

Deuxième principe



- Température et entropie
- Deuxième principe
- Réversibilité et irréversibilité
- Renversement du temps
 - Oscillateur harmonique

Thermodynamique

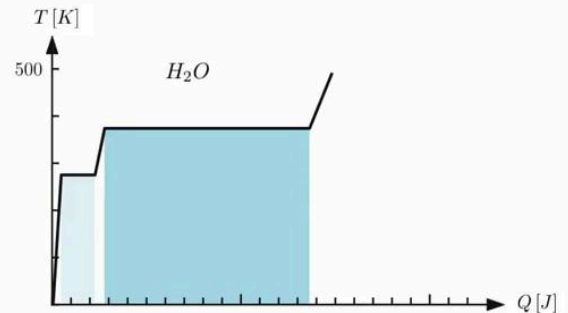
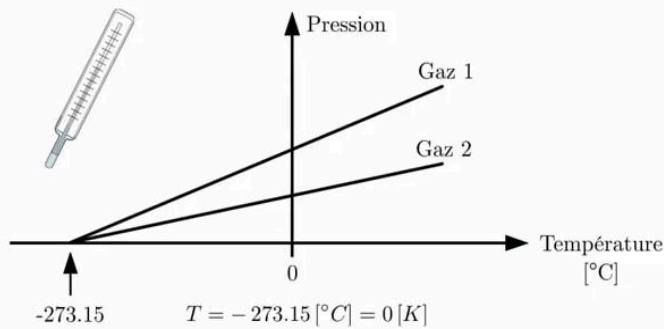
Bonjour et bienvenue à ce mur de la thermodynamique. Cette leçon est consacrée au deuxième principe. Dans un premier temps, on va introduire de manière intuitive deux notions centrales en thermodynamique. Il s'agit de la température et de l'entropie grâce à l'entropie. On sera ensuite en mesure de définir, d'énoncer le deuxième principe de la thermodynamique. Ce deuxième principe nous pousse à distinguer deux types de processus différents. D'une part des processus réversibles et d'autre part des processus irréversibles. On verra que cette distinction entre réversibilité et irréversibilité est liée à une transformation physique fondamentale qu'on appelle le renversement du temps. On va considérer un exemple particulier qui est celui de l'oscillateur harmonique.

Notes

Summary



0m 05s



Thermodynamique

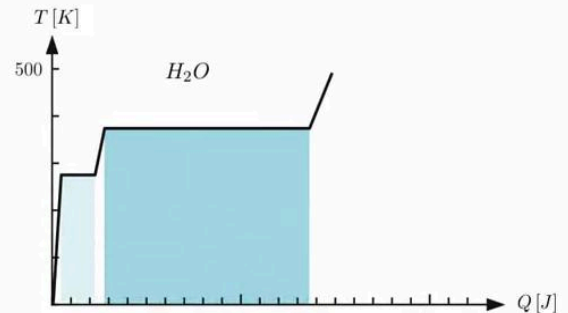
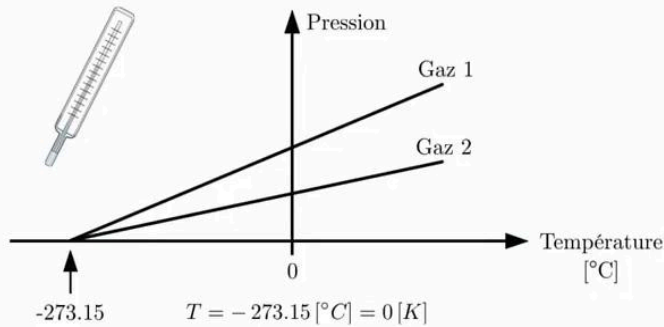
La température est une notion physique très intuitive. Si on prend par exemple de l'eau et qu'on touche cette eau, et bien on peut rapidement statuer sur la sensation qu'on a de cette eau, à savoir si elle est glacée, si elle est froide, si elle est tiède, si elle est chaude ou si elle est bouillante. On peut donc ordonner ces sensations selon une échelle. Cette échelle, c'est l'échelle des températures. Alors il existe plusieurs types d'unités pour la température. L'une des unités les plus courantes, c'est les degrés Celsius, qui sont définis de la manière suivante. Zéro degré Celsius. C'est la température de fusion de la glace à pression standard et 100 degrés Celsius. C'est la température d'ébullition de l'eau à pression standard. Il existe d'autres unités, comme par exemple les degrés Fahrenheit qui sont plus utilisés outre-Atlantique, et puis l'unité fondamentale du Système international d'unités du système. Ainsi, pour la température, c'est le kelvin. Pour définir le kelvin, on va considérer deux gaz différents qui sont suffisamment dilués. Les gaz dilués ont une propriété intéressante, à savoir que leur pression dépend linéairement de leur température.

Notes

Summary



1m 04s



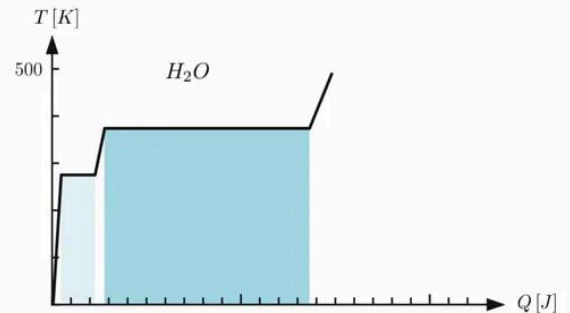
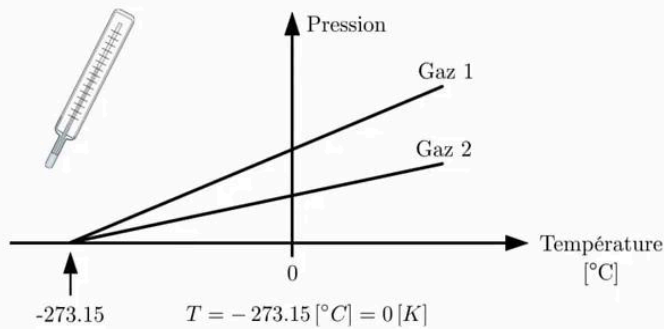
Thermodynamique

Donc, si on représente l'état de ces gaz sur un diagramme pression température, on va pour ces deux gaz et de gaz deux avoir deux droites. C'est de droite. On peut les extrapoler vers des températures inférieures. Et c'est de droite que vont finir par se couper en un point dont la pression est nulle et dont la température vaut moins de 100 septante 3,15 degrés Celsius. Cette température, c'est la température du zéro absolu qui correspond à l'origine de l'échelle des Kelvin. Il s'agit donc de zéro kelvin. Une variation d'un degré Celsius correspond à une variation d'un kelvin. La température est bien entendu une grandeur fondamentale dont on a besoin pour parler de phénomènes thermiques. La question qu'on peut se poser, c'est de savoir si on n'a pas besoin également d'une autre grandeur, d'une grandeur extensive. Pour répondre à cette question. On va considérer qu'on prend un cube de glace et ce cube, on va le chauffer. Initialement, il est proche du zéro absolu. On le chauffe progressivement, donc on lui fournit de la chaleur et sa température va augmenter linéairement avec la chaleur. C'est ce qu'on voit ici sur ce diagramme température chaleur. C'est ce segment qui se trouve là.

Notes

Summary





Thermodynamique

La température augmente linéairement jusqu'à une température, seuil qui correspond à la température de fusion de la glace. Et si on continue à fournir de la chaleur à ce bloc de glace, eh bien sa température va rester constante. C'est cette température de fusion. Durant ce processus, le bloc de glace va fondre, donc il va se transformer en eau. Ensuite si on continue à chauffer ce bloc de glace. La température va augmenter linéairement avec la chaleur qu'on fournit. C'est ce deuxième segment ici, jusqu'à atteindre une deuxième température, seuil qui est la température d'ébullition de l'eau. Et ensuite, si on continue à fournir de la chaleur, eh bien l'eau va progressivement se transformer en vapeur d'eau. Ce qui va être intéressant de retenir sur ce diagramme, c'est qu'on a essentiellement deux paliers qui correspondent à une transition de phase. C'est à dire que H_2O passe de l'état solide, c'est à dire la glace à l'état liquide, c'est à dire l'eau et les eaux passent de l'état liquide, c'est à dire l'eau à l'état gazeux, c'est à dire la vapeur d'eau. Cette transition de phase s'opère à température constante. Par conséquent, il va falloir une autre grandeur que la température pour pouvoir caractériser cette transition de phase.

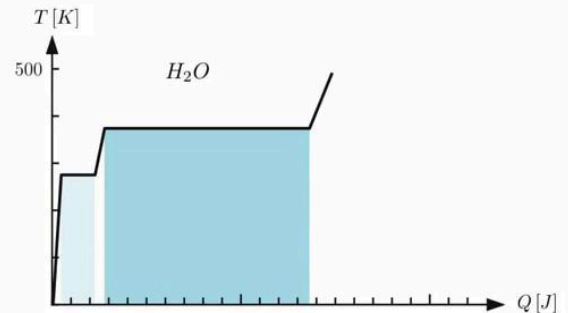
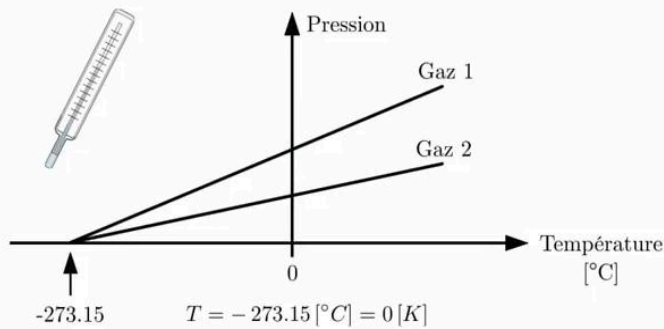
Notes

Summary



3m 59s

Température et entropie



Thermodynamique

Il y a bien quelque chose qui se passe. La substance change de comportement, elle change d'aspect. Pour pouvoir modéliser ceci. La grandeur qu'on doit introduire, c'est une grandeur extensive. Cette grandeur extensive est la grandeur qui est conjuguée à la température. Il s'agit de l'entropie. Cette entropie, on l'a déjà rencontrée. Lorsqu'on a traité de la thermodynamique de l'oscillateur harmonique, on a vu qu'on devait introduire une nouvelle grandeur extensive qui était une variable d'état du système. Et cette grandeur, on l'a identifiée à la fin de cette analyse de l'oscillateur harmonique à l'entropie. L'entropie est donc une grandeur fondamentale en thermodynamique et il se trouve que l'entropie est au cœur même de du deuxième principe de la thermodynamique.

Notes

Summary



5m 20s

Deuxième principe



- Deuxième principe :

Il existe une fonction d'état scalaire extensive entropie S

- Condition d'évolution :

$$\dot{S} = \Pi_S \geq 0 \quad (\text{système adiabatiquement fermé})$$

Taux de production d'entropie : Π_S

- Condition d'équilibre :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S = S_{\max} \quad (\text{système isolé})$$

Entropie maximale : S_{\max}

- Bilan d'entropie :

$$\dot{S} = \Pi_S + I_S \quad (\text{système fermé})$$

Taux d'échange d'entropie : I_S

Thermodynamique

Ce deuxième principe de la thermodynamique s'énonce de la manière suivante. Pour tout système thermodynamique, il existe une fonction d'état qui est scalaire et extensive, qu'on appelle l'entropie et qu'on dénote par la lettre S . Cette entropie satisfait deux conditions. Tout d'abord une condition d'évolution lorsque le système est adiabatique fermé, c'est à dire lorsqu'il n'y a pas d'échange de chaleur entre le système et l'extérieur. Dans ce cas, la cause de la variation de l'entropie la cause de la dérivée temporelle de l'entropie. C'est une cause qui est antérieure au système. C'est le taux de production d'entropie. On parle aussi de taux de production interne d'entropie qu'on va dénoter par Π_S . Et cette condition d'évolution c'est que Π_S peut être positif, il peut être nul. Mais jamais au grand jamais Π_S ne sera négatif. La deuxième condition, c'est la condition d'équilibre du système. Pour un système isolé, c'est à dire quand il n'y a aucune interaction entre le système et l'extérieur. Pour un tel système, si on attend suffisamment longtemps, l'entropie va tendre vers une valeur maximale qu'on appelle S_{\max} . En termes mathématiques, c'est la limite lorsque le temps tend vers l'infini de l'entropie.

Notes

Summary



Deuxième principe



- Deuxième principe :

Il existe une fonction d'état scalaire extensive entropie S

- Condition d'évolution :

$$\dot{S} = \Pi_S \geq 0 \quad (\text{système adiabatiquement fermé})$$

Taux de production d'entropie : Π_S

- Condition d'équilibre :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S = S_{\max} \quad (\text{système isolé})$$

Entropie maximale : S_{\max}

- Bilan d'entropie :

$$\dot{S} = \Pi_S + I_S \quad (\text{système fermé})$$

Taux d'échange d'entropie : I_S

Thermodynamique

Cette entropie maximale, S_{\max} , doit être compatible avec les contraintes qui sont imposées sur le système, comme par exemple le fait que le système soit constitué de sous systèmes qui sont séparés par des parois de nature diverses. Il est également utile d'introduire un bilan d'entropie pour un système fermé, c'est à dire lorsqu'il y a échange de chaleur entre le système et l'extérieur. Dans ce cas, il existe deux causes pour la variation de l'entropie au cours du temps. La première cause, on la connaît déjà, c'est le taux de production d'entropie qui est interne au système. Et la deuxième cause, c'est un taux d'échange d'entropie entre le système et l'extérieur. Qu'on dénote i . De s . Ce taux d'échange d'entropie peut être positif. Il peut être nul ou il peut être négatif.

Notes

Summary



7m 39s



- Processus réversible :

$$\Pi_S = 0 \quad (\text{état initial} \leftrightarrow \text{état final})$$

- Processus irréversible :

$$\Pi_S > 0 \quad (\text{état initial} \rightarrow \text{état final})$$

Thermodynamique

Le deuxième principe nous permet de distinguer entre deux types de processus des processus réversibles d'une part, et des processus irréversible d'autre part. Les processus réversibles sont caractérisés par le fait que le taux de production interne d'entropie de Hess est nul. Qu'est ce que cela signifie ? Ça signifie qu'on peut inter changer les état initial et final en d'autres termes. Il existe pour tout processus réversible un processus inverse pour lequel l'état initial correspond à l'état final du processus de départ et l'état final correspond à l'état initial du processus de départ. Considérons un exemple. Dans l'état initial, on a un singe qui se trouve à côté d'un dispositif mécanique et on voit que sur ce dispositif mécanique, la masse se trouve initialement en haut. Le processus est le suivant le singe actionne la manivelle, ce qui fait descendre la masse. Et dans l'état final, la masse se trouve en bas. Ceci est clairement un processus irréversible puisqu'on aurait pu commencer par la droite ou la masse se trouve en bas. Le processus réversible aurait été le fait que le singe actionne la manivelle en sens inverse, ce qui fait monter la masse qui dans l'état final se trouverait en haut.

Notes

Summary



8m 41s



- Processus réversible :

$$\Pi_S = 0 \quad (\text{état initial} \leftrightarrow \text{état final})$$

- Processus irréversible :

$$\Pi_S > 0 \quad (\text{état initial} \rightarrow \text{état final})$$

Thermodynamique

Il existe des processus réversibles. Il existe aussi des processus irréversibles. Les processus irréversibles sont définis de la manière suivante. Le taux de production d'entropie est positif. Qu'est-ce que cela signifie ? Ça signifie qu'on ne peut pas changer l'état initial et l'état final. Si on a un processus irréversible qui va d'un état initial à l'état final, il ne va pas exister de processus inverse qui irait de l'état final à l'état initial qui serait le nouvel état final. Prenons un exemple, un autre exemple mécanique. Le singe se trouve à côté d'un cube qui initialement est un beau cube bien géométrique. Le processus est le suivant : le singe s'assoit sur le cube, il s'assoit sur le cube et il va par conséquent écraser le cube. Et dans l'état final, le cube est complètement écrasé, il est déformé, le singe se trouve à côté. Ce processus est clairement un processus irréversible. Pourquoi ? Eh bien, le processus inverse, s'il existait, correspondrait au fait que le singe monte sur le cube déformé et abîmé. Et miraculeusement, ce cube se reforme tel qu'il ressemble au cube qu'on avait pour l'autre processus au départ. Ceci est clairement de la science-fiction. Cela ne va jamais se produire en physique et donc le processus se déroule naturellement uniquement de la gauche vers la droite. C'est donc bien un processus irréversible.

Notes

Summary





- Renversement du temps :

$$T : t \rightarrow -t$$

- Système adiabatiquement fermé : $P_Q = 0$

$$\dot{S} \rightarrow -\dot{S} \quad \text{et} \quad \Pi_S \rightarrow -\Pi_S$$

- Processus réversible :

$$\Pi_S = 0 \quad (\text{invariant})$$

- Processus irréversible :

$$\Pi_S > 0 \quad (\text{pas invariant})$$

Thermodynamique

La transformation physique d'un renversement dans le temps permet de distinguer les processus réversibles des processus irréversibles. Cette transformation de renversement du temps est la suivante. Et l'on voit le tenter sur lui-même. Il est envoyé sur moitié. On va à présent considérer un système qui est adiabatique, fermé. Qu'est-ce que ça signifie ? Ça signifie que la puissance thermique P_Q est nulle. Par conséquent, si on applique le renversement du temps à la dérivée temporelle de l'entropie qui est égale à ds sur dt , on va avoir été sur moitié. Donc dt sur moins dt , ce qui implique qu'on va envoyer s point. Sur ce point, et puisque le système est adiabatique fermé, c'est à dire que P_Q égale zéro et bien est ce point va être égal au taux de production d'entropie π de s . Donc on va envoyer π ds sur moins π ds . Si on a un processus réversible, par définition, Π_S est égal à zéro. Cela signifie qu'un processus réversible est invariant par renversement dans le temps. Si on a un processus irréversible, par définition Π_S est positif. Comme bidasse, bien sûr, moins pittoresque. Le signe change donc. Le processus irréversible n'est pas invariant par renversement dans le temps.

Notes

Summary



Oscillateur harmonique

- Position :

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}$$

- Vitesse :

$$\mathbf{v} \rightarrow -\mathbf{v}$$

- Accélération :

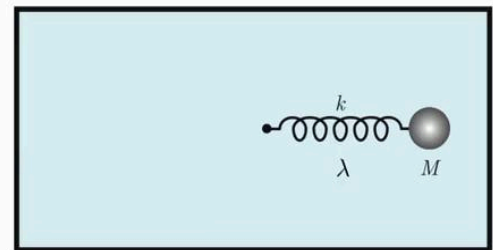
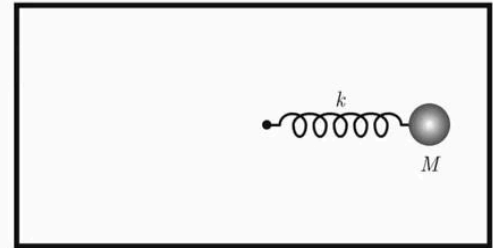
$$\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}$$

- Oscillateur harmonique (réversible) :

$$-k\mathbf{r} = M\mathbf{a} \quad \rightarrow \quad -k\mathbf{r} = M\mathbf{a}$$

- Oscillateur harmonique amorti (irréversible) :

$$-k\mathbf{r} - \lambda\mathbf{v} = M\mathbf{a} \quad \rightarrow \quad -k\mathbf{r} + \lambda\mathbf{v} = M\mathbf{a}$$



Thermodynamique

On va maintenant considérer un exemple particulier d'application de cette notion de renversement dans le temps. Cet exemple, c'est l'oscillateur harmonique. Considérons dans un premier temps la manière dont les grandeurs cinématiques sont transformées par renversement dans le temps. Ma position va sur la position R d'assurer. La vitesse est définie comme la dérivée de la position par rapport au temps dt sur moi dt donc v qui adhère sur dt il rassure. Moi V . Troisième grandeur, c'est l'accélération. L'accélération c'est la dérivée de la vitesse par rapport au temps dv sur dt . La vitesse va sur elle même se base sur avait t va sur moitié. Par conséquent, moins sur mois ça fait plus. Ce qui signifie que l'accélération est envoyée sur elle même. On va considérer deux types de oscillateur harmonique. Dans un premier temps, on prendra un oscillateur harmonique non amorti qu'on voit ici sur cette image, sur l'image du haut et sur cette image. Cet oscillateur harmonique est constitué d'un point matériel M relié à un ressort de constante élastique. Quand. L'équation du mouvement de cet oscillateur harmonique est la suivante. La force qui agit sur ce point matériel, c'est la force élastique.

Notes

Summary



13m 36s

Oscillateur harmonique

- Position :

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}$$

- Vitesse :

$$\mathbf{v} \rightarrow -\mathbf{v}$$

- Accélération :

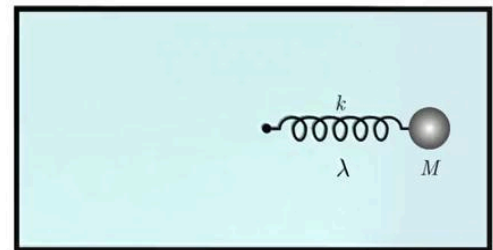
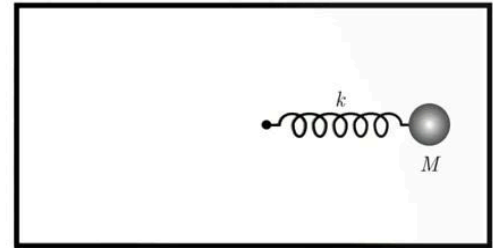
$$\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}$$

- Oscillateur harmonique (réversible) :

$$-k \mathbf{r} = M \mathbf{a} \quad \rightarrow \quad -k \mathbf{r} = M \mathbf{a}$$

- Oscillateur harmonique amorti (irréversible) :

$$-k \mathbf{r} - \lambda \mathbf{v} = M \mathbf{a} \quad \rightarrow \quad -k \mathbf{r} + \lambda \mathbf{v} = M \mathbf{a}$$



Thermodynamique

Donc on aura dans le membre de gauche la force élastique qui est du type $k r$. Dans le membre de droite, on aura le produit de la masse pour l'accélération qui est invariante par renversement dans le temps. S'ajuster aux paramètres et la position et l'accélération sont également invariants par renversement dans le temps, ce qui signifie que l'équation du mouvement. Est envoyée sur elle même. Elle est donc invariante par renversement dans le temps. Donc l'évolution de cet oscillateur harmonique est une évolution réversible. Deuxième cas de figure, on prend un oscillateur harmonique amorti. Donc on a un point matériel de masse M qui est lié à un ressort de constante élastique K qui se trouve dans un milieu visqueux. Ce milieu visqueux est un fluide qui va exercer une force de frottement visqueuse. Je suppose qu'on est en régime laminaire, donc cette force de frottement visqueuses va être de la forme moins λv . Donc on doit ajouter ce terme moins λv dans le membre de gauche de l'équation du mouvement, et ensuite on applique la transformation de renversement du temps. Les autres termes sont invariants. Par contre, le terme est associé à la force de frottement, dépend de la vitesse et la vitesse change de signe par remplacement dans le temps.

Notes

Summary



Oscillateur harmonique

- Position :

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}$$

- Vitesse :

$$\mathbf{v} \rightarrow -\mathbf{v}$$

- Accélération :

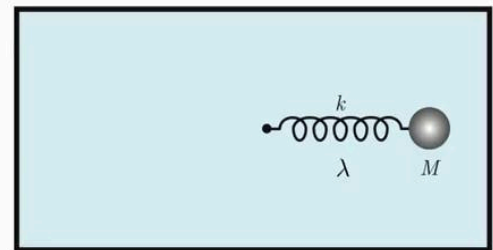
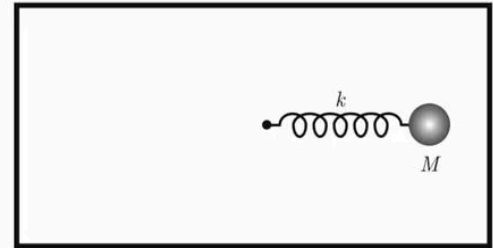
$$\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{a}$$

- Oscillateur harmonique (réversible) :

$$-k\mathbf{r} = M\mathbf{a} \quad \rightarrow \quad -k\mathbf{r} = M\mathbf{a}$$

- Oscillateur harmonique amorti (irréversible) :

$$-k\mathbf{r} - \lambda\mathbf{v} = M\mathbf{a} \quad \rightarrow \quad -k\mathbf{r} + \lambda\mathbf{v} = M\mathbf{a}$$



Thermodynamique

Donc moins la marée devient, plus. Ce qui signifie que l'équation du mouvement est différente lorsqu'on applique la transformation de renversement dans le temps. Donc on a affaire à un système dont l'évolution est irréversible et irréversible, puisque l'amplitude du mouvement de cet oscillateur harmonique va diminuer au cours du temps, ce qui n'était pas le cas pour l'oscillateur harmonique non amorti.

Notes

Summary



16m 26s