de rappel du ressort.

Notes

Summary

13m 39s

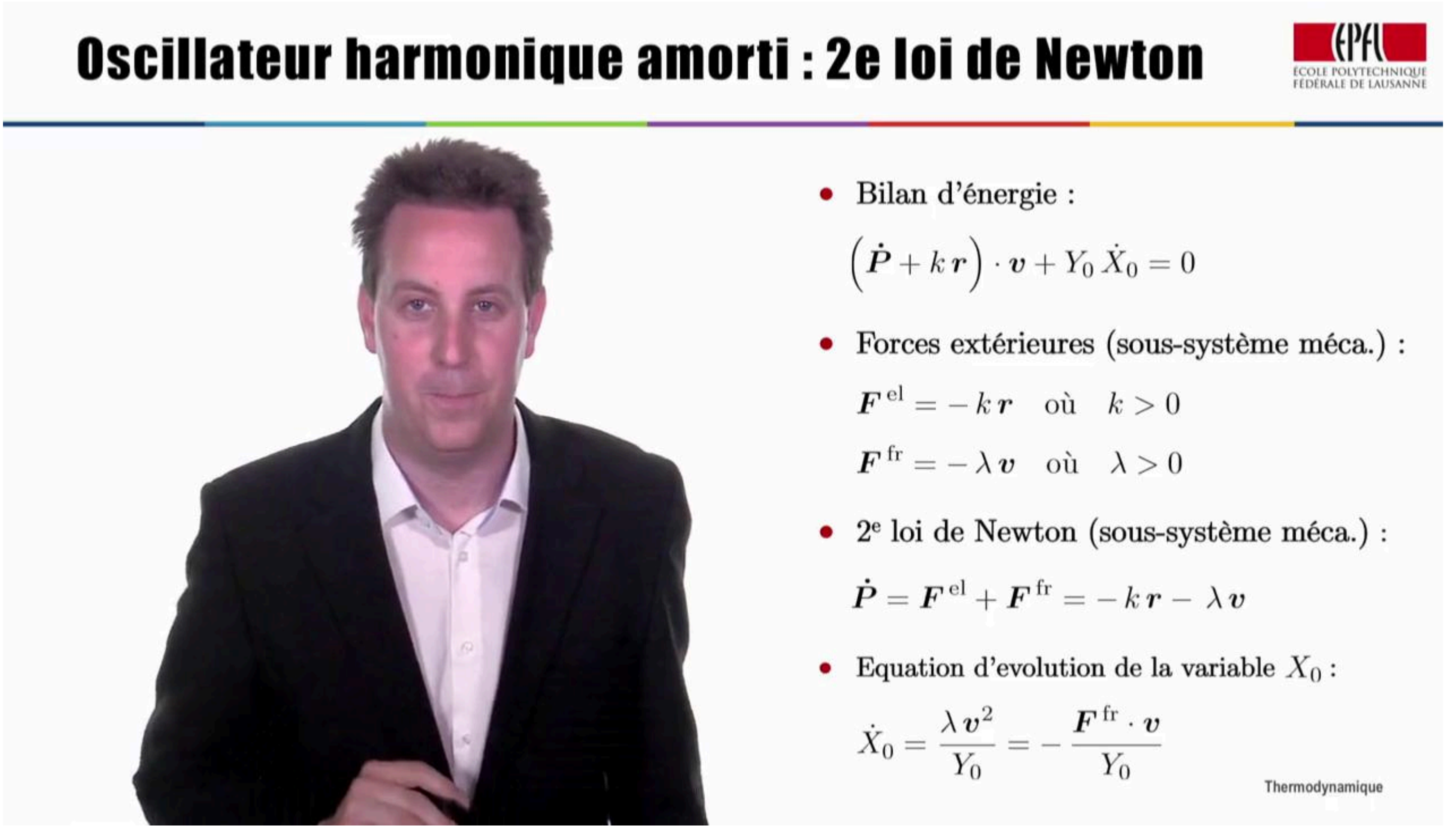


C'est également la force de frottement visqueux qui est de la forme lambda. V ou lambda est défini positif. On est ici en régime laminaire. Il est important de mentionner que ces forces sont des forces extérieures au sous système mécanique, même si c'est des forces intérieures au système thermodynamique. Mais ici, pour appliquer la deuxième loi de Newton, il y a le théorème du centre de masse appliqué à un point matériel. On considère que ces forces s'appliquent sur les sous systèmes mécaniques. Elles sont donc considérées comme des forces extérieures. La deuxième loi de Newton dit la chose suivante. La dérivée temporelle de la quantité de mouvement p points est égale à la somme des forces extérieures, c'est à dire de la force élastique arrière et de la force de frottement. On substitue donc cette expression de p point dans l'expression du bilan d'énergie. Le terme en arrière se simplifie avec le terme en carrière et il nous reste un terme en moins lamda v. Car ce terme au moins lambda v carré, on peut le passer dans le membre de droite. Et ensuite on peut diviser l'équation par i zéro et ceux qu'on obtient. C'est une équation d'évolution de la variable x zéro qui est de la forme suivante x zéro point est égal à lambda v carré sur i zéro.

Notes

Summary

15m 15s



Compte tenu du fait que la force de frottement est définie comme moins élevée, on obtient donc moins le produit scalaire de la force de frottement avec la vitesse divisée par i zéro de la mécanique. On sait que le produit scalaire de la force de frottement avec la vitesse, c'est la puissance dissipée, la puissance mécanique dissipée à l'intérieur du système. S'il y a dissipation, ça veut dire qu'il y a échauffement. Donc le système, intuitivement, devrait dépendre de la température. La température est une grandeur intensive. On a ici dans cette équation une grandeur intensive qu'on ne connaît pas. Cette grandeur intensive, c'est la grandeur I zéro, on dit, on verra dans la suite de ce cours qui zéro est précisément la température. Zéro est la température et la variable extensive conjuguée à y zéro. C'est ce qu'on appelle en thermodynamique l'entropie. Comme il est vrai que zéro qui est la température est défini positif, que lambda est positif et que v carré est positif. Ceci implique que x0 point est défini positif. En d'autres termes, l'entropie va croître dans ce système isolé à cause de la dissipation. Et ceci est au cœur du deuxième principe de la thermodynamique qu'on va aborder dans la prochaine suite, donc au prochain épisode.

Notes

Summary

16m 42s