

Support de cours

Cours:

UNIL-123 Physique Expérimentale II

Vidéo:

Lesson10-UNIL-123 Physique expérimentale II

Concepts (extraits des sous-titres générés automatiquement) :

Besoin de force mécanique. Seule chose. Petit élément de travail. Cube d'eau chaude. État d'un système. Pressions extérieures. Moteurs thermiques. Verre d'eau froide. Force mécanique. Source froide. Variation du volume. Cube d'eau froide. Premier semestre de physique. Systèmes physiques. Produit d'échange.



[vers la recherche de séquences vidéo](#)
(dans UNIL-123 Physique Expérimentale II.)



[vers la vidéo](#)

Center for Digital Education. Plus de matériel de soutien pédagogique ici :

<https://www.epfl.ch/education/educational-initiatives/cede/educational-technologies-gallery/boocs-en/>

3.4 Travail et chaleur

Ces sous-titres ont été générés automatiquement Aujourd'hui on a un chapitre intéressant, comme chaque chapitre important. On va parler de travail et de chaleur. Quand vous avez un système fermé, donc ça veut dire qu'il ne peut pas changer de matière avec l'extérieur, la seule chose que le système peut changer avec son environnement, c'est du travail ou de la chaleur. Punk Schluss. Donc c'est important de connaître les deux, de savoir comment ils fonctionnent les deux, parce qu'on s'intéresse toujours à l'état d'un système, et pour changer d'état, bah ma foi, il doit gagner ou perdre de l'énergie. Et cette énergie, il y a seulement deux manières de l'échanger avec son environnement, chaleur ou travail. Alors ce qu'on aime bien, c'est les moteurs thermiques, on leur donne de la chaleur et ils nous rendent du travail. Ça arrive des fois aussi l'inverse, mais en général c'est dans ce sens-là que ça marche. Donc c'est très important, c'est très important pour la physique, pour comprendre comment fonctionnent les systèmes physiques, mais c'est aussi important pour notre monde, dans lequel on est. On a besoin de force mécanique, et la chaleur peut être considérée comme une force mécanique, c'est ce qu'on a commencé à découvrir, je pense, on va dire 17e siècle, mais 18e pas mal, et puis le 19e surtout, la machine à vapeur, la machine à vapeur a révolutionné le monde, comment on le voyait, et c'est comme ça qu'on a eu la révolution industrielle. Et bien si on veut comprendre comment fonctionnent, à fonctionner ces systèmes-là, qu'on fait une locomotive à vapeur, les pompes à valeur, la machine à vapeur on a commencé à l'utiliser pour pomper l'eau dans les mines en Angleterre, ça a permis d'aller plus profond d'avoir une exploitation plus importante. Le monde que vous

notes

résumé

0m 0s



3.4 Travail et chaleur

et moi vivons aujourd'hui est héritier de cette révolution industrielle, et la machine à vapeur est au coeur de la, de la révolution industrielle. On va aussi voir comment fonctionnent le moteur à explosion, qui aussi fait partie de la révolution industrielle.

notes

résumé

3.4.1 La force : manifestation fondamentale de la réalité

La nature des forces peut être diverse

- Mécanique
- Électrique
- Magnétique
- de surface

Description classique de la réalité:
toutes ces forces sont d'origine
électromagnétique

Comme elles sont modélisées par des lois spécifiques, ça a du sens de les distinguer, par exemple un bilan du travail d'un système pourrait être

$$W = W_e + W_F + W_U$$

Avec W_e le travail de la pression extérieure P_e , W_F lié au forces extérieures et W_U , les travaux des autres forces rassemblées sous le terme de "utiles"

Mais bien sûr que si on veut comprendre, on a commencé à utiliser ces machines, finalement, bien avant de tout comprendre, mais comment les avaient, on a voulu optimiser, pour optimiser, il a fallu les comprendre. Et c'est une partie la thermodynamique qui vont amener à la fin du XIXe siècle, au début du XXe à des réflexions, avec aussi l'électromagnétisme, qui vont amener à ce qu'on appelle la physique moderne, la physique quantique. Donc ça a été vraiment un échelon très très important du développement de la physique. Alors on va partir de choses, je fais toujours avec plaisir, je vous rappelle, votre premier semestre de physique, donc on va partir de quelque chose que vous avez eu dans votre premier semestre de physique, c'est la force, c'est quelque chose d'essentiel. On a besoin de la force pour comprendre ce qu'est le travail. Donc, dans la nature autour de nous, du moins quand on parle de manière classique, etc., il y a différents types de forces, force mécanique, force électrique, force magnétique, les forces de surface, c'est par exemple ce qui explique comment fonctionne une bulle de savon. Mais si on va plus profondément, on se rend compte que toutes ces forces-là, elles dépendent principalement de l'électromagnétisme. Donc ok, tout pourrait être concentré d'électromagnétisme, mais comme elles ont leurs lois spécifiques, en général, on les distingue. Donc quand on va regarder un système, on va essayer de regarder le travail qui peut fournir, ou éventuellement le travail qu'on lui a fourni, c'est quand même intéressant de séparer ces différentes forces, parce qu'elles ont des lois qui permettent de les séparer. Donc c'est pour ça que derrière, je vous ai dit la dernière fois, je vous ai déjà parlé du travail, on aime bien utiliser la lettre double V pour

notes

résumé

2m 34s



3.4.1 La force : manifestation fondamentale de la réalité

La nature des forces peut être diverse

- Mécanique
- Électrique
- Magnétique
- de surface

Description classique de la réalité:
toutes ces forces sont d'origine
électromagnétique

Comme elles sont modélisées par des lois spécifiques, ça a du sens de les distinguer, par exemple un bilan du travail d'un système pourrait être

$$W = W_e + W_F + W_U$$

Avec W_e le travail de la pression extérieure P_e , W_F lié au forces extérieures et W_U , les travaux des autres forces rassemblées sous le terme de "utiles"

le travail, ça vient de l'Allemand *Werk*, ou de l'Anglais *Work*, on ne dira pas. Et puis, ça vaut peut-être la peine dans les systèmes dont on parle, de faire la différence entre le travail qui vient des pressions extérieures, le travail qui vient des forces extérieures, donc forces extérieures, et ce qu'avec ma main, je suis en train d'appuyer sur ma pompe pour compresser l'air qu'il y a dans le cylindre. Et puis éventuellement, les forces qui sont liées à ce qu'on appellerait, des forces utiles, ce qui serait d'origine chimique, électromagnétique. Donc, on va parfois limiter ces choses-là. Dans les systèmes qu'on va utiliser, j'avais utilisé le nom de thermomécanique la dernière fois, on va s'intéresser surtout aux forces extérieures et à la pression, on ne va pas s'occuper de phénomènes dans lesquels, par exemple,

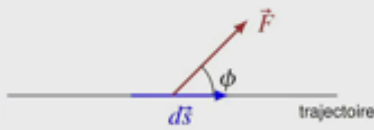
notes

résumé

3.4.2 Le travail d'une force mécanique

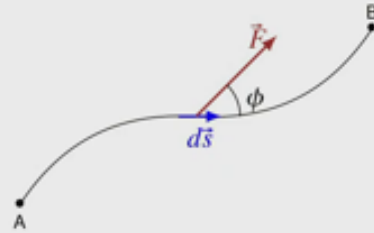
Le **travail** d'une force est l'**énergie** fournie par cette force lorsque son point d'application se **déplace**. L'objet subissant la force se déplace ou se déforme. Il est responsable de la variation de l'énergie cinétique du système qui subit cette force.

dW
 $2W$



$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

δW : travail (J)
 \vec{F} : force (N)
 $d\vec{s}$: déplacement infinitésimal (m)
 ϕ : angle entre $d\vec{s}$ et \vec{F}



$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_A^B F(s) \cos \phi(s) ds$$

l'électricité ou la chimie vont jouer un rôle important. Alors, le concept-clé, il y a deux concepts-clé aujourd'hui, le travail et la chaleur. Vous voyez, la dernière fois, si je me souviens bien, parce que j'ai pas juste réellé slide, mais j'ai plusieurs cours, donc ça m'arrive de me mélanger, mais on avait fait la différence entre la température et la chaleur. On avait vraiment fait cette différence. Là, vraiment, ce qui est important, aujourd'hui, ça va être le travail et, dans l'autre côté, la chaleur. Donc, premier semestre, le travail d'une force, c'est le produit scalaire entre la force et l'élément de déplacement. Dans ce cas-là, on l'appelle ds, ce n'est pas une surface, c'est un élément. On utilise souvent cette lettre s pour représenter un bout de trajectoire curviligne, donc, etc. Et puis, vous comprenez que la force est un vecteur, vous comprenez que le déplacement, c'est aussi un vecteur, mais vous comprenez aussi que le produit scalaire, c'est un scalaire. C'est pour ça que c'est le produit scalaire, donc ce n'est pas un vecteur. Donc le travail n'a pas d'orientation. Et puis là, on va utiliser vraiment la manière d'écrire en thermodynamique le petit élément de travail. On ne va pas lui mettre un D habituel. On ne va pas l'écrire comme ça. C'est juste une question d'écriture, c'est juste une question de convention, mais parce que c'est dès là, ou c'est dès là, ils sont réservés pour des choses qui sont des variables d'état. Et le travail n'est pas une variable d'état. Le travail, c'est un produit d'échange, c'est quelque chose qui va se passer entre un système et un autre. Par exemple, dans le petit dessin, là, peut-être que je suis en train de tirer sur un wagon, je ne suis pas en train de

notes

résumé

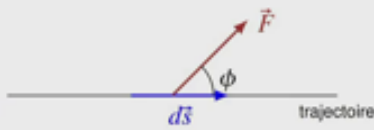
5m 34s



3.4.2 Le travail d'une force mécanique

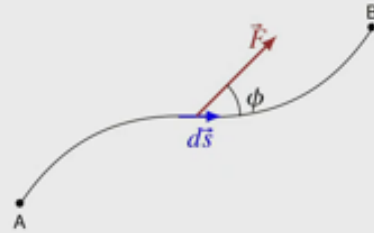
Le **travail** d'une force est l'**énergie** fournie par cette force lorsque son point d'application se **déplace**. L'objet subissant la force se déplace ou se déforme. Il est responsable de la variation de l'énergie cinétique du système qui subit cette force.

dW
 $2W$



$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

δW : travail (J)
 \vec{F} : force (N)
 $d\vec{s}$: déplacement infinitésimal (m)
 ϕ : angle entre $d\vec{s}$ et \vec{F}



$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_A^B F(s) \cos \phi(s) ds$$

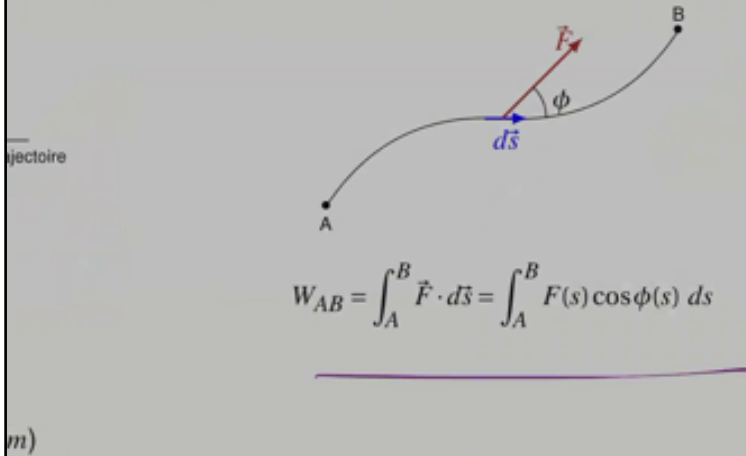
tirer dans le bon sens, mais un petit peu quand même dans le bon sens, puis il va se passer quelque chose. Et puis ça veut dire que c'est l'effort entre la puissance de traction, je ne sais pas si c'est moi ou vous, en train de tirer sur le wagon pour le faire avancer sur les rails, et puis le système wagon qui avance un peu d'un Delta S, etc. C'est un échange entre les deux systèmes. Et puis on va pouvoir intégrer ça sur une différente trajectoire, et j'ai juste écrit ça pour me rappeler le tellement bon semestre d'hiver que vous avez eu avec toute la mécanique que vous avez utilisée. Là, c'était juste, j'essaye de construire ce savoir sur quelque chose que vous avez probablement déjà vu et aussi probablement construit. On va dire la formule principale essentielle, c'est quand même celle-ci. Le petit élément de travail, c'est égal à la force fois la distance. Et donc, si vous faites le calcul, la force est des newton, donc vous allez les multiplier par des mètres, ça va être des newton mètres, et ça, ça donne une énergie. Ça, c'est aussi quelque chose qui est important que vous gardiez dans votre esprit. Le travail

notes

résumé

Force mécanique

est fournie par cette force lorsque son point d'application se déplace ou se déforme. Il est responsable de la variation de l'énergie subit cette force.



3.4.3 Le travail d'un ressort

Il faut exercer une force pour allonger le ressort.
L'énergie nécessaire à cette action est fournie par cette énergie peut être "emmagasinée" dans le ressort.
On parle alors d'énergie potentielle élastique.



$W =$

c'est de l'énergie. C'est l'énergie fournie par la force. Au système sur lequel il s'applique, que ce soit là dans un cas de mécanique, pour accélérer le petit wagon qui est peut-être sur des rails et puis vaincre les forces de frottement.

notes

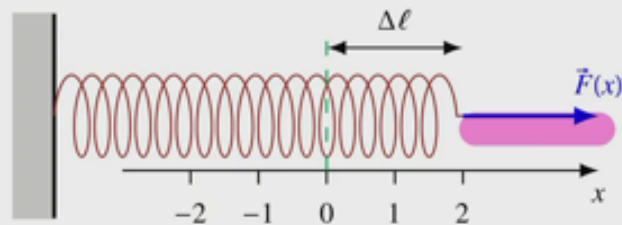
résumé

8m 56s



3.4.3 Le travail d'un ressort

Il faut exercer une force pour allonger ou raccourcir le ressort depuis sa position d'équilibre. L'énergie nécessaire à cette action est appelée travail. Si on reste dans le domaine élastique et cette énergie peut être "emmagasinée" par le ressort peut être "redonnée" à l'environnement: on parle alors d'énergie potentielle



$$W = \int_{x=0}^{x=\Delta\ell} \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_{x=0}^{x=\Delta\ell} kx \, dx = \frac{1}{2}k\Delta\ell^2$$

Une autre situation dans laquelle on peut parler d'un ressort, je ne sais pas si vous avez vu ça au premier semestre, mais dans un ressort, vous pouvez comprimer le ressort et le ressort va vous rendre cette force-là en se détendant. Ou l'inverse, si vous le tendez plus que son équilibre, il va vouloir vous ramener à la position de départ. Donc on a une force, la force avec la qu'on tire sur le ressort.

notes

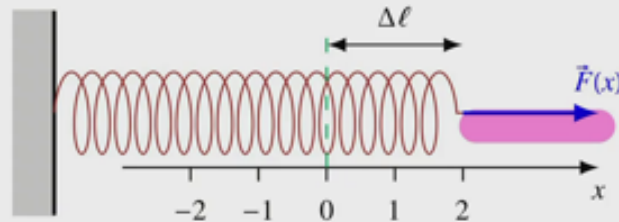
résumé

9m 20s



3.4.3 Le travail d'un ressort

Il faut exercer une force pour allonger ou raccourcir le ressort depuis sa position d'équilibre. L'énergie nécessaire à cette action est appelée travail. Si on reste dans le domaine élastique et cette énergie peut être "emmagasinée" par le ressort peut être "redonnée" à l'environnement: on parle alors d'énergie potentielle



$$W = \int_{x=0}^{x=\Delta\ell} \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_{x=0}^{x=\Delta\ell} kx \, dx = \frac{1}{2}k\Delta\ell^2$$

Et puis on a un déplacement parce que du moins le point d'application de la force et d'autres parties du ressort vont se déplacer et là on a la longueur du ressort qui va changer. Et là on peut aussi vous retrouver le même calcul de base de la force. La force fois le déplacement, égale le travail et puis dans un ressort, vous savez que la force du ressort est proportionnelle à l'extension ou la compression du ressort, c'est dépendant si on est en train de travailler en extension ou en compression, mais en tout cas il y a la rigidité du ressort qu'on va multiplier par déplacement et ça va être équivalent à la force et puis quand on intègre ça, on arrive à une formule, pas essentielle dans ce cours, c'est juste pour vous montrer un autre exemple de calcul de travail mais peut-être que vous l'avez déjà vu au premier semestre, on a le travail qui va être égal à une demi k delta L , delta L , c'est le déplacement au carré. Donc ça c'est

notes

résumé

10m 1s

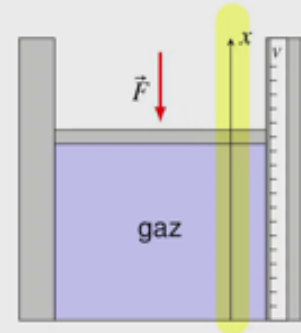


3.4.4 Le travail d'un piston contrôlé par une force extérieure

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s} = -F dx = -\frac{F}{S} S dx = -P_{ex} dV \quad (3.16)$$

$$W = -P_{ex} \int_{V_1}^{V_2} dV = -P_{ex} (V_2 - V_1) \quad (3.17)$$

- Avec W le travail, F la force extérieure, dx le déplacement du piston, S la surface du piston, V le volume du piston
- La pression est toujours positive!
- **Compression:** $\Delta V < 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V > 0$
- **Expansion:** $\Delta V > 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V < 0$



le travail pour un ressort. Et ben dans les situations dans lesquelles on va se trouver, on va avoir souvent du travail qui va venir de la compression ou de la décompression d'un gaz. Donc on dit à quoi est égal notre élément de travail, notre élément de travail est égal à la force fois le déplacement. La force, c'est la force qu'on va exercer sur le piston, le déplacement ça va être le déplacement du piston. Vous comprenez que le déplacement du piston va correspondre aussi à une variation du volume dans le piston, si je descends le piston, le volume dans le cylindre va être plus petit. Et puis, ce qui est intéressant c'est que la force, elle, vous pouvez la transformer en pression. C'est quoi une pression ? Une pression c'est une force divisée par une surface. Donc vous voyez que j'ai rajouté un S au numérateur et je n'ai rajouté un a au dénominateur, c'est fait que ça a aucune importance, mais ça me permet de transformer la force divisée par la surface en pression et puis il va rester la surface fois le petit élément d'infinitésimale, le déplacement infinitésimale et ça ça va faire une variation de volume. Et donc vous avez vu qu'on est parti avec des variables qui étaient typiquement du premier, votre chère, premier semestre et puis on arrive avec des variables qui concernent ce deuxième semestre qu'on parle de thermodynamique, ça veut dire que maintenant les variables, elles sont la pression et puis le ΔV . Personne n'a encore posé la question, peut-être vous avez vu, vous n'avez pas vu, il y a quand même une petite particularité. C'est ici, j'ai un signe moins. Ce signe moins il vient du moins des x parce que si vous voyez comment j'ai placé mon

notes

résumé

11m 21s

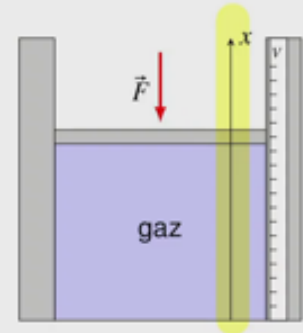


3.4.4 Le travail d'un piston contrôlé par une force extérieure

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s} = -F dx = -\frac{F}{S} S dx = -P_{ex} dV \quad (3.16)$$

$$W = -P_{ex} \int_{V_1}^{V_2} dV = -P_{ex} (V_2 - V_1) \quad (3.17)$$

- Avec W le travail, F la force extérieure, dx le déplacement du piston, S la surface du piston, V le volume du piston
- La pression est toujours positive!
- **Compression:** $\Delta V < 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V > 0$
- **Expansion:** $\Delta V > 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V < 0$



axe pour positionner la position du piston, il part de zéro et il va augmenter. Ça me permet en mettant l'axe de cette manière d'être en cohérence avec le volume. Ça veut dire qu'il ne faudrait pas que quand j'augmente mon x , si je l'avais mis l'axe dans l'autre sens, je diminue le volume. Ça veut dire que j'aurais eu un signe qui serait apparu à quelques autres aspects. Et puis vous pouvez aussi observer ou remarquer que alors que la force, elle, elle pourrait être positive ou négative, quand on parle de pression, c'est toujours positif, à moins que ce soit une pression relative, une différence de pression entre une paroi, etc. Mais quand on parle de la pression, comme variable thermodynamique, c'est obligatoirement toujours positif. Il n'y a pas de pression négative, ça n'existe pas. Donc, à partir de ça, on va pouvoir calculer le travail lorsque j'ai une variation de volume. C'est dans ces situations-là qu'on va avoir du travail, dans les systèmes qu'on va étudier, les systèmes thermomécaniques, le travail sera toujours associé à une différence de volume. Et donc, la pression extérieure avec laquelle on va appuyer sur le cylindre, elle ne change pas. Je peux la mettre en évidence de mon intégral et puis, je vais intégrer le DV . Et donc, j'aurai le travail qui va être la pression multipliée par la différence de volume. Et là, on peut avoir un travail positif ou un travail négatif. Alors, considérer le travail, le travail, c'est une énergie, considérer l'énergie comme le montant qu'il y a sur le compte en banque du système. Donc, en fait, vous voulez, c'est clair que quand vous avez de l'énergie qui rentre dans le système, vous voulez que ce soit positif. Et quand ça sort, vous voulez que ce soit

notes

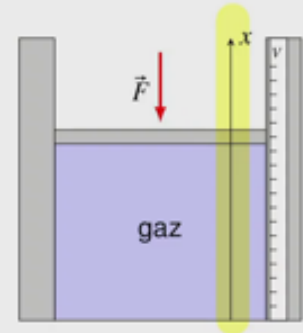
résumé

3.4.4 Le travail d'un piston contrôlé par une force extérieure

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s} = -F dx = -\frac{F}{S} S dx = -P_{ex} dV \quad (3.16)$$

$$W = -P_{ex} \int_{V_1}^{V_2} dV = -P_{ex} (V_2 - V_1) \quad (3.17)$$

- Avec W le travail, F la force extérieure, dx le déplacement du piston, S la surface du piston, V le volume du piston
- La pression est toujours positive!
- **Compression:** $\Delta V < 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V > 0$
- **Expansion:** $\Delta V > 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V < 0$



négatif. Après, c'est une histoire de cohérence. On peut se comprendre. Et tous les livres n'ont pas forcément la même habitude de représenter les choses. Mais on va dire que dans ce cours, c'est comme ça qu'on représente les choses. Le travail est considéré positivement quand il rentre dans le système et négativement quand il est fourni par le système à l'extérieur. Donc, typiquement, la machine à vapeur qui va permettre d'actionner les biels qui vont faire avancer la locomotive, ça va être un travail pour le moteur thermique, ça va être un travail négatif parce que c'est le moteur thermique qui va fournir ce travail-là. Pour vous, qui est à l'extérieur, c'est positif, c'est bien, c'est ce que vous voulez récupérer. Donc, ça n'a pas d'autre sens que ça. Positif négatif, ça n'a pas d'autre sens que de faire le bilan du système et de savoir ce qu'il est en train de gagner et ce qu'il est en train de perdre. Prends-moi que j'ai raconté tout ce que j'avais préparé de raconter sur ce slide. Et donc, quand vous êtes en

notes

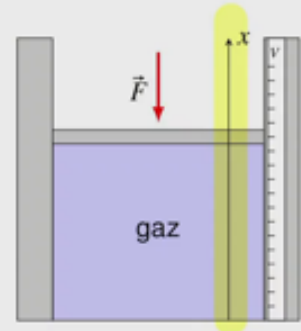
résumé

3.4.4 Le travail d'un piston contrôlé par une force extérieure

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s} = -F dx = -\frac{F}{S} S dx = -P_{ex} dV \quad (3.16)$$

$$W = -P_{ex} \int_{V_1}^{V_2} dV = -P_{ex} (V_2 - V_1) \quad (3.17)$$

- Avec W le travail, F la force extérieure, dx le déplacement du piston, S la surface du piston, V le volume du piston
- La pression est toujours positive!
- **Compression:** $\Delta V < 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V > 0$
- **Expansion:** $\Delta V > 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V < 0$



compression, ça veut dire que votre

notes

résumé

17m 10s

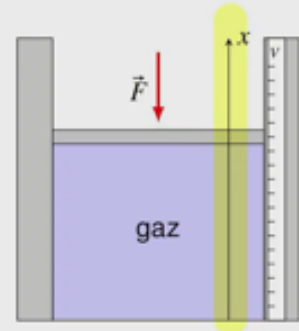


3.4.4 Le travail d'un piston contrôlé par une force extérieure

$$\delta W = \vec{F} \cdot d\vec{s} = -F dx = -\frac{F}{S} S dx = -P_{ex} dV \quad (3.16)$$

$$W = -P_{ex} \int_{V_1}^{V_2} dV = -P_{ex} (V_2 - V_1) \quad (3.17)$$

- Avec W le travail, F la force extérieure, dx le déplacement du piston, S la surface du piston, V le volume du piston
- La pression est toujours positive!
- **Compression:** $\Delta V < 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V > 0$
- **Expansion:** $\Delta V > 0$ donc $W = -P_{ex} \Delta V < 0$



volume va devenir plus petit et à ce moment-là, le travail est négatif. Et quand vous êtes en expansion, alors le DV, lui, va être positif, donc le travail va être négatif. Vous êtes en train de perdre de l'énergie suivant l'expansion du gaz.

notes

résumé

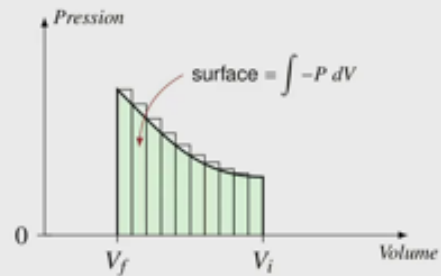
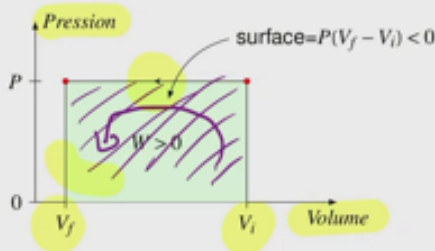
17m 14s



3.4.5 Travail lors d'un changement de volume

- On s'intéresse maintenant à ce qui se passe dans le gaz dont l'état est décrit par (P, V, T) et qui subit une transformation **réversible**
- La pression P change lorsque le volume V change: $P = P(V)$
- Le travail s'obtient alors en intégrant les contributions infinitésimales:

$$W_r = \int_{V_i}^{V_f} -P(V) dV \quad \text{Clapeyron} \quad (3.18)$$



Maintenant, on va souvent représenter les choses dans un graphique qu'on dit PV, où on va mettre le volume à l'horizontale et on va mettre la pression verticale. Ça va être une manière poursuivre les systèmes. Vous vous souvenez, je ne sais pas si j'ai introduit peut-être, ça viendra plus tard, mais je ne vous le dis, ces systèmes thermomécaniques, ils sont bivariants. Ça veut dire qu'ils peuvent représenter avec deux variables. Il y a toujours normalement trois cas de variables, on ne va pas changer, en général, on ne change pas la quantité de matière dont on parle, mais il y a PV et T, il y a une relation entre eux et on arrive toujours à représenter le système avec deux de ces variables pour expliquer la troisième. Donc, quand vous faites un schéma PV et V, ça vous permet de représenter l'état du système. N'importe quel point du plan PV représente un état du système. Donc, c'est très pratique pour suivre ce qui se passe. En guillemets, ça veut dire que tout ce qui se passe, vous l'avez devant vous, au lieu de devoir imaginer que, bien sûr, vous avez toujours argumenté que j'ai toujours pensé à autre chose, elle est toujours pensée à autre chose, qu'on doit intégrer plein de choses, mais en fait, ça veut dire que vous avez l'état du système devant vous. C'est comme d'avoir une carte si vous avez les lignes de niveau sur votre carte, vous savez à quelle altitude sont les endroits et vous avez un état et si vous allez d'un endroit à l'autre, vous avez les différences d'altitude que vous avez besoin de vaincre ou de recevoir dans les pattes. Donc, voilà. C'est pour ça que c'est intéressant. Ça s'appelle un diagramme de Clapeyron. On va reparler de

notes

résumé

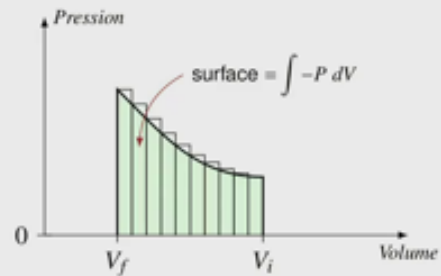
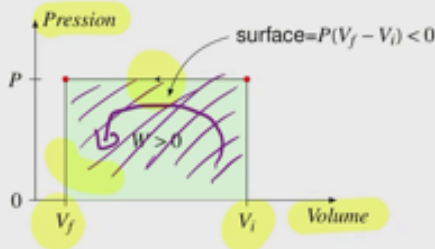
17m 41s



3.4.5 Travail lors d'un changement de volume

- On s'intéresse maintenant à ce qui se passe dans le gaz dont l'état est décrit par (P, V, T) et qui subit une transformation **réversible**
- La pression P change lorsque le volume V change: $P = P(V)$
- Le travail s'obtient alors en intégrant les contributions infinitésimales:

$$W_r = \int_{V_i}^{V_f} -P(V) dV \quad \text{Clapeyron} \quad (3.18)$$



clapeton dans un petit moment. C'était un chercheur qui a essayé de faire un détail. Donc, le diagramme de clapeyron, c'est toujours le volume à l'horizontale et la pression à la verticale. Donc, ça veut dire une valeur intensive, non, une valeur extensive horizontalement et une valeur intensive verticalement. Il existe d'autres types de graphiques. On pourrait essayer d'avoir la température, d'avoir de la pression, etc. Il y a aussi des graphiques comme ça. Mais celui-là, il y a des graphiques de base pour comprendre ce qui se passe dans les systèmes. Alors, quand on dessine les choses comme ça, dans un diagramme PV, c'est aussi l'intérêt de faire ces diagrammes de clapeyron, on peut voir le travail qui est effectué. On va faire vivre à notre système, différentes cycles, différentes transformations. On va devoir le faire, on va devoir le faire, on va devoir le faire. Donc, on va pouvoir faire des programmes de clapeyron, on va pouvoir faire des programmes de clapeyron, on va pouvoir faire des programmes de clapeyron, on va devoir le suivre comme ça sur le diagramme PV. Et ce qui est intéressant, c'est que la surface qui va être enfermée, elle va correspondre au travail. Donc là, vous avez deux exemples. Dans le premier exemple, vous avez la pression, la pression extérieure avec laquelle je travaille, elle est toujours la même, elle est constante, donc ça crée une horizontale et puis vous avez le volume qui change. Donc j'entends de compresser mon gaz avec une pression qui est toujours la même. Et bien, la partie qui est en verte, que je vais mettre une autre couleur pour, je ne sais pas, en violet, toute cette partie là, toute cette surface là, elle correspond au travail. Et puis, si je la parcours, on va dire,

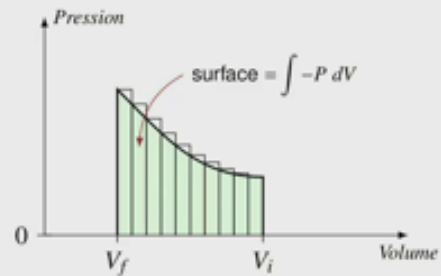
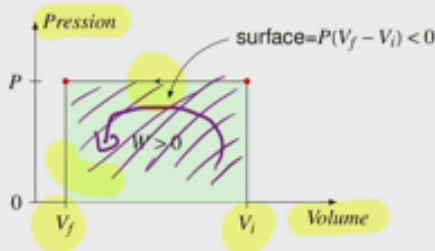
notes

résumé

3.4.5 Travail lors d'un changement de volume

- On s'intéresse maintenant à ce qui se passe dans le gaz dont l'état est décrit par (P, V, T) et qui subit une transformation **réversible**
- La pression P change lorsque le volume V change: $P = P(V)$
- Le travail s'obtient alors en intégrant les contributions infinitésimales:

$$W_r = \int_{V_i}^{V_f} -P(V) dV \quad \text{Clapeyron} \quad (3.18)$$



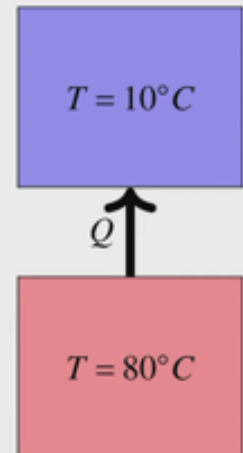
on va faire des cycles plus tard, mais si je la parcours comme ça, on va dire, si je la parcours comme ça, alors le travail est positif. Si ça va dans l'autre sens, le travail va être négatif. Donc ça va être vraiment l'inverse de l'intégrale de la pression. Vous avez le signe moins devant, intégrale de moins PV. Je suis en train de parler de ce signe, pardon, c'est pas la bonne couleur, je suis en train de parler de ce signe-là. Ça, ça explique le fait que l'algèbre chez mon intégrale j'ai de V_i , C'est souvent pour initial, AVF, j'allais dans ce sens-là, là, il y avait une petite flèche, je sais pas si vous l'avez observé pour dire dans quel sens j'allais, et bien, mon intégrale, pure, elle est négative, mais le travail qui est l'intégrale de moins PV, elle est positive, le travail est positif. Donc ça veut dire que mon système est en train de gagner de l'énergie. Et puis, j'ai représenté une autre situation dans laquelle la pression n'est pas constante, je dois suivre à chaque moment ce qui se passe, et bien, voilà, c'est une intégrale où je vais intégrer la valeur de la pression pour les différents volumes quand je vais diminuer le volume. Le travail lors d'un changement de volume.

notes

résumé

3.4.6 Le concept de chaleur

- La chaleur est une autre forme d'énergie essentielle en thermodynamique.
- Elle résulte du transfert d'énergie thermique d'un système à un autre dû à une différence de température.
- La chaleur est souvent mesurée en calories ou joules.
- Ce transfert de chaleur peut se faire selon différents phénomènes physiques tels que la conduction ou le rayonnement (on y revient plus tard).



Alors, parallèlement au travail, il y a le concept de la chaleur. Et la même chose, la chaleur, c'est une quantité d'énergie qui peut s'échanger entre deux systèmes. Alors, concept du travail, c'est un transfert d'énergie qui est bien ordonné. Vous avez la bielle qui sort du piston qui va faire bouger éventuellement une roue qui va faire fonctionner une pompe, qui va faire fonctionner une... C'est ordonné. Alors que c'est de l'énergie aussi. Alors que la chaleur, ça va être un transfert d'énergie mais qui est désordonné. Simplement, si vous mettez un verre d'eau froide, vous collez un cube d'eau froide, coller avec un cube d'eau chaude, il va y avoir un transfert d'énergie entre les deux. Et puis, ça, il faut expliquer avec les chapitres suivants, mais ils vont arriver à un équilibre thermodynamique, à une salle de l'eau froide entre le chouette froide. Je n'ai pas dit s'ils avaient les mêmes volumes, je n'ai pas dit les différences de température, mais vous comprenez bien que quand vous mettez votre main sur de la glace, votre main se refroidit. Il y a un transfert de chaleur. Alors bon, on a tendance à parler. C'est le faux. On dit oui, il y a le froid qui rentre dans ma main, mais ce n'est pas le froid qui rentre dans votre main. C'est la chaleur qui est en train de quitter votre main pour aller réchauffer le cube de glace. Donc, la chaleur, elle a une propriété, c'est qu'elle va toujours se déplacer naturellement, si vous n'avez pas de machine, il n'y a pas un système complexe autour, elle va toujours se déplacer du chaud au froid. Ça va toujours, c'est naturel. Elle peut être en haut, en bas, le cube chaud peut être en haut, en bas, n'importe quoi.

notes

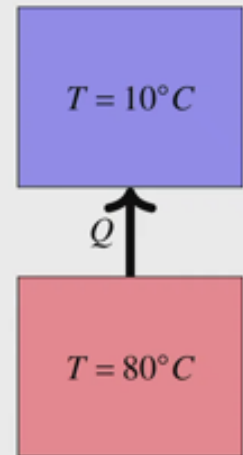
résumé

23m 10s



3.4.6 Le concept de chaleur

- La chaleur est une autre forme d'énergie essentielle en thermodynamique.
- Elle résulte du transfert d'énergie thermique d'un système à un autre dû à une différence de température.
- La chaleur est souvent mesurée en calories ou joules.
- Ce transfert de chaleur peut se faire selon différents phénomènes physiques tels que la conduction ou le rayonnement (on y revient plus tard).



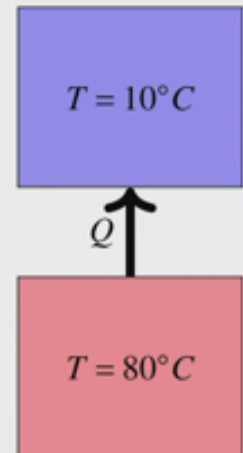
Ça ne change rien. Ça va toujours aller, la chaleur va toujours fluer du chaud jusqu'au froid. Et ça, c'est une manière naturelle. Quand on va faire des machines thermiques compliquées, vous allez voir dans les autres chapitres, on va faire le moteur thermique, alors on est capable, parfois par exemple, quelque chose qu'on appelle la pompe à chaleur, on est capable de faire aller de la chaleur de la source froide jusqu'à la source chaude. Mais il faut tout un système mécanique, il faudra du travail pour faire ça. Là, je suis en train d'avancer un petit peu dans le chapitre. Donc la chaleur, d'une autre forme de l'énergie, ce sont les deux formes d'énergie. Bon, on va parler parfois aussi d'énergie potentielle, mais par ça, c'est les deux formes d'énergie qu'on va trouver dans ce cours. La chaleur et le travail. Mais aussi, on se trompe, parce qu'on dit, voilà, à l'intérieur de ce bloc, je ne sais pas d'aluminium, il y a de la chaleur. Mais ce n'est pas vrai. La chaleur, c'est ce qui va transférer. Ce qui est ici à l'intérieur, si c'était un bloc d'aluminium ou un bloc de bois ou un peu de coin, il y a de l'énergie. Il n'y a pas de la chaleur, il y a de l'énergie. La chaleur, c'est ce qui se transfère. C'est comme la même chose que le travail au moment où avec un système, je pousse un autre, ça veut dire que j'ai une force qui exerce quelque chose. Le travail, il n'était pas à l'intérieur de mon système. J'avais de l'énergie, sous différentes formes possibles, qui est transféré à l'autre système. Donc, elle résulte du transfert d'énergie thermique entre deux systèmes qui ont des températures différentes. Et puis, on verra, j'ai un slide pour

notes

résumé

3.4.6 Le concept de chaleur

- La chaleur est une autre forme d'énergie essentielle en thermodynamique.
- Elle résulte du transfert d'énergie thermique d'un système à un autre dû à une différence de température.
- La chaleur est souvent mesurée en calories ou joules.
- Ce transfert de chaleur peut se faire selon différents phénomènes physiques tels que la conduction ou le rayonnement (on y revient plus tard).



ça, mais ces transferts peuvent se faire de différentes manières. Ça peut se faire par conduction. Ça veut dire que quand un corps chaud touche un corps froid, il va y avoir un échange de chaleur juste par contact. Et puis, il peut se faire aussi par rayonnement quand vous êtes près du feu, dans votre chalet en valet, et puis que vous avez fait du feu dans la cheminée, et puis que vous mettez vos mains pour vous réchauffer, vous sentez la chaleur qui rayonne. Si vous avez fait le café le matin, votre plaque, vous passez votre main pas trop loin de la plaque, pas dessus de la plaque, ça fait mal, vous ne faites pas ça. Mais pas trop loin de la plaque, vous sentez la chaleur. Donc ça, c'est le rayonnement. C'est des rayons infrarouge, qui vous les voyez pas, mais ils sont hors du visuel, mais c'est des rayons infrarouge qui transfère la chaleur. Puis, encore un autre mode de transfert, par exemple entre les vitres et le reste de la pièce, en été, si les vitres sont très chaudes, l'air va se mettre à tourner à l'intérieur de la pièce, vont lécher les vitres, et puis vont leur prendre s'il est un peu plus frais que les vitres, vont prendre une partie de l'énergie au vitre, puis va faire que l'air ici va devenir vite arrésirable. Mais là, on sera déjà en vacances, les examens seront finis. On pensera à autre

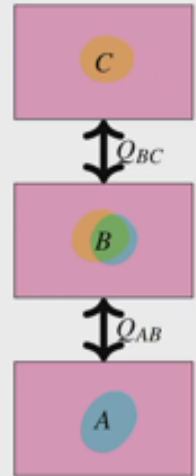
notes

résumé

3.4.7 Le principe zéro de la thermodynamique

Si deux systèmes sont chacun en équilibre thermique avec un troisième système, alors ils sont en équilibre thermique entre eux.

- Si un objet A est à la même température qu'un objet B, et si l'objet B est à la même température qu'un objet C, alors l'objet A et l'objet C sont également à la même température.
- Ce principe établit une base essentielle pour la mesure et la définition de la température.
- Il est fondamental car il permet d'établir des échelles de température et de comparer les températures entre différents systèmes.



chose. Alors, il y a un certain nombre de principes, de thermodynamiques qui permettent de savoir de quoi on parle. Le mode principe en physique, il est utilisé pour parler de ces choses, qu'on sait absolument qu'elles sont vraies, mais qu'on ne démontre pas comme un théorème, entre moi on dirait un théorème. Vous avez vu, le semestre passé, je pense, le théorème du moment cinétique, où il y a eu le théorème de l'énergie, il y a eu le théorème de l'énergie mécanique, il y a eu différents théorèmes, c'est chose qu'on arrive vraiment à démontrer. Les principes, on n'arrive pas à le démontrer, mais on le vérifie tout le temps, dans toutes les conditions j'arrive, il suffit de préciser les hypothèses, parce qu'il y a quelques hypothèses qui permettent que ce principe existe. Alors, il y en a un, il y a un qui appelle le principe 0, parce qu'il n'y a pas de principe, c'est tout de suite, puis après on a dû le réintroduire, après on avait déjà fait le premier principe, donc il a fallu trouver une numérotation, donc on a appelé le principe 0. Il est assez simple, il dit au fond que c'est pour expliquer ce qui se passe quand il y a plus que deux objets. Donc si vous avez un objet C qui est, on échange, on équilibre thermique avec un objet B, mais que l'objet B est aussi en équilibre thermique avec un objet A, alors l'objet A est en équilibre avec l'objet C. Voilà, c'est ça le principe 0. Vous allez dire c'est évident, mais oui, on a tout, parce qu'on l'a vécu tous les jours, on se rend bien compte que si vous avez la même température, la vitre, elle est en relation avec l'extérieur, elle va se

notes

résumé

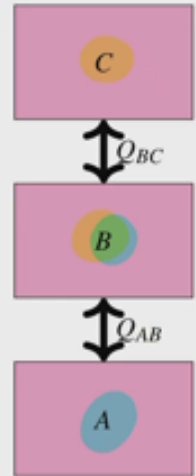
28m 41s



3.4.7 Le principe zéro de la thermodynamique

Si deux systèmes sont chacun en équilibre thermique avec un troisième système, alors ils sont en équilibre thermique entre eux.

- Si un objet A est à la même température qu'un objet B, et si l'objet B est à la même température qu'un objet C, alors l'objet A et l'objet C sont également à la même température.
- Ce principe établit une base essentielle pour la mesure et la définition de la température.
- Il est fondamental car il permet d'établir des échelles de température et de comparer les températures entre différents systèmes.



mettre la température extérieure, vous la touchez, l'air intérieur va se mettre à la même température extérieure, ça va pas se faire instantanément, mais les choses vont se passer comme ça. C'est ça qu'on appelle le principe 0. Et c'est lui, on dit qu'il est fondamental, parce que c'est lui qui va permettre de travailler sur les échelles de température entre les systèmes, parce que, oui, chaque fois que vous avez mesuré une température en fait, vous mesurez la température du thermomètre. Vous avez un système qui lui va se mettre à une certaine température en équilibre avec un système, donc si vous voulez comprendre comment fonctionnent ces systèmes, vous êtes

notes

résumé

Changements de chaleur

Rayonnement

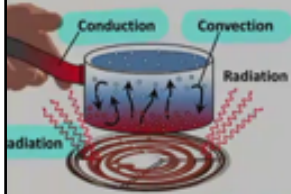
Échange de chaleur par les électromagnétiques. Proportionnel à la puissance des températures à la puissance 4

$$\propto T_1^4 - T_2^4 \quad (3.20)$$

La convection

C'est un échange de chaleur lié au mouvement du fluide, donc à un transport de matière. Il est proportionnel à la différence des températures:

$$\phi_{12} \propto T_1 - T_2 \quad (3.21)$$



3.9 La perception de la température

La perception de la température

- est relative
- est liée au flux de chaleur

$$\phi \sim T_1 - T_2$$

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

obligé d'admettre le principe 0. Alors voilà, je parlais, je me souvenais plus à quel moment arrivait ce slide. Voilà les trois mécanismes de transfert de chaleur, en plus ils sont exprimés dans une même situation. Vous voyez que ces transferts de chaleur peuvent se mélanger, peuvent arriver en même temps. Donc là, vous êtes avec une casserole en train de préparer votre thé dans votre merveilleux chalet en valet, et puis vous avez tous les phénomènes de transfert de chaleur qui sont présents. Donc vous voyez la radiation, donc ça va être venu, vous sentez le chaud de la plaque, vous approchez votre main du corps de chaud, vous sentez ça, ça c'est la radiation. Vous avez la conduction, alors vous avez peut-être la conduction, ça dépend si vous avez une plaque à induction ou pas, mais dans une plaque au corps de chaud normal, elle est chaude, elle va chauffer le bas de la casserole, ça c'est de la conduction. Si vous avez comme moi une mauvaise casserole qui est chaude sur le bord, si vous ne faites pas gaffe comme vous mettez votre main, vous allez vous brûler par la partie métallique, ça c'est aussi la conduction. Quand on touche quelque chose et qu'on sent le front au chaud, ça c'est de la conduction. Et puis à l'intérieur de la casserole, vous avez au début de l'eau qui est fraîche, et puis elle va chauffer, mais elle va chauffer surtout en bas par conduction, on va chauffer sur la casserole. Et bien cette partie chaude, elle va commencer à monter parce que l'eau chaude est plus légère que l'eau froide, et ça va faire un mouvement de rotation, ça fait même des bulles, mais même quand vous les voyez, pas les bulles, c'est vraiment quand les

notes

résumé

31m 16s



Changements de chaleur

Rayonnement

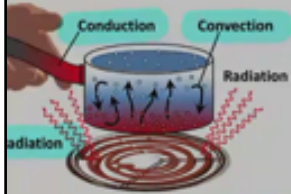
Échange de chaleur par les électromagnétiques. Proportionnel à la puissance des températures à la puissance 4

$$\propto T_1^4 - T_2^4 \quad (3.20)$$

La convection

C'est un échange de chaleur lié au mouvement du fluide, donc à un transport de matière. Il est proportionnel à la différence des températures:

$$\phi_{12} \propto T_1 - T_2 \quad (3.21)$$



3.9 La perception de la température

La perception de la température

- est relative
- est liée au flux de chaleur

$$\phi \sim T_1 - T_2$$

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

cellules de rotation, c'est quand vous êtes en train de chauffer, puis même que ça boue, que ça fait ça, mais même avant, vous avez des mouvements sur l'eau froide qui redescend, qui fait qu'il y a peu de choses prêts à l'intérieur de votre casserole, vous avez une température plus ou moins uniforme. Donc vous avez la convection, et puis vous avez la conduction qui est par contre. Donc ça c'est les trois mécanismes. Ce qui est intéressant à se souvenir, c'est comment, en fonction de la différence de température des deux systèmes, comment l'échange de l'énergie se fait. Donc le flux, ça représente le flux d'énergie. Combien de joules vont passer, ou de watts si on regarde par seconde, typiquement, la quantité d'énergie, la puissance qui va être transférée, et quand on est dans la conduction, c'est lié à la différence de température. Simplement, plus la différence est importante, plus le flux va être important. Si on parle du rayonnement, alors là, on est en fonction de la puissance 4 de la différence. Donc les échanges par rayonnement sont extrêmement puissants. Heureusement pour nous, ça permet de chauffer la Terre avec le Soleil, pas trop si possible, donc il faut contrôler la quantité de CO₂ qu'on a dans notre atmosphère, mais vous voyez que c'est un phénomène qui est beaucoup plus puissant pour des mêmes différences de température. Je vais avoir les échanges de chaleur qui sont très forts. C'est pour ça que si vous avez un fourneau et un frigo à l'un côté de l'autre, vous faites mieux de mettre une feuille d'aluminium entre les deux pour être sûr que par rayonnement, ils ne s'échangent pas trop, on est en train de chauffer votre frigo avec votre four. C'est un peu dommage, vous payez de l'énergie pour

notes

résumé

Changements de chaleur

Rayonnement

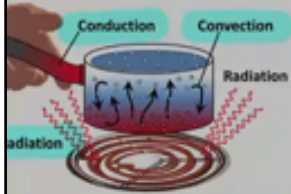
Échange de chaleur par les électromagnétiques. Proportionnel à la puissance des températures à la puissance 4

$$\propto T_1^4 - T_2^4 \quad (3.20)$$

La convection

C'est un échange de chaleur lié au mouvement du fluide, donc à un transport de matière. Il est proportionnel à la différence des températures:

$$\phi_{12} \propto T_1 - T_2 \quad (3.21)$$



3.9 La perception de la température

La perception de la température

- est relative
- est liée au flux de chaleur

$$\phi \sim T_1 - T_2$$

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

rien. Et puis la convection, elle est proportionnelle, le flux d'énergie est aussi proportionnel à la différence de température. Donc vous avez deux situations par rapport au flux d'énergie en fonction de la température. La situation convection ou conduction proportionnelle, directement, linéairement avec la température, et puis vous avez le rayonnement qui est un peu différent, et donc il est beaucoup plus puissant, il va participer beaucoup plus vite à l'équilibre des températures. Et puis surtout, la grande différence

notes

résumé

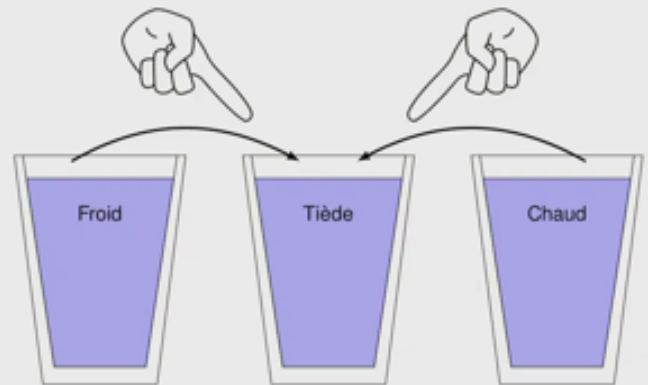
3.9 La perception de la température

La perception de la température

- est relative
- est liée au flux de chaleur

$$\phi \sim T_1 - T_2$$

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{R}$$



c'est que le rayonnement, il fonctionne à distance, parce que si on devait toucher le soleil pour qu'il nous

notes

résumé

35m 55s



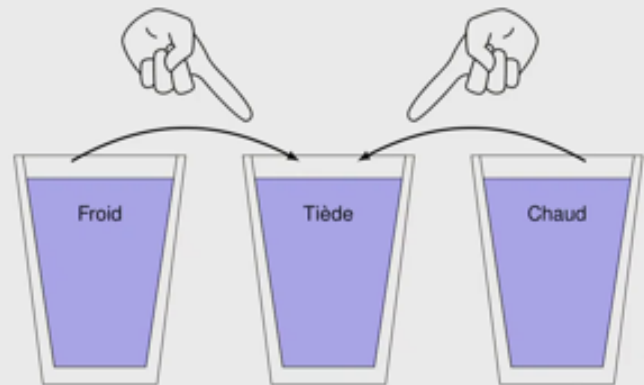
3.9 La perception de la température

La perception de la température

- est relative
- est liée au flux de chaleur

$$\phi \sim T_1 - T_2$$

$$\phi = \frac{T_1 - T_2}{R}$$



réchauffe, on se récuit. Ça, je vous l'avais fait la dernière fois, vous avez invité à venir regarder, il faut pas confondre les températures, la chaleur et puis la perception qu'on en a. Ça va être un peu plus de perception qu'on en a. C'est vraiment un sujet dans lequel la perception qu'on a peut finalement nous troubler. D'ailleurs, si vous mettez votre main sur le bois et sur une partie métallique, vous avez l'impression que la partie métallique elle est plus froide que la partie qui est sur le bois, mais en fait c'est simplement que vous avez plus d'échange thermique avec le métal qui a une moins grande résistance thermique par rapport au bois qui lui est... Donc si vous marchez sur du bois ou sur des catèles, vous voyez très bien la différence. Mais ça c'est la perception. Ça veut pas dire qu'il y a... Il y a plus de... Donc le flux va être différent à cause de la résistance, mais ça veut pas dire que les températures sont différentes. Donc là, je vous avais proposé la dernière fois de venir essayer. Il y a quelques uns qui l'ont fait. Vous prenez un gobelet d'eau chaude, un gobelet d'eau froide, un gobelet d'eau tiède. Vous mettez l'eau froide, vous les rejoignez dans l'eau tiède et vous allez voir que celui qui vient de l'eau froide, vous avez l'impression que l'eau est plus chaude, que celui qui vient de l'eau chaude, vous avez l'impression qu'il va être plus froid. Parce que vous avez un flux d'énergie qui va être plus important, votre doigt à chauffer, vous avez... Vous avez... Si vous n'êtes pas venus faire le test,

notes

résumé

36m 3s



3.4.10 La notion de source thermique

C'est une notion pratique qui permet de représenter les échanges d'un système par rapport à son environnement suffisamment grand pour être considéré comme stable.

Une source thermique a les caractéristiques suivantes:

- ① Sa capacité calorifique est très grande devant celle du système,
- ② Sa température uniforme T_e reste constante durant le transfert de chaleur.

Lorsque la température de la source est supérieure à celle du système, on parlera de source chaude. Dans le cas inverse, on parlera de source froide.

faites le test ce soir à la maison. Alors, il y a quelque chose qui va apparaître dans les problèmes qu'on aura besoin. C'est ce qu'on appelle une source thermique. On va avoir besoin de ça pour comprendre comment fonctionnent les moteurs thermiques. Donc, c'est quoi une source thermique ? C'est un grand réservoir qui va vous donner... ou vous prendre de la chaleur systématiquement si vous en avez. Donc, si vous avez un gros cube de glace, ça va être un puits thermique. Ça veut dire si vous avez quelque chose de chaud, typiquement, ça va... Ça va prendre l'énergie que vous voulez bien, que le système veut bien lui laisser. Et puis, si vous mettez un système en contact avec une grande source d'eau chaude ou quelque chose comme ça, ou une masse énorme, en fait, quand on a une source, on a l'idée que la quantité de chaleur qui va pouvoir être échangée est grande par rapport au système que vous étudiez. Vous allez rajouter quelques joules à la source, pas le changer beaucoup sa température. Par contre, à votre système, ça va éventuellement rapidement le changer sa température. Donc, c'est ça le concept de source thermique. C'est une portion notion pratique qui permet de présenter les échanges d'un système par rapport à son environnement suffisamment grand pour être considéré comme stable. Ça veut dire que vous avez de l'énergie qui va rentrer dans votre source ou qui va sortir de votre source et ça va pas changer sa chaleur. Tandis que si vous avez un système d'un litre puis vous amenez un cube, d'un des 6 litres, vous allez faire fondre de cubes si vous voulez, si vous voulez prendre de la chaleur. Une source thermique a les caractéristiques suivantes, sa capacité calorifique est très grande.

notes

résumé

37m 41s



3.4.10 La notion de source thermique

C'est une notion pratique qui permet de représenter les échanges d'un système par rapport à son environnement suffisamment grand pour être considéré comme stable.

Une source thermique a les caractéristiques suivantes:

- ① Sa capacité calorifique est très grande devant celle du système,
- ② Sa température uniforme T_e reste constante durant le transfert de chaleur.

Lorsque la température de la source est supérieure à celle du système, on parlera de source chaude. Dans le cas inverse, on parlera de source froide.

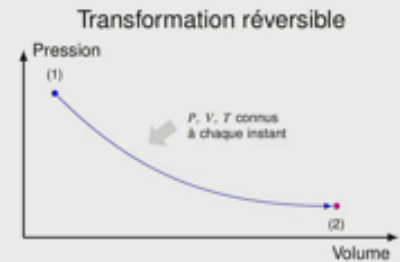
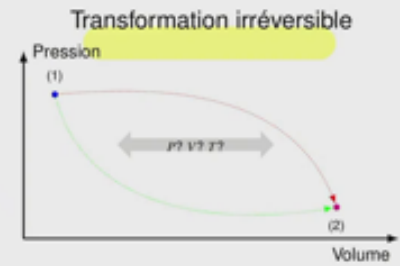
Donc là, la quantité de chaleur que je peux mettre dedans et qui va lui faire changer sa température doit être, faut mettre beaucoup d'énergie pour qu'il change sa température. On reparlera de cette notion. Là, elle est un petit peu mystérieuse aujourd'hui mais on la reverra. Cette notion-là, on va la revoir aujourd'hui encore. Et puis on va considérer que sa température, elle est uniforme. C'est la même chose devant derrière, dessous, en haut, en bas. Et surtout durant le transfert de chaleur. Donc on va parler de source chaude et de source froide. Donc une source chaude, c'est une source qui va vous donner de la chaleur et une source froide, c'est une source qui va vous prendre de la

notes

résumé

3.4.11 Échange de chaleur

- L'échange de chaleur dépend du processus suivi
- Le transfert se fait du chaud au froid
- La plupart du temps, il y a des variations de la température des systèmes en contact
- Si l'échange est irréversible, on ne sait pas comment varie la température → le calcul du transfert de chaleur doit se faire indirectement (on y reviendra au chapitre suivant)
- Si l'échange est réversible, P , V et T sont définis à chaque instant et l'échange de chaleur peut être calculé en utilisant sur les coefficients calorimétriques d'origine expérimentale.



chaleur. Alors, les échanges, ils peuvent se faire de différentes manières, plus ou moins rapidement, plus ou moins lentement. Donc si vous jetez un cube de glace dans le feu, le feu, je ne sais pas à 200, 300 degrés. Votre cube, il est à 0 degrés. Il y a un échange de température très important. Vous ne pouvez pas inverser ces irréversibles comme phénomènes. Donc, l'échange de chaleur, ça va être un processus dont on va étudier qui va être l'objet de notre analyse. Donc le transfert se fait automatiquement du chaud au froid. On va déjà parler. Donc normalement, en 2 systèmes, si c'est change de la chaleur, on va avoir, à moins qu'un soit un réservoir thermique, soit une source thermique, normalement, si on a deux systèmes normaux, ça va changer la température. Vous mettez un cube d'eau chaude, un cube d'eau froide, chacun va, celui qui donne de la chaleur, va perdre de la température, celui qui reçoit de la chaleur va augmenter sa température. Donc, normalement, le transfert de chaleur va faire varier la température du système. Température et chaleur, c'est pas la même chose. La température, c'est l'état du système, c'est une des variables d'état du système. La chaleur, c'est la quantité d'énergie qui va passer de l'un à l'autre, par un de ces trois phénomènes que on a parlé, la conduction, la convection ou le rayonnement. Donc, on a quand même un petit problème, et c'est vous qui allez avoir quelques petits problèmes à résoudre, c'est quand l'échange est irréversible. Si la différence de température entre les deux systèmes est importante, la glace est de l'autre est chaude, 100 degrés ou 80 degrés de différence, on n'arrive pas à suivre dans les systèmes à chaque moment ce qui se passe. En plus, la

notes

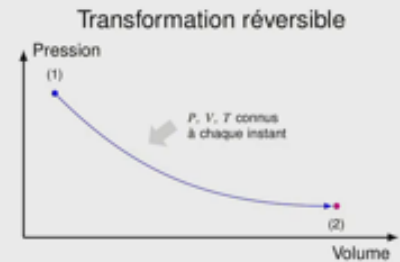
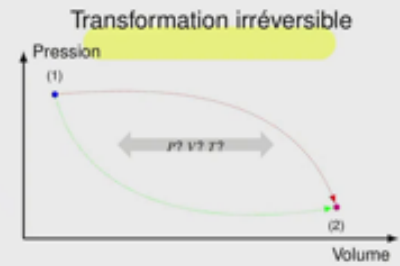
résumé

40m 23s



3.4.11 Échange de chaleur

- L'échange de chaleur dépend du processus suivi
- Le transfert se fait du chaud au froid
- La plupart du temps, il y a des variations de la température des systèmes en contact
- Si l'échange est irréversible, on ne sait pas comment varie la température → le calcul du transfert de chaleur doit se faire indirectement (on y reviendra au chapitre suivant)
- Si l'échange est réversible, P , V et T sont définis à chaque instant et l'échange de chaleur peut être calculé en utilisant sur les coefficients calorimétriques d'origine expérimentale.



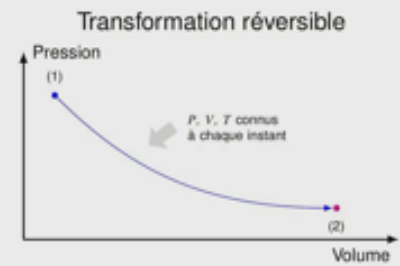
température ne va plus être uniforme dans les deux systèmes, on n'arrive pas à expliquer tout ce qui se passe, à expliquer, c'est pas ce qu'on appelle l'explication, on n'arrive pas à faire une équation qui vous dit à chaque seconde comment ça va se passer. Donc, c'est une situation qui est plutôt comparable à ça. Donc là, on ne va pas pouvoir calculer le transfert thermique, on n'a pas la capacité, on n'est pas sûr de la manière dont ça se passe. Donc, on n'arrive pas à modéliser ce transfert, on n'arrive pas à le calculer. Par contre, si il est réversible, alors on va pouvoir expliquer, calculer le transfert de chaleur. Alors, il y a une situation un peu particulière. Par exemple, si vous avez un transfert de chaleur dans un système qui est isotherme, alors là, parce qu'on a des sources thermiques qui fait que les températures ne vont pas changer, et vous arrivez à transférer de la chaleur de l'un à l'autre, bah là, vous arriverais à calculer ce qui se passe. Parce qu'à chaque moment, l'état du système va être défini, donc vous souvenez il y a deux semaines que l'état peut être défini par les variables d'état, PV et T , et donc on va pouvoir calculer. Et puis, pour faire ce calcul, on va utiliser quelque chose que j'introduis maintenant, c'est des coefficients calorimétriques. En fonction de la chaleur que vous allez amener à un litre d'eau, il va augmenter sa température. Mais si vous amenez la même quantité de chaleur à l'huile, le changement de température va être différent, parce que l'huile a moins de capacité calorifique et va monter beaucoup plus vite en température. C'est pour ça qu'on utilise l'huile pour frire. Pourtant, j'ai mangé à midi, mais je parle que de

notes

résumé

3.4.11 Échange de chaleur

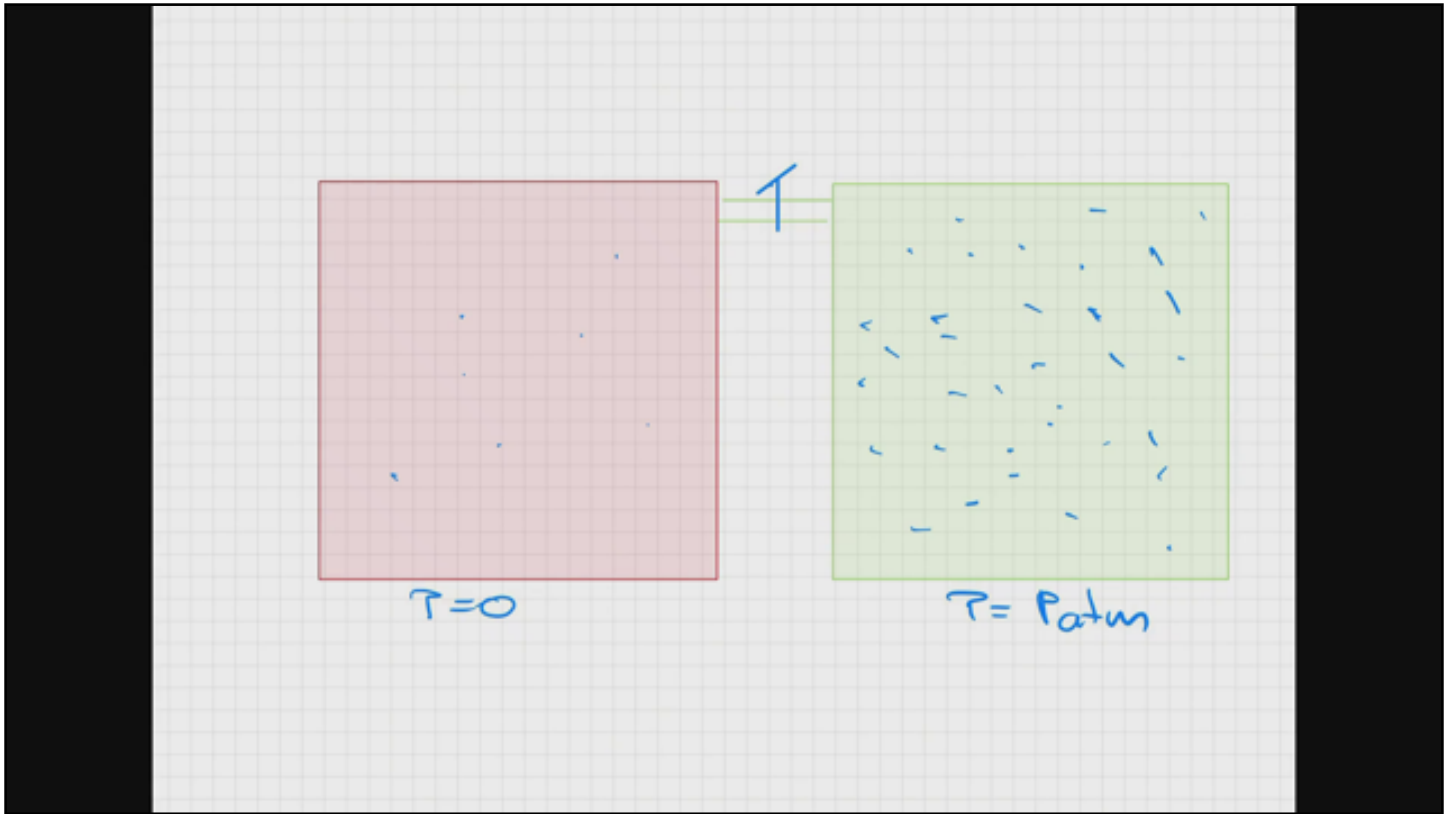
- L'échange de chaleur dépend du processus suivi
- Le transfert se fait du chaud au froid
- La plupart du temps, il y a des variations de la température des systèmes en contact
- Si l'échange est **irréversible**, on ne sait pas comment varie la température → le calcul du transfert de chaleur doit se faire indirectement (on y reviendra au chapitre suivant)
- Si l'échange est réversible, P , V et T sont définis à chaque instant et l'échange de chaleur peut être calculé en utilisant sur les **coefficients calorimétriques** d'origine expérimentale.



nourriture aujourd'hui. Donc, situation transformation irréversible, on ne va pas pouvoir calculer directement ce qui se passe dans le processus. On va voir suivre le transfert de chaleur, on va calculer d'autres. On va faire des bilans, puis on va arriver à...
Finalement, à la fin, vous vous êtes échangés telle et telle quantité de chaleur. Par contre, si vous avez une situation réversible, ça veut dire qu'à chaque instant, vous êtes capable de dire quelle est la pression, quelle est la température, quelle est le volume, alors vous arrivez à faire le calcul. Mais maintenant, votre état s'est imposé, donc je vous retrouve dans un quart d'heure.

notes

résumé



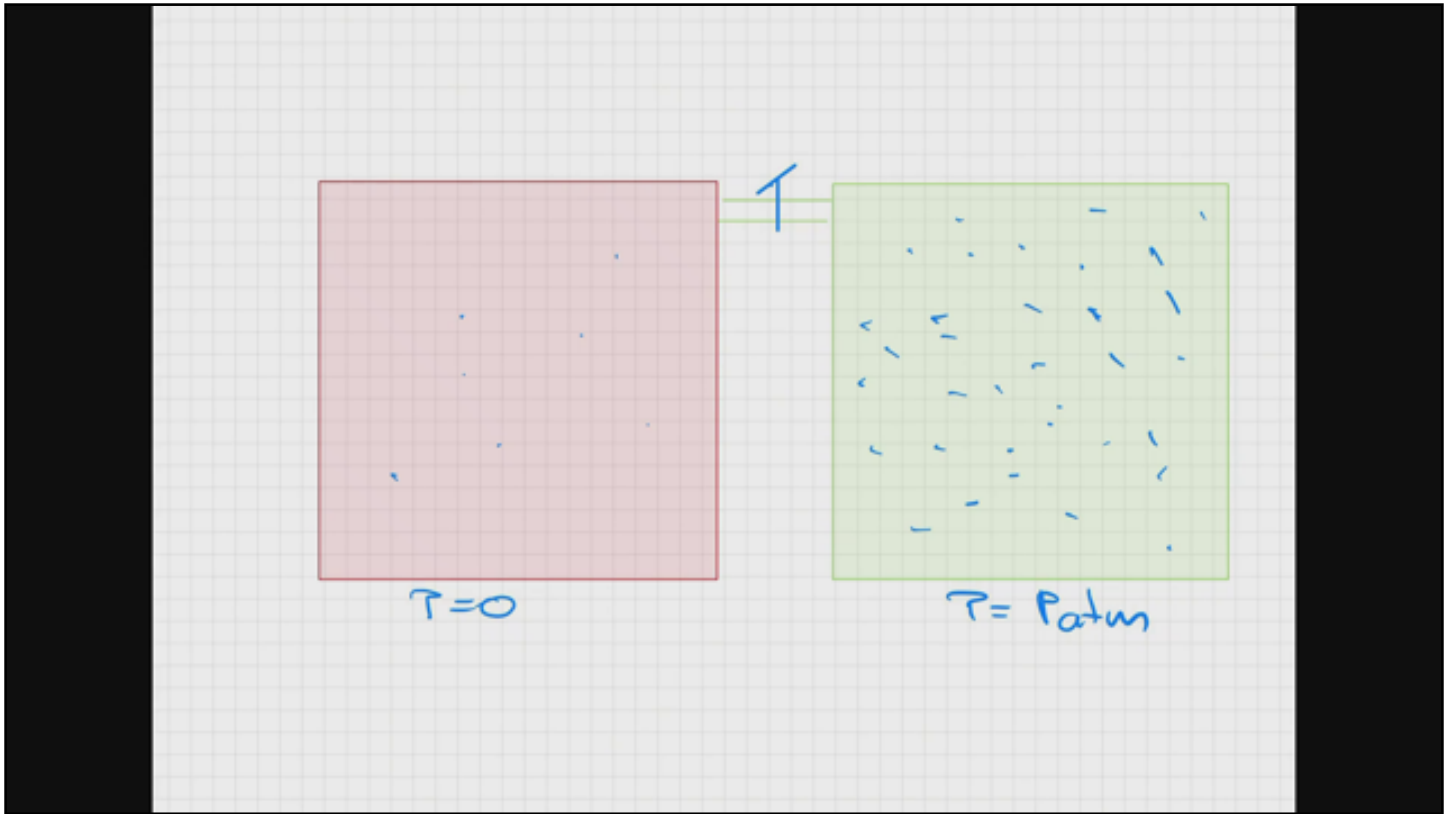
Voilà, prenez place.

notes

résumé

45m 26s





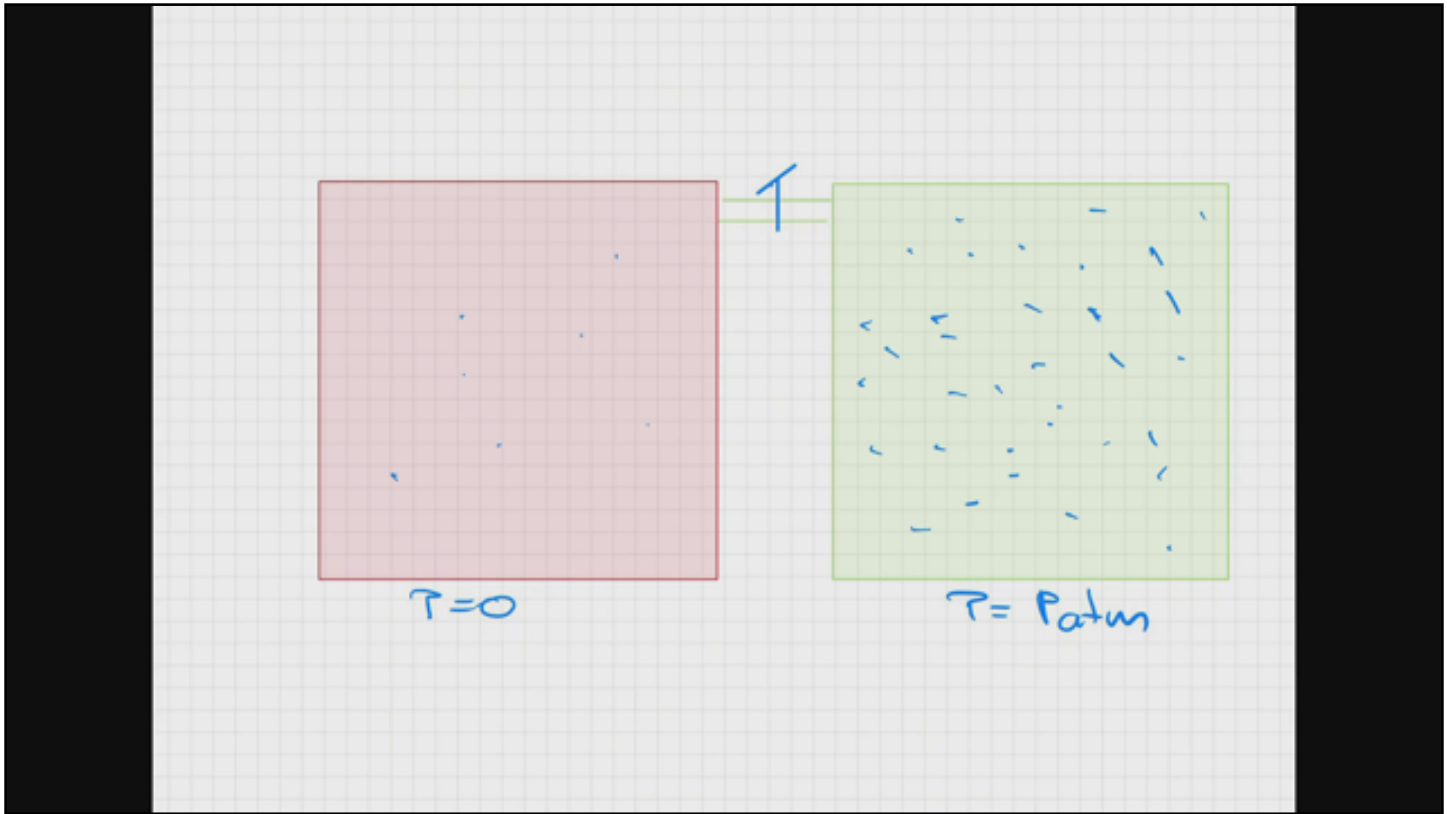
Je vais recommencer cette deuxième heure

notes

résumé

47m 18s





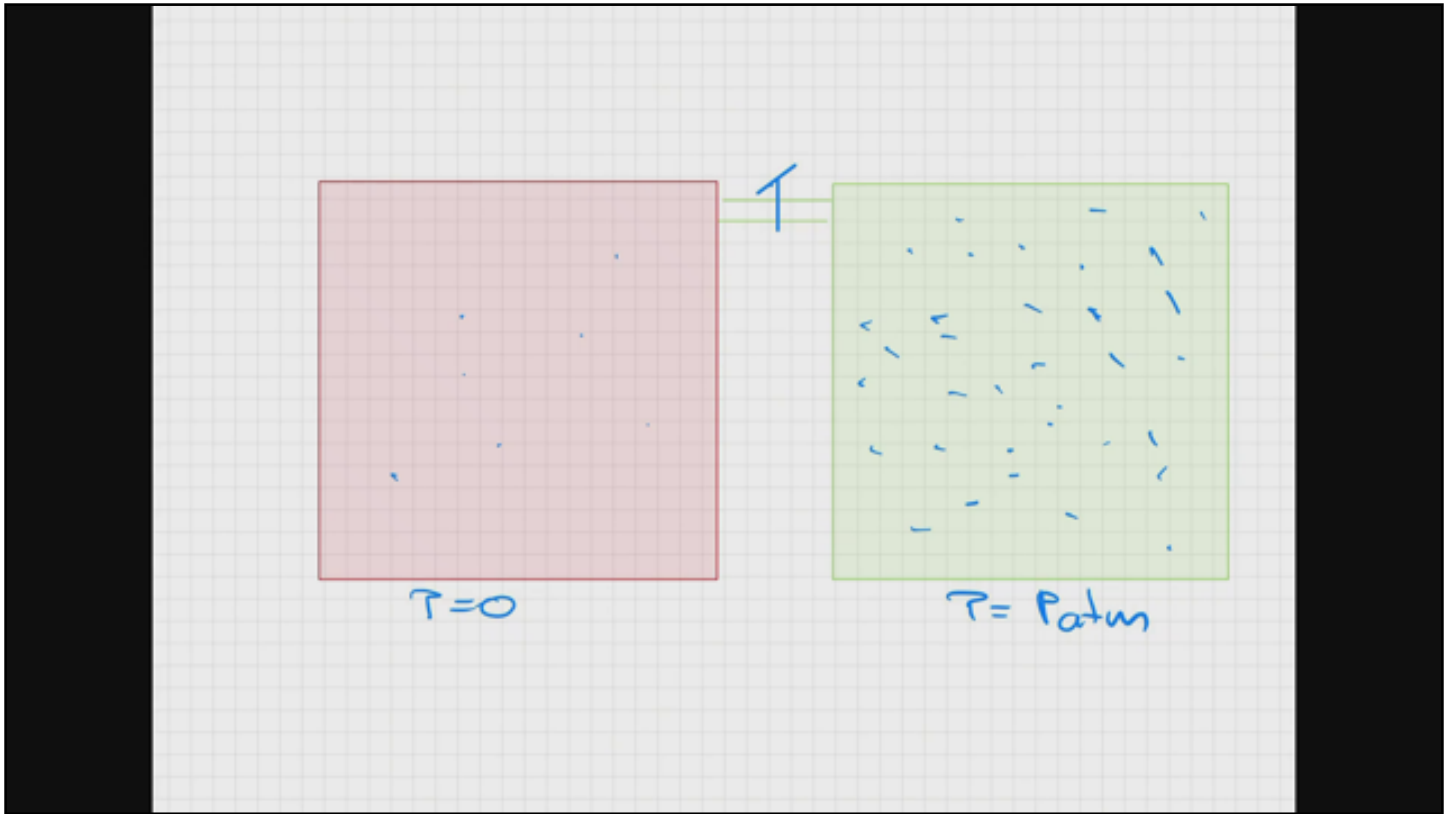
avec deux expériences.

notes

résumé

47m 36s





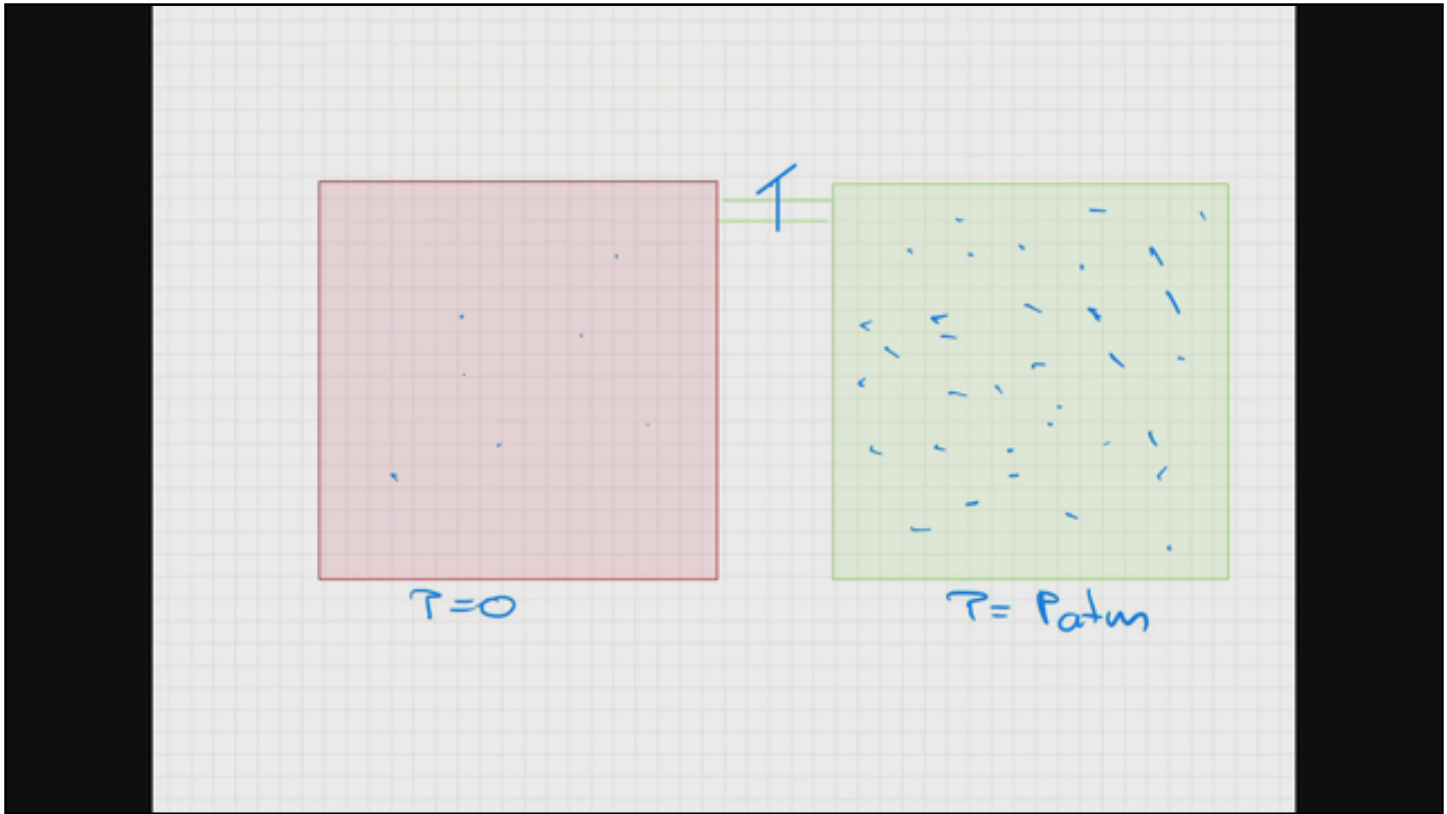
Sur le chariot ici, vous pouvez voir

notes

résumé

47m 40s





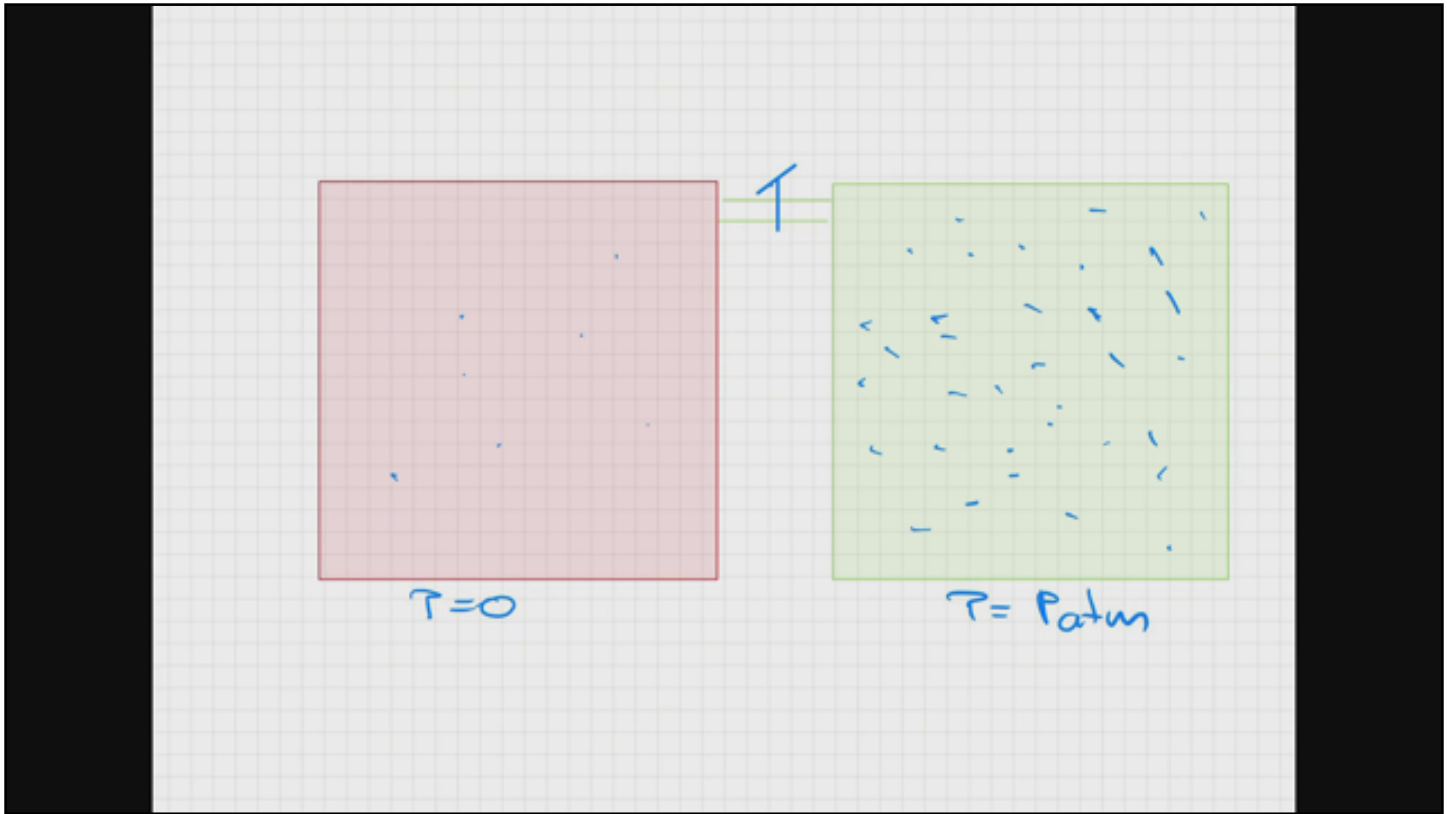
sur la télévision, j'ai deux systèmes,

notes

résumé

48m 10s





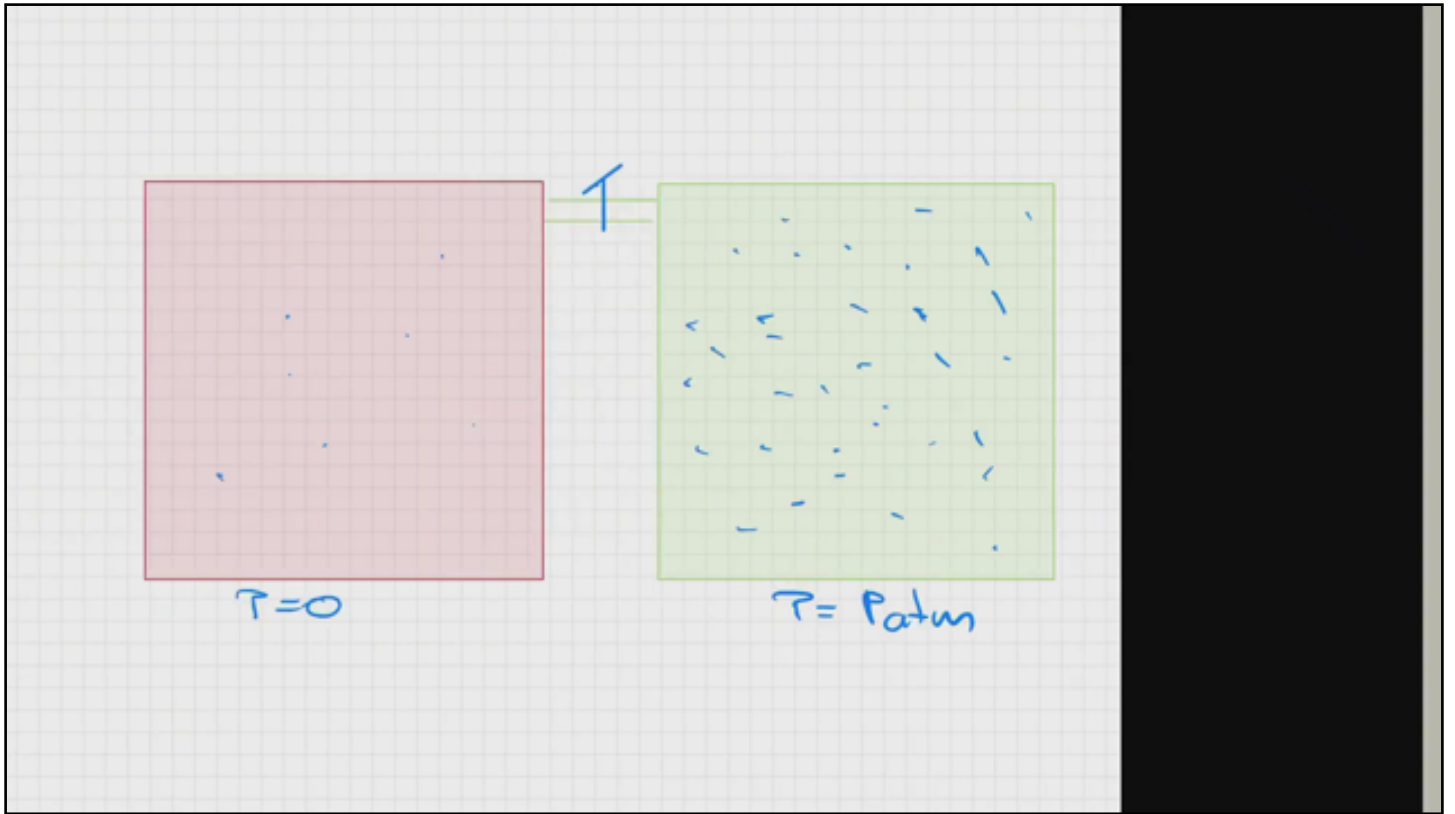
j'ai deux réservoirs. Celui de droite,

notes

résumé

48m 20s





il est rempli d'air, il a une pression

notes

résumé



3.4.12 Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, V)$

- Système divariant $\Rightarrow P = P(T, V)$
- On définit deux coefficients d'origine expérimentale:

- ① $C_V(T, V)$: capacité thermique isochore (ou chaleur *spécifique* à volume constant)
- ② $L_V(T, V)$: coefficient de dilatation isotherme (ou *chaleur latente* d'expansion)

- L'échange infinitésimal de chaleur est

$$\delta Q_r = C_V(T, V) dT + L_V(T, V) dV \quad (3.22)$$

- Au niveau des unités, on a:

- ① $[C_V(T, V)] = J \cdot K^{-1}$

- ② $[L_V(T, V)] = J \cdot m^{-3} = pa$

- Dans la pratique, on utilise souvent les valeurs molaires et massiques

$$c_V = \frac{C_V}{n} \quad \text{et} \quad c_V^* = \frac{C_V}{m}$$

atmosphérique, il y a une température d'environ 22,5°C, et dans l'autre, on a fait le vide. Vous pouvez voir ici que le manomètre, il est quasiment à 0°C, alors c'est pas un vide parfait, parce que c'est juste une petite pompe, donc il reste quelques molécules d'air, ce qui fait que je peux toujours mesurer une température, s'il n'y avait plus de molécules d'air, je ne pourrais plus mesurer une température. Et puis ça, c'est pour vous montrer, c'est en lien avec ce qu'on fait aujourd'hui, donc vous avez ces deux réservoirs, comme j'ai dessiné ici, celui qui est en vert, il a plein de molécules d'air, oxygène, azote, puis lui, il en a

notes

résumé

53m 10s



3.4.12 Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, V)$

- Système divariant $\Rightarrow P = P(T, V)$
- On définit deux coefficients d'origine expérimentale:

- ① $C_V(T, V)$: capacité thermique isochore (ou chaleur *spécifique* à volume constant)
- ② $L_V(T, V)$: coefficient de dilatation isotherme (ou *chaleur latente* d'expansion)

- L'échange infinitésimal de chaleur est

$$\delta Q_r = C_V(T, V) dT + L_V(T, V) dV \quad (3.22)$$

- Au niveau des unités, on a:

- ① $[C_V(T, V)] = J \cdot K^{-1}$

- ② $[L_V(T, V)] = J \cdot m^{-3} = pa$

- Dans la pratique, on utilise souvent les valeurs molaires et massiques

$$c_V = \frac{C_V}{n} \quad \text{et} \quad c_V^* = \frac{C_V}{m}$$

très peu, ils sont fermés.

notes

résumé

62m 10s





Puis je vais ouvrir. Qu'est-ce qui va se passer ? Est-ce que les températures vont changer ? Pourquoi ? Est-ce qu'elles ne vont pas changer ? Est-ce qu'il y a du travail qui est échangé ? Donc ça veut dire qu'il y a des variations de volume qui sont en jeu. Faites-vous votre idée, qu'est-ce que vous pensez qui va se passer ? Donc là, j'avais le petit robinet représenté en bleu là-dessus, je vais ouvrir les deux systèmes, les mettre en communication. Vous pouvez voir que la pression, dans le deuxième, est devenue à la moitié de la pression atmosphérique. Vous pouvez voir que, contrairement à la théorie, vous avez dans un des réservoirs échauffé, l'autre qui s'est un peu refroidi, il y a environ 5° de différence, avant c'était 22.5° . Donc en fait la température moyenne est restée la même. Donc ça se s'appelle une détente de joule et ça veut dire qu'on a détendu, on avait deux systèmes, ou deux sous-systèmes, qu'on a réunis, il n'y a pas de travail, il n'y a aucun travail. Le fait d'avoir tourné ne m'a pas demandé d'effort et à la suite de ça, les deux systèmes sont à l'équilibre. Et c'est un processus qu'on dit adiabatique, il n'y a pas d'échange d'énergie avec l'extérieur. Les températures, elles sont quasiment sur les températures qu'on a ici en bien. Si on voulait vraiment le faire prévenir, il faudrait isoler les différentes cellules, mais à ce moment-là on ne verrait pas grand chose. Un grand bloc, c'est pour ça qu'on ne le fait pas. Donc ça, c'est une des expériences qui marche, on va dire, plus ou moins, parce qu'il y a quand même une petite différence de température entre les deux, il faudrait pouvoir vraiment bien mélanger pour se rendre compte. Simplement,

notes

résumé

62m 14s





j'avais un gaz, des fois on le représente aussi, il y a une autre manière de le représenter, peut-être qu'il y a plus parlante, on le représente comme ça. Et puis on va dire qu'il y a une séparation

notes

résumé

Application: Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, V)$

Calculer l'échange de chaleur entre un système et son environnement pour une transformation réversible allant de l'état initial ($T_i = 290 \text{ K}$, $V_i = 1 \text{ m}^3$) à l'état final ($T_f = 300 \text{ K}$, $V_f = 0.98 \text{ m}^3$), qui dure 15 minutes et pendant laquelle la température et le volume évolue linéairement, sachant d'autre part que $C_V = 2000 \text{ JK}^{-1}$, $L_V = 1 \text{ bar}$ et que $PV = nRT$.

- De la variation infinitésimale de chaleur, en intégrant sur le temps, on obtient l'échange de chaleur

$$Q = \int_i^f \frac{\delta Q_r}{dt} dt = \int_{t_i}^{t_f} \left(C \frac{dT}{dt} + L_V \frac{dV}{dt} \right) dt$$

- On remplace $\frac{dT}{dt} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t}$ et $\frac{dV}{dt} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t}$

$$Q = \left(C_V \frac{\Delta T}{\Delta t} + L_V \frac{\Delta V}{\Delta t} \right) \int_{t_i}^{t_f} dt$$

$$Q = C_V \Delta T + L_V \Delta V$$

$$Q = 2000 \times 10 - 10^5 \times 0.02 = 18'000 \text{ J}$$

entre les deux. Et puis on va mettre du gaz seulement ici. Puis après je vais enlever la séparation. Donc ça veut dire que le gaz va se répartir partout. La pression va diminuer parce que j'ai un volume qui est plus grand. Par contre la température du système ne va pas changer, j'ai pas de décharge d'énergie. Aujourd'hui, c'est un petit peu nébuleux, on viendra, ça apparaîtra dans la tori. Puis il y a une autre expérience que je veux vous montrer, ça on les aime bien, elles font un peu de bruit, elles font un peu. Dès qu'il y a du feu, je n'en sais pas quand on aime bien. C'est aussi une transformation on va dire adiabatique. Donc j'ai une canette de coca. À l'intérieur, il y a un tout petit peu d'eau. Puisqu'on va travailler avec la vapeur d'eau, c'est ça le gaz qui va y avoir dedans. On va aller sur la couche. On va la laisser chauffer jusqu'à ce qu'elle commande. Je peux changer la caméra. Jusqu'à ce qu'elle... Voilà, qu'elle commence à grésiller. Puis après, je vais la refroidir rapidement. Donc c'est un processus adiabatique parce que je ne vais pas avoir le temps d'avoir des échanges thermiques avec l'extérieur. Ça va se faire très rapidement. Je vais refroidir, en fait, ce que je vais faire, je vais refroidir très rapidement le gaz qui est à l'intérieur. On va considérer que c'est bon. Attention. Donc elle sait complètement... Parce que le gaz se refroidit rapidement et donc c'est complètement écrasé. Il ne fait pas beaucoup de bruit, mais c'est quand même un peu spectaculaire. Voilà pour les expériences d'aujourd'hui. Revenons à nos échanges de chaleur. Je vais leur mettre dedans parce qu'ils goûtent. OK. Revenons à nos systèmes, à nos équations. On a

notes

résumé

65m 32s



Application: Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, V)$

Calculer l'échange de chaleur entre un système et son environnement pour une transformation réversible allant de l'état initial ($T_i = 290 \text{ K}$, $V_i = 1 \text{ m}^3$) à l'état final ($T_f = 300 \text{ K}$, $V_f = 0.98 \text{ m}^3$), qui dure 15 minutes et pendant laquelle la température et le volume évolue linéairement, sachant d'autre part que $C_V = 2000 \text{ JK}^{-1}$, $L_V = 1 \text{ bar}$ et que $PV = nRT$.

- De la variation infinitésimale de chaleur, en intégrant sur le temps, on obtient l'échange de chaleur

$$Q = \int_i^f \frac{\delta Q_r}{dt} dt = \int_{t_i}^{t_f} \left(C \frac{dT}{dt} + L_V \frac{dV}{dt} \right) dt$$

- On remplace $\frac{dT}{dt} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t}$ et $\frac{dV}{dt} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t}$

$$Q = \left(C_V \frac{\Delta T}{\Delta t} + L_V \frac{\Delta V}{\Delta t} \right) \int_{t_i}^{t_f} dt$$

$$Q = C_V \Delta T + L_V \Delta V$$

$$Q = 2000 \times 10 - 10^5 \times 0.02 = 18'000 \text{ J}$$

un système, c'est un mot qui va revenir, c'est un mot important, il est divariant. Donc c'est un système thermodynamique, thermomécanique. Il a trois variables qui permettent de le décrire. Mais en fait, il a deux degrés de liberté seulement. Donc ça veut dire si je connais deux des variables, je connais l'autre. On a vu la loi des gaz parfaits, PV égale nRT . Je ne change pas le nombre de molécules qui est dans mon système. Le N reste constant. Donc ça veut dire maintenant si je connais PV , je connais forcément T parce que je peux faire T égale PV divisé par nR . Donc c'est un système divariant dont divariant dit, on tendait le 2. Ça veut dire ça vient du nombre 2. J'ai deux variables. Donc aussi, ça a son importance, si j'ai deux variables, j'ai deux degrés de liberté, ça veut dire que c'est une surface. Je suis en train de décrire une surface. Ça c'est un élément topologique à deux degrés de liberté. Si j'ai un seul degré de liberté, ben j'ai en train de me déplacer sur un trait. Il n'y a pas forcément un droit, mais je veux dire que je suis en train de me déplacer à un degré de liberté sur une ligne. Si j'ai deux degrés de liberté, c'est que je me déplace sur une surface. Si j'ai trois, ça veut dire que je suis dans un volume. Il y a près de quatre, cinq, on peut continuer. Mais c'est ça que décrit le système dans lequel. Donc par exemple, on va dire que mon système, je vais le décrire au lieu d'avoir un PV , la fonction de PV et de T égale 0, qui est la fonction des tas standard, ben je peux dire, P est une fonction des

notes

résumé

Application: Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, V)$

Calculer l'échange de chaleur entre un système et son environnement pour une transformation réversible allant de l'état initial ($T_i = 290 \text{ K}$, $V_i = 1 \text{ m}^3$) à l'état final ($T_f = 300 \text{ K}$, $V_f = 0.98 \text{ m}^3$), qui dure 15 minutes et pendant laquelle la température et le volume évolue linéairement, sachant d'autre part que $C_V = 2000 \text{ JK}^{-1}$, $L_V = 1 \text{ bar}$ et que $PV = nRT$.

- De la variation infinitésimale de chaleur, en intégrant sur le temps, on obtient l'échange de chaleur

$$Q = \int_i^f \frac{\delta Q_r}{dt} dt = \int_{t_i}^{t_f} \left(C \left(\frac{dT}{dt} \right) + L_V \left(\frac{dV}{dt} \right) \right) dt$$

- On remplace $\frac{dT}{dt} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t}$ et $\frac{dV}{dt} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t}$

$$Q = \left(C_V \frac{\Delta T}{\Delta t} + L_V \frac{\Delta V}{\Delta t} \right) \int_{t_i}^{t_f} dt$$

$$Q = C_V \Delta T + L_V \Delta V$$

$$Q = 2000 \times 10 - 10^5 \times 0.02 = 18'000 \text{ J}$$

deux autres variables. P est fonction de T et de V. C'est ça que ça veut dire, P égale P ouvrir parenthèse. T, V, fermer la

notes

résumé

3.4.12 Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, V)$

- Système divariant $\Rightarrow P = P(T, V)$
- On définit deux coefficients d'origine expérimentale:

- ① $C_V(T, V)$: capacité thermique isochore (ou chaleur *spécifique* à volume constant)
- ② $L_V(T, V)$: coefficient de dilatation isotherme (ou *chaleur latente* d'expansion)

- L'échange infinitésimal de chaleur est

$$\delta Q_r = C_V(T, V) dT + L_V(T, V) dV \quad (3.22)$$

- Au niveau des unités, on a:

- ① $[C_V(T, V)] = J \cdot K^{-1}$

- ② $[L_V(T, V)] = J \cdot m^{-3} = pa$

- Dans la pratique, on utilise souvent les valeurs molaires et massiques

$$c_V = \frac{C_V}{n} \quad \text{et} \quad c_V^* = \frac{C_V}{m}$$

parenthèse, ça veut dire que mon système, la pression de mon système, elle dépend de la

notes

résumé

70m 22s



3.4.13 Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, P)$

- Système divariant $\Rightarrow V = V(T, P)$
- On définit deux coefficients d'origine expérimentale:
 - ① $C_P(T, P)$: capacité thermique isobare (ou chaleur *spécifique* à pression constante)
 - ② $L_P(T, P)$: coefficient de compression isotherme (ou *chaleur latente* de compression)
- L'échange infinitésimal de chaleur est

- Au niveau des unités, on a:

- ① $[C_P(T, P)] = J \cdot K^{-1}$

- ② $[L_P(T, P)] = J \cdot Pa^{-1} = m^3$

- Dans la pratique, on utilise souvent les valeurs molaires et massiques

$$c_P = \frac{C_P}{n} \quad \text{et} \quad c_P^* = \frac{C_P}{m}$$

$$\delta Q_r = C_P(T, P) dT + L_P(T, P) dP \quad (3.23)$$

volume et de la température. Si je vous donne le volume et la température, vous avez la pression, obligatoirement. Donc dans cette situation, on peut décrire deux coefficients thermiques. C'est ça le but de ce slide. Et vous voyez qu'il s'appelait C pour capacité thermique et puis V pour le fait que c'est à volume constant. Donc on appelle ça la capacité thermique isocore. Donc ça va décrire la situation dans laquelle vous avez éventuellement un réservoir comme ceux avec lesquels on travaille. Le volume va rester constant et puis vous allez amener de la chaleur et vous essayez de comprendre si il va se passer quand vous amenez de la chaleur. Voir comment la température va augmenter lorsque le volume est constant. Vous ne pouvez pas changer le volume. C'est pour ça que ça s'appelle capacité thermique isocore. Capacité parce qu'au fond ça va vous dire quelle est la quantité de chaleur que vous pouvez y mettre pour avoir un changement de température donnée. Ça, finalement, si vous les rembaïsse, vous pouvez imaginer ça. C'est bien sûr une image fausse qui a été abandonnée d'avoir la chaleur comme un fluide. On dit la chaleur c'est cool, le froid c'est cool, etc. C'est une fausse image mais elle a quelques utilités. Donc imaginez simplement que

notes

résumé

70m 28s



$$= \Delta U(T, V)$$

onnement pour une
 $= 1 \text{ m}^3$) à l'état final
 le la température et
 000 JK^{-1} , $L_V = 1 \text{ bar}$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \text{ et } \frac{dV}{dt} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$\left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right) \int_{t_i}^{t_f} dt$$

$$\Delta V$$

$$10^5 \times 0.02 = 18'000 \text{ J}$$

April 28, 2025

16 / 21

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

3.4.13 Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, P)$

- Système divariant $\Rightarrow V = V(T, P)$
- On définit deux coefficients d'origine expérimentale:
 - ① $C_P(T, P)$: capacité thermique isobare (ou chaleur *spécifique* à pression constante)
 - ② $L_P(T, P)$: coefficient de compression isotherme (ou *chaleur latente* de compression)
- L'échange infinitésimal de chaleur est

$$\delta Q_r = C_P(T, P) dT + L_P(T, P) dP \quad (3.23)$$

- Au niveau des uni

$$\textcircled{1} [C_P(T, P)] = J \cdot K^{-1}$$

$$\textcircled{2} [L_P(T, P)] = J \cdot P$$

- Dans la pratique, valeurs molaires e

$$c_P = \frac{C_P}{n}$$

si vous êtes en train de remplir avec de la chaleur, on te dit mais remplir, ça va dépendre de la capacité. Et vous allez à votre température qui va plus ou moins monter suivant la capacité thermique du système. Si vous avez une petite capacité avec peu de chaleur, vous allez montrer rapidement la température. Si vous avez une grande capacité thermique, vous allez mettre de la chaleur, vous allez amener de l'énergie mais ça va monter très difficilement la température. C'est ça le sens de la capacité thermique. Et puis il est isocor, parce que ça veut dire que la volume reste constant. Et on l'appelle CV. Il est hyper important, il apparaît partout, il apparaît

notes

résumé

72m 1s



3.4.12 Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, V)$

- Système divariant $\Rightarrow P = P(T, V)$
- On définit deux coefficients d'origine expérimentale:

- ① $C_V(T, V)$: capacité thermique isochore (ou chaleur *spécifique* à volume constant)
- ② $L_V(T, V)$: coefficient de dilatation isotherme (ou *chaleur latente* d'expansion)

- L'échange infinitésimal de chaleur est

$$\delta Q_r = C_V(T, V) dT + L_V(T, V) dV \quad (3.22)$$

- Au niveau des unités, on a:

- ① $[C_V(T, V)] = J \cdot K^{-1}$

- ② $[L_V(T, V)] = J \cdot m^{-3} = pa$

- Dans la pratique, on utilise souvent les valeurs molaires et massiques

$$c_V = \frac{C_V}{n} \quad \text{et} \quad c_V^* = \frac{C_V}{m}$$

dès qu'on va travailler, la thermodynamique, on va s'intéresser parce que c'est lui qui permet de

notes

résumé

72m 45s



3.4.12 Échange de chaleur réversibles $Q = \Delta U(T, V)$

- Système divariant $\Rightarrow P = P(T, V)$
- On définit deux coefficients d'origine expérimentale:
 - ① $C_V(T, V)$: capacité thermique isochore (ou chaleur *spécifique* à volume constant)
 - ② $L_V(T, V)$: coefficient de dilatation isotherme (ou *chaleur latente* d'expansion)
- L'échange infinitésimal de chaleur est
- Au niveau des unités, on a:
 - ① $[C_V(T, V)] = J \cdot K^{-1}$
 - ② $[L_V(T, V)] = J \cdot m^{-3} = pa$
- Dans la pratique, on utilise souvent les valeurs molaires et massiques

$$\underline{c_V} = \frac{C_V}{n} \quad \text{et} \quad \underline{c_V^*} = \frac{C_V}{m}$$

$$\delta Q_r = C_V(T, V) dT + L_V(T, V) dV \quad (3.22)$$

comprendre à volume constant ce qui se passe quand vous améde l'énergie à un système. Donc ça vous permet de comprendre comment le système va évoluer.

notes

résumé

72m 52s



3.4.14 Échanges de chaleur réversibles (Résumé)

En résumé, si l'échange est réversible, puisqu'on a un système divariant, l'échange de chaleur peut s'écrire sous trois formes différentes suivant les variables utilisées pour décrire le système:

$$\begin{cases} \delta Q_r = C_V dT + L_V dV \\ \delta Q_r = C_P dT + L_P dP \\ \delta Q_r = \Lambda dP + \mu dV \end{cases}$$

Puis là, un petit frère qui est élevé, c'est le coefficient de dilatation isotherme. Donc c'est la situation dans laquelle vous allez amener de l'énergie, vous allez avoir une dilatation du système, mais la température ne va pas varier. Donc vous vous rendez compte que je vous ai dit qu'on était sur une surface. Donc je suis en train de vous expliquer comment on va pouvoir se déplacer dans une direction et dans l'autre. Si les directions c'est V, été. Donc je vous explique ce qui se passe quand vous ne changez pas la température, vous ne changez pas le volume. Donc quand vous avez un changement, on va s'intéresser quelle partie de volume on va faire un chemin où on se déplace, sans changer la température, on change que le volume, puis un autre chemin dans lequel on va changer que là, je ne sais plus où j'en suis, mais je crois que c'est que le volume mais pas la température, ou l'inverse, je sais plus que j'ai dit dans ma première phrase. Et donc ça va me dire que dans cette situation-là, vous pouvez dire que l'échange infinitesimal

notes

résumé

73m 3s



3.4.14 Échanges de chaleur réversibles (Résumé)

En résumé, si l'échange est réversible, puisqu'on a un système divariant, l'échange de chaleur peut s'écrire sous trois formes différentes suivant les variables utilisées pour décrire le système:

$$\begin{cases} \delta Q_r = C_V dT + L_V dV \\ \delta Q_r = C_P dT + L_P dP \\ \delta Q_r = \Lambda dP + \mu dV \end{cases}$$

d'énergie, c'est un delta rond parce que c'est un échange, c'est pas une fonction d'état, peut être lié avec la variation de température et la variation de volume. Je n'ai pas besoin de parler de la pression parce que je suis dans une situation bivariante, donc si la température elle

notes

résumé

74m 19s



3.4.15 Relation de Mayer

Les coefficients des équations (3.22) à (3.23) sont interdépendants: il est possible d'exprimer L_V , L_P , Λ et μ en fonction de C_V et/ou C_P :

- De la leçon 1 on a (eq. 3.8), on a $dT = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V dP + \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P dV$
- En injectant cette différentielle dans les équations (3.22) à (3.23), on obtient

$$\delta Q_r = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V dP + \left[C_V \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P + L_V \right] dV = \Lambda dP + \mu dV$$

$$\delta Q_r = \left[C_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V + L_P \right] dP + C_P \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P dV = \Lambda dP + \mu dV$$

a le volume, j'ai aussi la pression. Donc je n'ai pas besoin d'avoir dans mon équation la pression. C'est ça qui est intéressant. Et ça, c'est pas ce que je suis en train de me déplacer sur une surface. J'ai que deux degrés de liberté. La pression doit obligatoirement suivre. Et donc ces deux quantités sont essentielles. Donc quand on va vous demander voilà, j'ai passé de tel état à tel état, vous pouvez choisir la situation où vous dites moi j'ai un système bivariente, vous allez voir qu'on va avoir d'autres systèmes où c'est pas le p, mais c'est le v qui est exprimé. On peut aussi avoir un avec la température qui est exprimée. Mais je peux, dans cette situation-là, donc suivant les conditions, suivant ce que j'ai géré de mon expérience, je peux choisir

notes

résumé

75m 4s



3.4.15 Relation de Mayer (2)

Exprimer L_V , L_P , Λ et μ en fonction de C_V et/ou C_P

Après identification terme à terme

$$\begin{cases} \Lambda = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V + L_P \\ \mu = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P + L_V \end{cases} \quad (3.24)$$

Ce qui donne finalement

$$\begin{cases} L_P = -(C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V \\ L_V = (C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P \end{cases} \quad (3.25)$$

cette équation-là pour exprimer l'échange de chaleur entre les deux situations. J'étais dans cet état-là, je suis maintenant dans celui-là, c'est quoi l'échange des deux ? Et là, je vais me mettre sur la surface qui représente la pression, puisqu'elle est décrite par la température et le volume. Alors encore deux éléments, c'est les unités, donc le CV, c'est des joules par Kelvin. Et le CV, il faut le comprendre pour un système donné. Je remplis ma canette, pas d'étériorés

notes

résumé

75m 55s



3.4.15 Relation de Mayer (2)

Exprimer L_V , L_P , Λ et μ en fonction de C_V et/ou C_P

Après identification terme à terme

$$\begin{cases} \Lambda = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V + L_P \\ \mu = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P + L_V \end{cases} \quad (3.24)$$

Ce qui donne finalement

$$\begin{cases} L_P = -(C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V \\ L_V = (C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P \end{cases} \quad (3.25)$$

d'eau, voilà, j'ai à l'intérieur, je sais pas combien, 3cc, 3,3cc, 3 millilitres d'eau, ça va concerner ce volume-là, quand je parle avec un grand C, quand je parle

notes

résumé

76m 34s



3.4.15 Relation de Mayer (2)

Exprimer L_V , L_P , Λ et μ en fonction de C_V et/ou C_P

Après identification terme à terme

$$\begin{cases} \Lambda = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V + L_P \\ \mu = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P + L_V \end{cases} \quad (3.24)$$

Ce qui donne finalement

$$\begin{cases} L_P = -(C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V \\ L_V = (C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P \end{cases} \quad (3.25)$$

avec un C, c'est majuscule. Maintenant, si je veux que parler

notes

résumé

76m 47s



3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

de l'eau, je ne parle pas d'une situation précise, alors je vais m'intéresser à un petit C , un C minuscule. Et puis, par exemple, alors ça,

notes

résumé

76m 49s



3.4.15 Relation de Mayer (2)

Exprimer L_V , L_P , Λ et μ en fonction de C_V et/ou C_P

Après identification terme à terme

$$\begin{cases} \Lambda = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V + L_P \\ \mu = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P + L_V \end{cases} \quad (3.24)$$

Ce qui donne finalement

$$\begin{cases} L_P = -(C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V \\ L_V = (C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P \end{cases} \quad (3.25)$$

ça va être par le nombre de mûles que j'ai, une mûle d'eau à une certaine quantité, ça représente un côté. Mais je peux aussi m'intéresser à l'aspect massique. Je peux m'intéresser par gramme ou par kilo d'eau, que l'est l'effet de ramener une quantité d'énergie. Donc vous avez un grand CV qui représente une situation précise, déterminée. Et puis vous avez les petits, avec la minuscule, qui représentent une situation générique, soit mûle, soit massique. Donc si c'est un petit C normal, c'est mûle. Si c'est un petit C avec un grand C, on va se mettre un petit C un grand C, mais avec l'étoile, c'est l'étoile qui dit que c'est massique. Alors, il faut l'avoir toujours à regarder. Si vous lisez, je ne sais pas, vous ne savez pas que faire le week-end, vous ouvrez un livre de thermodynamique, vous trouvez ça passionnant. Il faut aller regarder un petit peu les définitions de ces lettres parce que tous les auteurs ne vont pas toujours utiliser. Alors moi, je vais être cohérent dans le cours, je vais toujours utiliser ça, donc vous pouvez considérer ça. Mais peut-être que votre professeur de chimie n'utilise pas les mêmes, je ne sais pas, vous avez vu le verre aussi sans chimie, il utilise les mêmes conventions. Ok. Il dit quoi ? Il dit massique. Il dit un petit M. Ok. Mais ce qui est important, c'est... Bon, la notation pour comprendre ce qu'on lit, mais ce qui est important, c'est que vous différenciez bien ces 3 notions différentes. La notion pour une situation normale, c'est le CV de ce système. Ça, c'est un grand C. Et puis vous avez la notion par gramme ou par mole, donc vous avez massique ou mûle pour exprimer par rapport à la quantité de matière

notes

résumé

77m 6s



3.4.15 Relation de Mayer (2)

Exprimer L_V , L_P , Λ et μ en fonction de C_V et/ou C_P

Après identification terme à terme

$$\begin{cases} \Lambda = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V + L_P \\ \mu = C_P \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P = C_V \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P + L_V \end{cases} \quad (3.24)$$

Ce qui donne finalement

$$\begin{cases} L_P = -(C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_V \\ L_V = (C_P - C_V) \left(\frac{\partial T}{\partial V} \right)_P \end{cases} \quad (3.25)$$

que vous voulez

notes

résumé

3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

considérer. Et puis le LV, lui, c'est des joules par mètre cube. Je ne fais pas toute cette petite analyse pour le LV, parce que vous allez voir dans quelques slides, c'est la dernière slide du cours, en fait avec le CV et encore d'autres, on s'en sort, on arrive à les régaler avec les autres. Donc là, dans cette page, le plus important, c'est le CV. Rappelez-vous du LV, du petit frère, mais c'est quand même le CV qui est le plus important. Capacité thermique isocore. Souvenez-vous du sens de ce mot capacité. Combien d'énergie vous pouvez mettre à l'intérieur du système et que va être la conséquence en différence de température. Et donc là, on a un échange thermique. Ah oui, le Q, c'est une nouvelle référence à l'Allemagne. Ça vient de coëler. On aime bien pour les échanges de chaleur utiliser la lettre Q. Voilà, ça vient. L'Allemagne, c'est vrai qu'en Allemagne, une bonne partie de l'analyse thermodynamique, c'est fait en Allemagne, une bonne partie c'est fait en Angleterre. Les Français ont commencé, mais au XIXe siècle, je trouve qu'il y a eu beaucoup d'efforts en Allemagne et en Angleterre. Donc, un petit calcul, une petite manière pour voir comment on peut utiliser ça. Calculer l'échange de chaleur entre un système et son environnement pour une transformation réversible allant de l'état initial, température initiale, c'est 290 K, volume initial, un mètre cube, à l'état final, 300 K, 0,98 m³, qui dure 15 minutes pendant lesquelles la température et le volume évoluent linéairement, sachant d'autre part que c_V est égal à 2000 joules par Kelvin du système et P est égal à 1 bar par Kelvin. Et puis, à la loi des gaz parfaits, PV est égal à nRT . Donc, comme on vous dit que ça se passe très

notes

résumé

78m 58s



3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

lentement en 15 minutes et que pendant tout ce temps-là, la température et le volume évoluent linéairement, ça veut dire qu'on est dans une situation réversible. Je peux utiliser mon... Pardon, réversible, pas inversible. Donc, je peux dire que mon échange de chaleur s'est égal à l'intégrale. Donc, la première, c'est une intégrale qu'on dit indéfinie. On l'écrit en physique. La première, c'est de la physique, ce n'est pas des maths. I , ce n'est pas une valeur. I , c'est un état. C'est l'état initial. F , c'est l'état final. Donc, ça va être l'intégrale de IAF , de l'état initial à l'état final, de la variation instantanée d'énergie, donc δQ de R divisé par δT , fois δT , ça se passe pendant 15 minutes. Et après, j'ai plus besoin de m'occuper que ça se passe pendant 15 minutes. Je peux aussi exprimer ça comme ça. Donc, ça va être l'intégrale de δQ de R sur l'état initial et l'état final. Donc, maintenant, je peux poser mon équation mathématique. Avant, c'était l'équation physique. Maintenant, j'ai mon équation mathématique équivalente. Donc, ça va être l'intégrale de la... Non, là, j'ai pas encore simplifié. Excusez-moi, je vais trop vite. Je vais écrire ça comme ça. Donc, je vais écrire l'intégrale de C_V fois δT sur δT , ça fait la vitesse à laquelle ma température est en train d'évoluer, et puis plus élevé fois dV sur DT . Et tout ça, je l'intègre par rapport à DT . Ensuite, je me dis que... Ah, il faut que je prenne le truc. Ça, c'est ce qui décrit mon processus. On dit qu'en 15 minutes, les choses évoluent linéairement. Donc, ça veut dire que DT sur petit DT , sur petit DT température, tant, c'est équivalent à la différence de température divisé par la différence de

notes

résumé

3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

temps. C'est pour ça que je mets un grand delta pour... C'est plus la condition infinitésimale. Et puis, je fais la même chose pour la variation de volume. Donc, maintenant, je peux mettre en évidence les choses qui dépendent plus du temps. Donc, ça veut dire que j'ai CV fois DT sur DT , plus élevé δV sur δT , fois l'intégrale du temps. Et donc, je vais arriver. Et j'aurai donc finalement l'intégrale du temps, ça veut dire le temps de différent. Je peux le simplifier ensuite comme ça et j'aurai donc ma quantité de chaleur échangée. C'est CV fois la différence de température plus élevé fois ma différence de volume. Et puis, je peux le calculer et j'obtiens 18 000 joules. Voilà comment on peut utiliser pour calculer lors d'une transformation réversible, la capacité thermique et puis, j'oblique toujours son nom, donc je retourne vers moi, et le coefficient de dilatation isotherme pour comprendre la quantité d'énergie échangée dans la transformation. Alors, ce qu'on a fait par rapport à V et T , on peut le faire aussi par rapport à T et P . C'est la même chose qu'avant. Donc, je ne vais pas repasser énormément de temps. Vous comprenez, mais maintenant, mes variables, elles ont des petits indices différents. Donc maintenant, c'est P , c'est un CV , c'est pas un CV , donc c'est la capacité thermique isobar pour la pression qui est constante. Et puis, l'autre, c'est un LP , c'est-à-dire un coefficient de compression isotherme. Et donc, vous avez la même manière, vous pouvez calculer l'échange de chaleur qui est fait pendant la transformation en intégrant par rapport à la température et par rapport à la pression. C'est, permettez-moi, c'est une expression très familière, c'est kiff kiff bourricot, c'est vraiment la même chose. Simplement, j'ai pris d'autres variables. Peut-être

notes

résumé

3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

que mon problème s'adapte mieux en fonction des données que j'ai, etc. Je peux choisir l'un ou l'autre. Je dois arriver au même calcul si je prends les mêmes conditions. Simplement, je n'ai pas pris les mêmes variables. J'ai 2 degrés de liberté, j'avais plusieurs surfaces à choix. Et au lieu de prendre la surface qui représente un P , j'ai pris la surface qui représente un V . Mais c'est le même calcul, c'est une transformation, c'est la même transformation. Et là, vous avez de nouveau la même chose au niveau des unités. Le CP , c'est des joules par Kelvin. Le LP , c'est des joules par Pascal. Et puis vous avez de nouveau le petit travail avec le CP , le CP étoile. L'étoile, quand vous mettez en petite lettre, ça veut dire que vous êtes en train de parler des valeurs molaires ou des valeurs massiques. Quand vous mettez le grand, c'est que vous parlez de la valeur totale pour le système. Juste un truc là, si j'ai été cohérent ou pas. Ah non, je ne sais pas pourquoi, j'ai l'impression que c'est... C'est ici, à mon avis, il ne faudrait pas mettre l'étoile. Là, l'étoile devrait disparaître, c'est ça en fait. égale la fonction de P et de V . Donc il y a trois équations pour le même système, mais ces équations, elles sont équivalentes. Ce n'est pas un système de trois équations. C'est trois fois la même chose, mais avec des variables différentes. Parce que j'ai un système divariant et que je peux remplacer les fonctions les unes par les autres. Donc je peux soit exprimer les choses en fonction de T et de V , soit exprimer les choses en fonction de T et de P , soit exprimer les choses en fonction de P et de V . Et vous

notes

résumé

3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

avez chaque fois des coefficients correspondants, etc. Là vous avez le CV et le LV. Là vous avez le CP et le LP. Et puis là on a des valeurs qu'on appelle lambda ou mu ou des fois même kappa. Eh ben ces valeurs, pourquoi je passe assez vite et puis je ne vais pas passer beaucoup de temps sur les L, les lambda et les mu. Parce qu'en fait, je peux, elles sont dépendant les un des autres. Vu que ça décrit le même système, vu que ces trois équations représentent la même chose, en fait ces coefficients ils se font lier les uns aux autres. Il suffit de remplacer les variables. Donc le DV je peux le remplacer par des variables représentant des P et des T. Pour changer l'univers, je dois me retrouver avec les mêmes coefficients. Donc on peut faire ça parce qu'on avait vu dans la leçon précédente, l'équation 3.8 que je peux représenter, c'est pour ça qu'on a un système divariant, ce qui avait caché derrière ce mot divariant, comme je peux représenter la variation de température par une variation de pression ou une variation de volume, alors je suis capable de représenter, de passer des uns aux autres. Donc mon équation d'Eltacur qui était en fonction de CV et puis de LV, je peux l'écrire en fonction de lambda et de mu pour autant que je remplace correctement mes variables. Donc j'arrive à une relation entre ces différents coefficients et en réalité à part pour embêter des étudiants, on va utiliser les lambda et le mu etc. En fait quand on fait des calculs, les physiciens vont toujours utiliser le CPLCV et vont s'arranger avec le CPLCV, c'est en général comme ça que c'est fait. Il y a peut-être une fois de la

notes

résumé

3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

situation très particulière, on va revenir au λ et au μ , et au L_V et au L_P , mais en général. Parce qu'on arrive à montrer que chacune de ces variables dépend des autres. Donc ça veut dire que le λ c'est égal au C_P fois la variation de température, la dérivée de la température par rapport à la pression à volume constant plus le L_P , le μ va être égal au C_V fois la dérivée de la température par rapport au volume à pression constante plus le L_V . Et puis donc on arrive ensuite à les représenter. Et ça se s'appelle les relations de Maillière. Voilà. C'est où je voulais en arriver aujourd'hui, c'était vachement plus vite que ce que je pensais. Donc c'est une question. Ce qui est important de la leçon d'aujourd'hui, laissez-moi un peu réinsister, parce que c'est vraiment un concept important, c'est vraiment cette notion de capacité thermique. C'est la première chose qu'il faut que vous mettiez l'effort suffisant pour comprendre. C'est donc la quantité d'énergie que je peux mettre à l'intérieur d'un système. Et puis ça va être en relation avec la montée de température. Puis ensuite, quand on a, pour le plus grand problème à l'envers, maintenant on a une transformation, on essaie de voir à quoi correspondent les échanges de chaleur dans cette transformation. Première question, est-ce que c'est réversible ? Est-ce que c'est pas réversible ? Si c'est pas réversible, il faudra trouver un autre chemin et c'est pas la leçon d'aujourd'hui qui va vous aider. Si c'est réversible, aujourd'hui vous avez tous les éléments pour faire le calcul des échanges de chaleur. Et vous devez décider maintenant si votre système, puisqu'il est divariant, vous pouvez l'exprimer en fonction de P et de V , de T et de V , je sais plus

notes

résumé

3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

ce que j'ai dit et ce que je n'ai pas dit, mais si vous voulez en choisir deux. En fonction de ça, vous allez choisir les coefficients. Puis si vous n'avez pas les bons coefficients, enfin vous savez que vous avez besoin d'autres coefficients puis vous pouvez trouver les autres. Et ça, c'est les relations de meilleur qui vous permettent de représenter ça. Capacité thermique, système divariant, relations de meilleur. Ça, c'est vraiment les éléments de la leçon d'aujourd'hui. Alors, que retenir ? On va voir si je me suis dit la même chose quand j'étais tout seul face à mon écran. Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail et de la chaleur. J'ai parlé de ça au début, j'ai parlé du travail, après on a plus parlé de la chaleur. Leur quantité infinitésimale ne sont pas des différentiels exacts, raison pour laquelle on utilise δQ et δV . Donc là, vous avez, ce n'ont pas des différentiels exacts, c'est un terme mathématique. Et la conséquence physique de ça, parce que quand les choses ont été faites, on se rend compte qu'il y a vraiment un parallèle entre les maths et la physique, ça veut dire que ce n'est pas des variables d'état. Donc quand je dis que ce n'est pas des variables d'état, c'est un argument physique. Quand je dis que ce n'est pas des différentiels exacts, c'est un argument mathématique. Mais qui dit la même chose. Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\int p dv$. C'est le travail. Vous avez du travail dans un système thermomécanique, seulement si vous avez un changement de volume, si vous n'avez pas de changement de volume, il n'y a pas de travail échangé. Et puis il faut vous souvenir $\int p dv$. Il faut toujours

notes

résumé

3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

vous souvenir ce signe moins, une petite particularité quand vous regardez le système après, c'est clair, parce que vous voulez, c'est que quand vous dévasez là-dessus, quand votre piston diminue, vous avez augmenté la pression à l'extérieur, vous voulez que le volume aussi diminue pour être en cohérence entre la variation de la mouvement du piston et la différence de volume. Trois expressions permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible, parce qu'on a un système d'invariant, les coefficients calorimétriques, je n'ai pas utilisé ce mot, je n'ai plus prononcé, mais c'est ça, tous ces trucs, c_p , c_v , c'est des coefficients calorimétriques, c'est ça le nom de ces coefficients, sont reliés entre eux par les relations de mailleurs qui sont dans le... dans le Pensebête, dans le... dans le formulaire, elles sont, j'attends pas du tout de votre part, sachez par coeur, si vous me prenez à suivre à quel moment, je suis incapable de vous les redonner, donc c'est vraiment quelque chose qu'on consulte et qu'on refait correctement. Et puis donc, ça veut dire qu'en général, entre le c_p , le c_v , c'est les deux qu'on choisit comme référence, vous trouvez dans la littérature le c_p , le c_v , c'est qu'un professeur malintentionné, comme moi par exemple, qui donnerait un problème ou on a un mur, un lombe d'âge, en général, on tout passe à travers le c_v , le c_p . On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ces paramètres thermodynamiques PVET. Et donc, vous voyez, ce système s'organiser, vous avez des variables d'état PVET qui vous permettent de savoir où vous allez, vous montez, vous descendez, en plein gré misuat, puis vous savez combien vous transpirez quand vous devez monter d'un mètre ou de

notes

résumé

3.4.16 A retenir de cette leçon

- Un système thermodynamique peut échanger avec son environnement du travail W et de la chaleur Q ,
- Leurs quantités infinitésimales ne sont pas des différentielles exactes, raison pour laquelle on utilise δQ et δW ,
- Le travail lors d'une transformation réversible correspond à $\delta W_r = -PdV$,
- Trois expressions (3.22 à 3.23) permettent de calculer les échanges de chaleur lors d'une transformation réversible,
- Parce qu'on a un système divariant, les coefficients calorimétriques L_V , L_P , Λ , μ , C_V et C_P sont reliés entre eux par les relations de Mayer,
- On a donc des outils pour calculer les échanges d'un système avec son environnement dans une transformation réversible si on connaît ses paramètres thermodynamiques P , V et T .

deux mètres ou de trois mètres. Voilà un petit peu la comparaison familière. Voilà, je suis content de vous laisser, je vous pique des fois du temps. Donc aujourd'hui, je vous donne cinq minutes. On se trouve vendredi à...

notes

résumé