

Support de cours

Cours:

UNIL-123 Physique Expérimentale II

Vidéo:

Lesson12-UNIL-123 Physique expérimentale II

Concepts (extraits des sous-titres générés automatiquement) :

Degrés de liberté des molécules. Énergie totale d'un système. Petit feedback. Capacité thermique d'un gaz. Choses génériques. Degrés de liberté. Petit calcul de savoir. Fonction de la température. Petites variations de température. Reformulation du premier principe. Fin de ce chapitre. Géométrie de la molécule. Degré de liberté. Pouvoir. Nombre d'atomes.



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

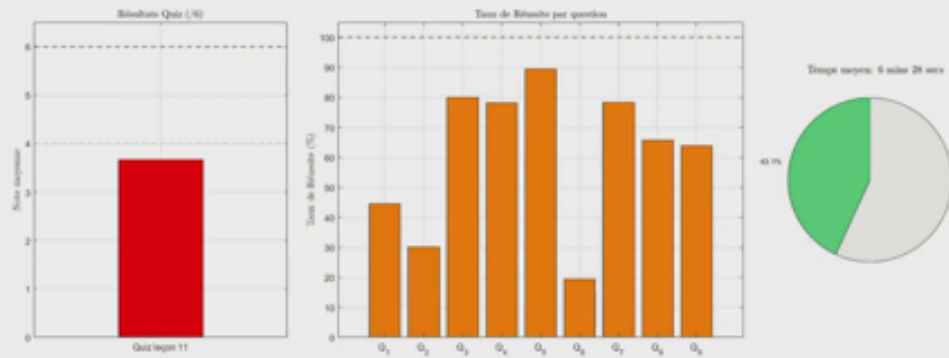


[vers la vidéo](#)

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

<https://www.epfl.ch/education/educational-initiatives/cede/educational-technologies-gallery/boocs-en/>
page 1/62

Résultat du quizz



Fürbringer - Vittorangeli - Dubuisson

Feedback 10^{ème} semaine

6 mai 2025

3 / 7

...

notes

résumé

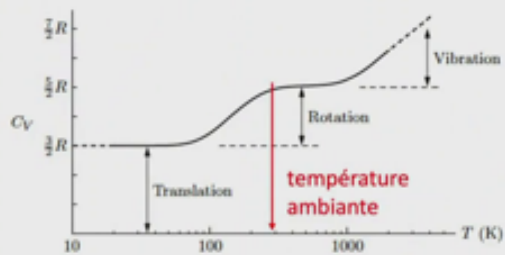
0m 0s



La question 1

Comment la capacité thermique d'un gaz varie-t-elle avec la température ?

- ☐ a. La capacité thermique d'un gaz est inversement proportionnelle à la température.
- ☐ b. La capacité thermique d'un gaz reste constante quelle que soit la température.
- ☐ c. La capacité thermique d'un gaz diminue avec la température.
- ☒ d. La capacité thermique d'un gaz augmente avec la température.



Fürbringer - Vittorangeli - Dubuisson

Feedback 10^{ème} semaine

6 mai 2025

4 / 7

Ces sous-titres ont été générés automatiquement Un petit feedback sur le quiz, ça va, c'était un peu moyen, mais c'est autant vous que moi, vous allez voir pourquoi je dis ça.

notes

résumé

0m 1s



La question 2

Qu'est-ce que le premier principe de la thermodynamique énonce ?

- ☐ a. L'énergie totale d'un système isolé est nulle.
- ☒ b. L'énergie totale d'un système isolé est constante.
- ☐ c. L'énergie totale d'un système peut augmenter ou diminuer.
- ☐ d. L'énergie totale d'un système dépend de sa température.

6 mai 2025

4 / 7

Fürbringer - Vittorangelis - Dubuisson

Feedback 10^{ème} semaine

Donc une des questions qui a eu un très mauvais score, s'il vous plaît, une question qui a eu un très mauvais score, c'est la question 1, comment la capacité thermique d'un gaz varie tel avec la température. Donc vu que j'avais terminé le cours assez rapidement, où on parlait de ça, je peux comprendre que cette question a eu un relativement mauvais score, tant mieux, ça va vous rendre attentif. Donc là, il y a le graphique d'explication qui arrive à la fin de ce chapitre, donc qui a été vu, je pense, en un quart de seconde, lors du dernier cours, la capacité thermique d'un gaz, elle augmente en fonction de la température. Donc je vais reprendre la fin du cours de la semaine passée, puis je vais expliquer ça bien en détail, mais c'est vraiment ce graphique que vous devez avoir en tête. Donc ce qui fait la capacité thermique, c'est tous les degrés de liberté des molécules, plus j'ai de degrés de liberté, plus j'ai de capacité thermique, mais ce qui se passe, c'est qu'en fonction de la température, à cause des quantas, c'est des aspects liés à la mécanique quantique, à basse température, j'ai que le déplacement, que la translation, la température moyenne, j'ai la translation et les rotations, et j'ai les vibrations qui en fait commencent à rentrer en ligne de compte seulement dans les hautes températures. Donc c'est pour ça que la capacité thermique a une tendance à augmenter avec la température. Bien sûr que ça c'est un schéma général après chacun à chaque composé à sa propre cour, mais c'est un petit peu comme ça. L'année passée, il y avait une question à l'examen qui était un peu là-dessus, qui n'a pas fait un énorme succès, mais souvenez-vous, la capacité thermique change

notes

résumé

0m 12s



La question 2

Qu'est-ce que le premier principe de la thermodynamique énonce ?

- ☐ a. L'énergie totale d'un système isolé est nulle.
- ☒ b. L'énergie totale d'un système isolé est constante.
- ☐ c. L'énergie totale d'un système peut augmenter ou diminuer.
- ☐ d. L'énergie totale d'un système dépend de sa température.

température.

6 mai 2025

4 / 7

Fürbringer - Vittorangeli - Dubuisson

Feedback 10^{ème} semaine

avec la température, dans beaucoup de problèmes. En tout cas, quand on fait des petites variations de température, on considère la capacité thermique comme une constante. Par exemple, si vous voulez chauffer de l'eau de la glace jusqu'à la fin de la vapeur, on dit que c'est constant, 4000 kg joule par kg, mais en réalité, il y a des petites variations.

notes

résumé

La question 6

Parmi ces constantes de physique, laquelle est la constante de Boltzman ?

- ☐ a. $9.8m \cdot s^{-2}$
- ☐ b. $6 \times 10^{23} mol^{-1}$
- ☒ c. $8.31J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
- ☐ d. $1.38 \times 10^{-23} mol$

Oops !

Fürbringer - Vittorangeli - Dubuisson

Feedback 10^{ème} semaine

6 mai 2025

6 / 7

Ensuite, il y avait une réinterprétation, une reformulation du premier principe. Une manière de redire ça, c'est que c'est l'énergie totale d'un système isolé et constante. La première, l'énergie totale d'un système isolé est nulle. C'est pas vrai, l'énergie n'est pas nulle. Si il n'y a pas d'énergie, il n'y a plus rien. Donc l'énergie, la première, ça ne peut pas être du tout le cas. L'énergie totale d'un système peut augmenter ou diminuer. Oui, ça c'est vrai, mais ce n'est pas le premier principe. Et puis l'énergie totale d'un système dépend de sa température. Oui, mais ce n'est pas nouveau, ce n'est pas le premier principe. Le premier principe, ce qu'il dit, c'est que l'énergie totale d'un système isolé est constante. Donc l'énergie se conserve en général, on doit dire, dans un système isolé, mais souvent on oblige cette partie dans un système isolé.

notes

résumé

2m 32s



Mind map

Dans le dossier Examen de Moodle, il y a des cartes conceptuelles sur la thermodynamique !

Fürbringer - Vittorangeli - Dubuisson

Feedback 10^{ème} semaine

6 mai 2025

7 / 7

Puis la dernière, c'est autant pour moi. Je ne sais pas quoi, je crois que je n'avais pas fini la question. Je pense que j'avais commencé à la faire, je l'avais changé, puis je n'ai pas terminé. Donc elle est mal finie. Il y a encore des dollars, dollars partout. Puis la réponse est mauvaise. Je voulais la constante de Boltzmann, et puis la constante de Boltzmann, c'est celle-ci. Donc je vais oublier les deux derniers dollars pour que ça la pousse bien. Et puis donc c'est mieux que vous ayez tous eu faux, parce que ça veut dire que probablement vous avez répondu juste, et puis c'est le système qui l'a mis, parce que j'avais ma programmée, donc en tout cas pas ça. Et puis voilà, désolé.

notes

résumé

3m 33s



Physique Générale II

Transformations de gaz

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

May 12, 2025

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 12, 2025

1 / 31

Et puis ça c'est pour vous, il n'y avait pas une seule carte mentale pour André Diffé. Par contre, ce que je vous propose aussi, c'est si vous allez regarder dans le chapitre examen, vous avez donc les anciens examens. Si jamais fillez-vous plutôt à l'examen de l'année passée, parce que c'est quasiment le même programme, l'examen des années précédentes, le programme n'est pas exactement le même. Donc c'est tout à fait possible que vous trouviez une question qu'on n'a pas du tout traité dans le cours. Donc ce serait pas étonnant que vous ayez des difficultés à y répondre. Donc si vous voulez en fait vous entraîner, en tout cas l'année passée, l'année d'avant, c'est assez proche. Il y a eu des petits changements, mais c'est assez proche. À ce propos aussi, vous direz, je pense que c'est une bonne nouvelle, je me suis calmé. J'ai décidé qu'on irait. Le dernier chapitre, je ne ferai pas le dernier chapitre, je ne dirais pas jusqu'au second principe de la thermodynamique. Je préfère bien vous expliquer ce qui concerne le premier principe, que vous ayez une bonne base de thermodynamique. Et puis si dans votre vie vous avez besoin d'aller plus loin de thermodynamique, vous aurez déjà une bonne base et vous aurez une appréhension meilleure du second principe de la thermodynamique. Parce qu'autrement, vous vous enseignez, ou vous être enseigné comme les dernières minutes de la semaine dernière, c'est pas top. Voilà, c'est comme ça. J'ai pris du temps, j'ai pris une leçon de plus pour l'optique. Et puis voilà, on a tous que 24 heures par jour et je voulais en tenir compte. Donc comme mentionné, je veux...

notes

résumé

4m 15s



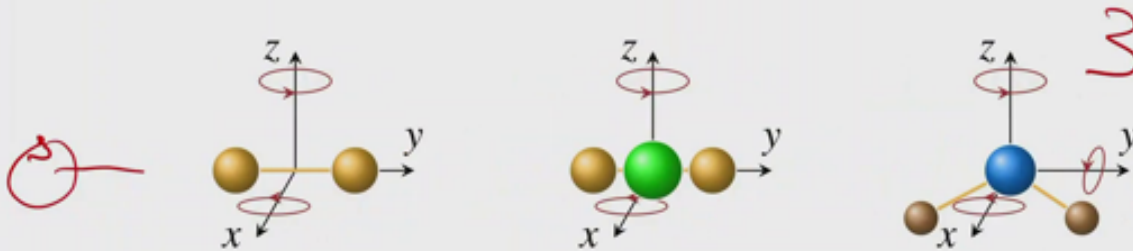
3.6.11 Énergie de rotation

② Rotations autour des axes principaux

l'énergie cinétique moyenne de rotation selon chaque axe correspond à $\frac{1}{2}k_B T$ par particule

$$\frac{1}{2} I_i \langle \omega_i^2 \rangle = \frac{1}{2} k_B T \quad i = x, y, z$$

Pour les molécules linéaires, un des moments d'inertie est nulle



Non, c'est là que je dois aller. Je vais reprendre le cours de la semaine passée à la... Au moment où j'ai commencé à accélérer et que... J'ai voulu vous donner juste quelques éléments, mais ce ne sont pas aussi simples que ça. Donc, on est en train d'étudier dans ce chapitre ce qui influence, comme on peut expliquer de manière microscopique ce qu'on observe au niveau macroscopique, des différences de capacités thermiques dans certains éléments, dans certains corps, etc. On reste sur les gaz parce que c'est là que c'est un petit peu plus facile de dire des choses génériques, mais il y a une partie des choses qu'on voit là qui sont aussi vraies pour les liquides et qui sont éventuellement vraies, qui généralisent aussi pour les solides. Donc, on a pu voir que la température était liée à l'énergie totale. On a vu que l'énergie totale était liée au degré de liberté dans un gaz monoatomique. Donc, dans un gaz monoatomique, le premier élément qu'on peut regarder, c'est la... Là, il n'y a pas que des monoatomiques, mais le premier élément qu'on regarde, c'est la translation. Et on est dans un espace à trois dimensions, donc il y a trois degrés de liberté qui sont liés à la translation. Donc, chacun va faire une demi-KBT pour calculer l'énergie cinétique qui est en magasinée. Et puis, ça va donner pour chacun une demi-R pour le... C'est pas grave, mais le KB, vous vous souvenez que le KB, c'est quand on parle des éléments, c'est la constante de Boltzmann, donc c'est quand on parle des atomes, chaque atome. Et puis, quand on parle de maules, c'est le KR remplacé par le R. Donc, on a une demi-R, on a le CV qui vaut une demi-R par dimension. Donc, je

notes

résumé

5m 57s



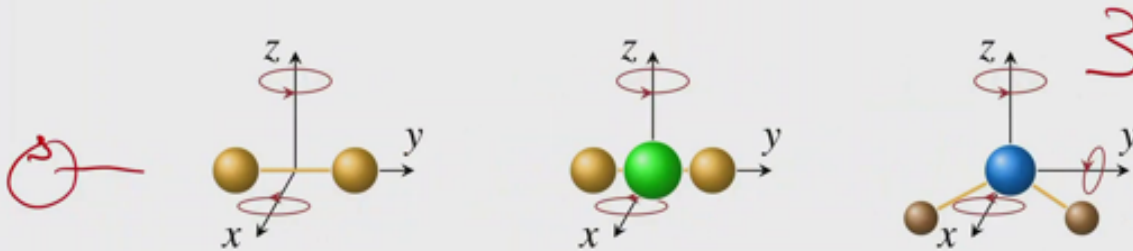
3.6.11 Énergie de rotation

② Rotations autour des axes principaux

l'énergie cinétique moyenne de rotation selon chaque axe correspond à $\frac{1}{2}k_B T$ par particule

$$\frac{1}{2} I_i \langle \omega_i^2 \rangle = \frac{1}{2} k_B T \quad i = x, y, z$$

Pour les molécules linéaires, un des moments d'inertie est nulle



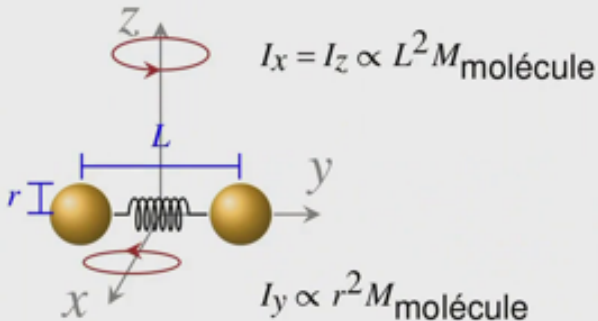
ne sais pas comment faire avec j'écris le sein, I pour dire par dimension. Donc, on aura trois demi-R pour la translation. Et puis là, c'est la même chose, quelle que soit la géométrie de la molécule, qu'elle soit mono ou pluriatomique, qu'elle soit linéaire ou qu'elle soit pas linéaire, c'est la même chose, chacune des molécules peut se déplacer dans trois directions.

notes

résumé

Note: Énergie de rotation et Capacité thermique

Pourquoi la rotation selon l'axe d'une molécule linéaire ne compte-t-elle pas dans la capacité thermique ?



- Pour les rotations: $\Delta E = \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \frac{1}{I}$
- Si I est très petit, alors ΔE est très grand
- Dans notre cas, $I_y \approx 10^{-10} I_x$
donc $\Delta E_y \approx 10^{10} \Delta E_x$
ce qui est trop grand pour être excité à température ambiante : $\Delta E_y \gg k_B T$

Ensuite, là, on avait déjà, regardez ça puisqu'il y a des très... Il y a la rotation, donc, à priori, dans un solide, à trois axes de rotation libre. Il y a différentes manières de les représenter, mais il y a trois degrés de liberté liés à la rotation. Donc, si vous prenez un solide, on voit là un, on voit là un autre, et puis voilà le troisième. Alors, trois, si ce n'est que pour les molécules qui sont linéaires, on ne considère pas celui qui est la rotation dans le sens de la longueur, parce qu'en fait, ils demandent des comptes à trop importants, donc on n'arrive pas à l'exciter, il faudrait vraiment donner température très, très haute pour qu'ils s'excitent. Donc, on a deux degrés de liberté pour les molécules linéaires, et puis on a trois degrés de liberté pour les molécules qui ne sont pas linéaires. Donc là, c'est clair qu'il y a deux manières de voir les choses. On a pu découvrir la géométrie des molécules, on a regardé le CV, et puis, quand vous connaissez la forme de la molécules, vous pouvez revenir en arrière et déterminer quel est le degré de liberté lié à sa rotation, et ça va avoir un impact sur le CV.

notes

résumé

8m 45s



3.6.12 Énergie de vibration

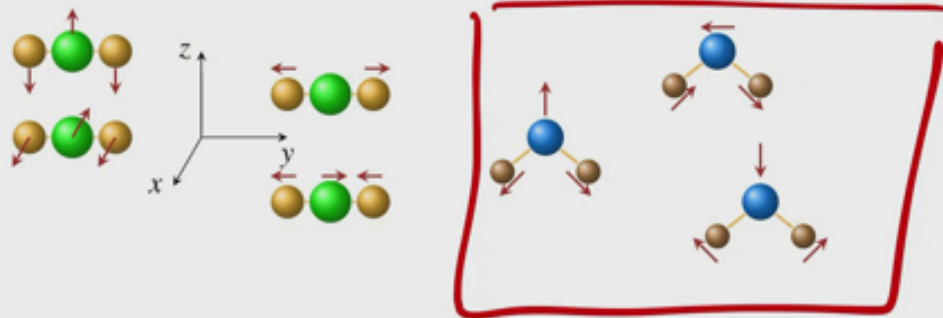
③ Vibrations moléculaires internes

chaque mode de vibration correspond à 2 fois $\frac{1}{2}k_B T$ par particule

car l'énergie vibratoire est la somme d'une énergie cinétique et d'une énergie potentielle (due à la force de rappel)

$$\frac{1}{2}\mu \langle \dot{r}^2 \rangle = \frac{1}{2}k_B T \quad \text{et} \quad \frac{1}{2}k \langle r^2 \rangle = \frac{1}{2}k_B T$$

avec μ la masse réduite, k la rigidité, r le déplacement relatif



Tout ça, c'était une explication liée à la rotation avec un petit calcul, expliquant pourquoi la rotation, dans le sens de la longueur, sur les molécules linéaires, n'était pas rentrée par ligne de compte dans nos calculs. Ensuite, on veut s'intéresser aux énergies liées à l'énergie, liées à l'excitation des degrés de liberté de vibration. Donc là, évidemment que ça va dépendre du nombre d'atomes que vous avez qui peuvent vibrer, et ça va aussi dépendre un petit peu de la géométrie. Alors, il y a quelques images à garder en tête, et puis après, on aura aussi une formule qui permettra de déterminer le nombre de rotations. Donc, si vous avez, on va peut-être commencer par des molécules comme celles de H_2O , vous avez une molécules qui n'est pas linéaire,

notes

résumé

10m 20s



3.6.13 Estimer la capacité thermique d'un gaz parfait

L'énergie thermique se répartit équitablement entre tous les degrés de liberté du système.

① Chaque dimension pour la **translation** du centre de masse compte pour 1 degré de liberté: $N_T = 3$

② Chaque axe de **rotation** d'une molécule compte pour 1 degré de liberté

- $N_R = 0$ pour les molécules monoatomique
- $N_R = 2$ pour les molécules linéaires
- $N_R = 3$ pour les molécules non linéaires

③ Chaque mode de **vibration interne** compte pour 2 degrés de liberté

$$N_V = 3N_{\text{atome}} - N_T - N_R \quad (3.42)$$

Donc

$$f = N_T + N_R + 2 \times N_V \quad (3.43)$$

une molécules comme ça, au niveau des vibrations, il y a trois modes possibles de vibrations. Vous voyez, un premier mode où vous avez tous les atomes qui fait carte du centre de masse et qui se ramènent au centre de masse, vous avez un mode d'ossiation, vous avez d'un côté l'oxygène qui a une vibration verticale, et puis vous avez sur le côté, donc en fait, vous avez un mouvement, si vous regardez mes bras, ça fait un mouvement d'ossiation comme celui-là, et puis après, vous avez un autre mouvement d'ossiation, vous avez l'oxygène qui va dans un sens, et vous avez les deux autres atomes qui vont dans l'autre sens, bien sûr, qui suivent le lien. Donc là, on a trois degrés liberté. Dans la molécule linéaire, par exemple, ça, c'est assez typique de H₂O, ça, ce serait plutôt du CO₂. Par exemple, je suis en train de le passer, l'année d'avant, c'était ça, le problème à l'examen, c'était déterminer les CV à basse, à haute, à moyenne température en fonction de ce que je suis en train d'expliquer maintenant, donc cette question ne rapparaîtra pas à l'examen cette année ou sous une toute autre forme. Mais là, vous voyez qu'il y a quatre modes de vibration, vous pouvez avoir soit les deux oxygènes qui sont en contrephase avec l'atome de carbone, mais ça peut être au sens vertical ou au sens horizontal, bien sûr que c'est par rapport au repère qu'on a, c'est pas la verticalité absolue, ou alors vous avez plutôt des vibrations, on va dire en accordéon, soit vous avez plutôt les deux oxygènes qui sont en anti-phase, alors dans ce cas-là, le centre de gravité, ne changeant pas, on considère le carbone comme fixe, ou alors vous avez les atomes d'oxygène qui sont en

notes

résumé

11m 25s



3.6.13 Estimer la capacité thermique d'un gaz parfait

L'énergie thermique se répartit équitablement entre tous les degrés de liberté du système.

① Chaque dimension pour la **translation** du centre de masse compte pour 1 degré de liberté: $N_T = 3$

② Chaque axe de **rotation** d'une molécule compte pour 1 degré de liberté

- $N_R = 0$ pour les molécules monoatomique
- $N_R = 2$ pour les molécules linéaires
- $N_R = 3$ pour les molécules non linéaires

③ Chaque mode de **vibration interne** compte pour 2 degrés de liberté

$$N_V = 3N_{\text{atome}} - N_T - N_R \quad (3.42)$$

Donc

$$f = N_T + N_R + 2 \times N_V \quad (3.43)$$

phase et puis sont en anti-phase avec l'atome de carbone. Donc là, en fait, on a quatre degrés de liberté. Par contre, ce qu'il faut absolument se souvenir pour la vibration, ça veut dire qu'on modélise ça avec un espèce de petit ressort entre les deux atomes, et ça, ça vaut pour deux. Ça, c'est la particularité du mode de vibration. Donc tous les autres, vous avez une demi-cabé par degré de liberté, dans le cas de la vibration, vous avez un, vous avez deux fois une demi-cabé par degré de liberté.

notes

résumé

3.6.13 Estimer la capacité thermique d'un gaz parfait II

Théoriquement, l'énergie interne vaut

$$U = \frac{1}{2} f nRT \quad (3.44)$$

et la capacité thermique isochore vaut

$$c_V = \frac{1}{2} f R \quad (3.45)$$

- pour un gaz monoatomique $f = 3$
- pour un gaz diatomique $f = 7$
- pour un gaz triatomique:
 - $f = 3 + 2 + 2 \times 4 = 13$ si la molécule est linéaire
 - $f = 3 + 3 + 2 \times 3 = 12$ sinon

Donc là, vous avez un petit résumé de ça. L'énergie thermique se répartie équitablement entre tous les degrés de liberté du système. Chaque dimension de translation vaut pour un. Donc en tout, N_t , donc N_t , c'est le nombre de degrés de liberté pour la translation. Le t , c'est pour translation, ça vaut trois. Pour toutes les molécules mono-atomiques ou polyatomiques. C'est juste le corps qui, la tombe, qui se déplace en tant que tel. Après, pour la rotation, vous avez, pour chaque axe de rotation, vous avez un degré de liberté. Alors, si la molécule est mono-atomique, vous avez pas d'axe, vous avez une géométrie qui est sphérique et on considère qu'il n'y a pas de rotation qui compte. Si vous avez une molécule linéaire, on a dit que vous avez N_r , donc le nombre de grés de liberté pour la rotation qui vaut deux, parce qu'on ne tient pas compte de la rotation dans le sens de la longueur pour les molécules linéaires, parce que le canton est trop grand pour être excité. Et puis, pour les autres molécules, on considère qu'il y a trois axes de rotation qui vont rentrer en ligne de compte. Donc, ça veut dire, dans ce cas-là, on a 0, 2 ou 3 suivant la géométrie de la molécule. Et puis, alors, quand on a une vibration, bien sûr qu'on peut faire référence à... Si on a une bonne mémoire, on peut faire référence à ce que j'ai expliqué, mais il y a aussi la manière de le calculer. Donc, on va considérer le nombre de degrés de liberté par vibration, je l'ai appelé N_V . Et on le calcule en fonction des autres, c'est trois fois le nombre d'atomes dans votre molécule. Il y a priori trois degrés de liberté. L'idée, c'est de se

notes

résumé

14m 54s



3.6.13 Estimer la capacité thermique d'un gaz parfait II

Théoriquement, l'énergie interne vaut

$$U = \frac{1}{2} f nRT \quad (3.44)$$

et la capacité thermique isochore vaut

$$c_V = \frac{1}{2} f R \quad (3.45)$$

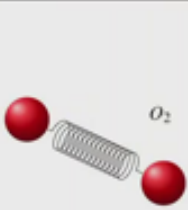
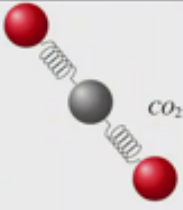
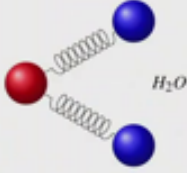
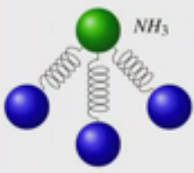
- pour un gaz monoatomique $f = 3$
- pour un gaz diatomique $f = 7$
- pour un gaz triatomique:
 - $f = 3 + 2 + 2 \times 4 = 13$ si la molécule est linéaire
 - $f = 3 + 3 + 2 \times 3 = 12$ sinon

dire, j'ai trois corps, donc dans trois dimensions, au total, je devrais avoir quelque chose comme trois degrés de liberté. Et puis, on va retirer les degrés de liberté qu'on a déjà utilisés. Donc, on enlève NT, c'est le nombre par translation, on enlève NR, c'est par rotation. Donc, c'est là où ça va venir en ligne de compte si ici... Donc, NT en général, c'est trois. Donc, ça change pas grand chose. Par contre, ici, c'est deux ou trois. C'est là où ça va avoir une importance d'avoir fait l'analyse avant. Et puis, alors, ce qui est important, c'est qu'il faut doubler ce nombre, parce qu'on a dit que les degrés de liberté de la vibration comptaient double. Donc, ce qui veut dire qu'à la fin, le fameux F qui nous intéresse pour calculer le CV, eh bien, ça va être le NT, le NR, plus deux fois le NV. Vous pourriez encore essayer de simplifier la formule en tenant compte de la manière que je viens de vous donner pour NV, mais en général, on préfère la mémoriser comme ça. Vous avez le degré de liberté de la translation, les degrés de liberté de la rotation, et deux fois les degrés de liberté de la vibration, et les degrés de liberté, c'est les degrés de liberté total, moins les deux autres degrés de liberté, puisque ils sont mutés par deux, c'est le titre de faire comme ça. Si vous avez le courage de faire comme ça, vous pourriez aussi développer la formule, mais je pense que c'est mieux, ils sont souvenirs comme ça.

notes

résumé

3.6.14 Passons en revue quelques molécules

				
Translation (u_T)	3	3	3	3
Rotation	2	2	3	3
Vibration $2(3N_b - N_R - N_T)$	2	$2(3-5)=8$	$2(3-6)=6$	$2(11-6)=10$
f	5 → 7	5 → 13	6 → 12	15 → 18

Donc, l'énergie thermique qui est répartie uniformément entre les différents degrés de liberté, ça vaut une demi fois $F NRT$, et donc, ce qui veut dire qu'on arrive à dire que le CV est égal à une demi FR. Mais ça, c'est un calcul théorique. Je vais vous montrer après qu'il y a une petite différence avec la réalité. Donc ça, si on vous dit « calculer le CV », c'est comme ça qu'il faut le faire. Mais vous pouvez dans une exemple pratique, en général, vous allez aussi regarder sur une table de physique, sur Wikipédia ou quelque chose, c'est quoi ? Le vrai CV, parce qu'ils sont un petit peu différents, ces chiffres théoriques ne sont pas toujours hyper précis. Et puis ici, on résume, on répète encore. Donc, monoatomique F égale 3, diatomique F égale 7, et puis pour un gaz triatomique, on va être entre 13 et 12, suivant qu'on a une molécule linéaire ou qu'on a une molécule qui n'est pas linéaire. Donc typiquement CO_2 , la molécule linéaire, typiquement H_2O pour une molécule non linéaire.

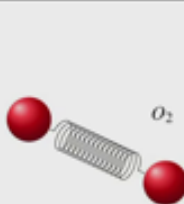
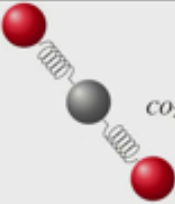
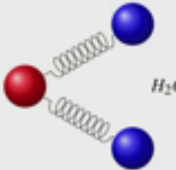
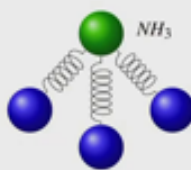
notes

résumé

18m 53s



3.6.14 Passons en revue quelques molécules

				
Translation (u_T)	3 ✓	3 ✓	3 ✓	3 ✓
Rotation	2 ✓	2 ✓	3 ✓	3 ✓
Vibration $f(3N - u_R - u_T)$	2	$2(3-5)=8$	$2(3-6)=6$	$2(11-6)=10$
f	5 → 7	5 → 13	6 → 12	6 → 18

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 6, 2025

35 / 46

Donc là, j'ai fait un petit résumé. Ça, ça venait... C'est une partie d'examen, puis je l'ai amplifié. Donc, à l'examen, il n'y avait pas NH3, mais j'ai un petit peu amplifié. Donc vous, vous avez le slide qui est vide, on va le regarder ensemble. Donc, translation, j'ai mis 3 partout. Pour toutes ces molécules, il y a 3 degrés de liberté pour la translation. Pour la rotation, il y a les deux premières molécules O2 et CO2. C'est des molécules qui sont linéaires. Donc ça veut dire que j'ai seulement 2 degrés de liberté. Et puis pour l'O et pour le NH3, c'est des molécules qui ne sont pas linéaires. Donc j'ai 3 degrés de liberté de rotation. Et puis pour la vibration, j'ai utilisé la petite formule. Que le nombre c'est le nombre d'atomes $\times 3$, moins NH3, moins NH3. Donc pour O2, on avait 2 atomes. Donc 3×2 , ça fait 6, auquel il faut retirer les degrés de liberté des 2 os. Donc 6 moins 5, ça fait 1, $\times 2$, ça fait 2. Donc le total, ça va faire 7. Et puis après, je vous expliquerai pourquoi j'ai rajouté les deux. Mais le premier chiffre, ça correspond seulement aux deux premiers. Je vous le dis déjà et je vous le montrerai après. Parce que ça correspondait aussi à la réponse indiqueuse. Parce que à température moyenne, les rotations ne vont pas rentrer en ligne de compte. Donc ce qui veut dire à température ambiante, j'aurai 5 degrés de liberté. J'aurai 5 comme F, F pour 5. Et puis à haute température F, votre assiette. La même chose pour le CO2. J'ai donc 3 atomes. Donc si j'ai 3 atomes, ça fait 3×3 , 9, auquel j'enlève 5 qui correspondent à la somme des degrés

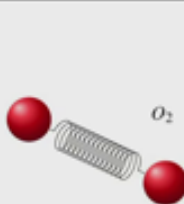
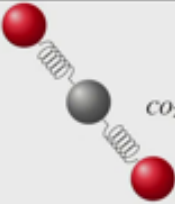
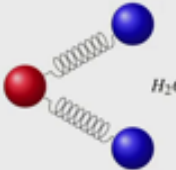
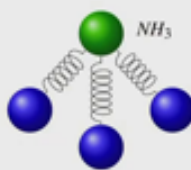
notes

résumé

20m 16s



3.6.14 Passons en revue quelques molécules

				
Translation (u_T)	3 ✓	3 ✓	3 ✓	3 ✓
Rotation	2 ✓	2 ✓	3 ✓	3 ✓
Vibration f $2(3N - u_R - u_T)$	2 5 → 7	$2(3-5) = 8$ 5 → 13	$2(3-6) = 6$ 6 → 12	$2(11-6) = 10$ 6 → 18

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 6, 2025

35 / 46

de liberté de translation et de rotation. Donc ça fait 9 moins 5. 4×2 , ça fait 8. Donc quand je vais sommer mon F, ça fera 13. Mais si les rotations ne rentrent pas en ligne de compte, ça fera 5. Et puis pour ce qui concerne l'H₂O, là j'ai 3 degrés de liberté de rotation. J'ai une molécule non linéaire. C'est la même chose pour... Donc ça j'ai vu, ça j'ai vu. C'est aussi 3 pour le NH₃. Et puis après pour les vibrations, je peux faire mon calcul. Donc pour le H₂O, j'ai 3 atomes. Donc ça fait 3×3 , 9. Et puis j'ai 3 degrés de liberté pour la translation, 3 degrés pour la rotation. Donc ça fait 9 moins 6. 3×2 , 6. Total, 12 degrés de liberté à haute température. À température moyenne, ça va faire seulement 6 degrés de liberté. Puis le dernier, c'est la même chose. Mais j'ai 4 atomes, 4×3 , 12. J'ai 6 degrés de liberté déjà utilisés par la translation et la rotation. Donc ça me fait 12 moins 6. 6×2 , 12. J'ai donc 18 degrés de liberté pour la haute température. Et j'ai 15... Non là j'ai pas, j'ai oublié de corriger là. En fait ça vous voudrait dire quoi ? 6 degrés de liberté à basse température moyenne. Et à basse température, je n'aurai que la translation.

notes

résumé

3.6.15 Que dit l'expérience ?

Gas	Nom commun	$c_V [J \cdot K^{-1}]$	$2 \times c_V / R$	DL
Ar	Argon	12.5	3	3
He	Hélium	12.5	3	3
CO	Monoxide de carbone	20.7	4.98	7
H_2	Hydrogène	20.4	4.9	7
HCl	Chlorure d'hydrogène	21.4	5.14	7
N_2	Azote	20.6	4.98	7
NO	Monoxyde d'azote	20.9	5.02	7
O_2	Oxygène	21.1	5.08	7
Cl_2	Chlore	24.8	5.96	7
CO_2	Dioxyde d'azote	28.2	6.8	12
CS_2	Disulfure de carbone	40.9	9.84	13
H_2S	Sulfure d'hydrogène	25.4	6.12	12
N_2O	Protoxyde d'azote	28.5	6.84	13
SO_2	Dioxyde de soufre	31.3	6.52	12
H_2O	Vapeur d'eau	33.3	6.6	12

Je vais revenir là-dessus. À très très basse température, à quelques kelvin, j'aurais donc que le déplacement, j'aurais pas du tout les vibrations, les rotations et les vibrations.

notes

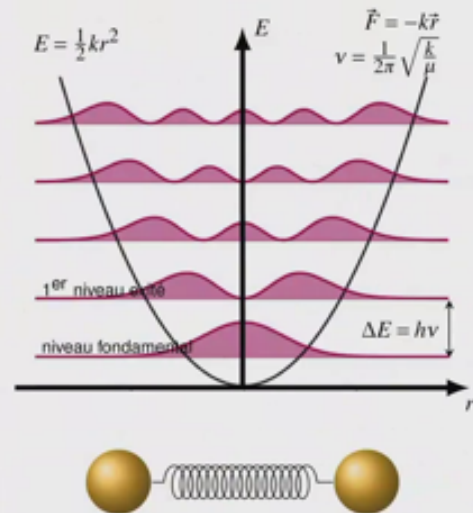
résumé

24m 45s



3.6.16 Mécanique quantique \Rightarrow quantification de l'énergie

- Mécanique classique: l'énergie contenue dans la vibration peut varier de façon continue avec l'amplitude du mouvement.
- Mécanique quantique: paquets d'énergies discrets, « les quanta ».
- En particulier, si l'énergie thermique est plus faible que le quantum d'énergie correspondant au mode de vibration, cette vibration reste dans l'état fondamental:
Si $\frac{1}{2}k_B T < h\nu$ alors l'énergie thermique n'est pas suffisante pour exciter la vibration



Là c'est si on va regarder avec l'expérience, vous voyez que cette manière de calculer, ça fonctionne très très bien. Donc vous avez les différents gaz, quelques gaz qui sont proposés, argon, helium, monoxyde de carbone, hydrogène, etc. Vous avez la valeur du CP expérimental, ce qu'on a été mesurer dans la réalité qu'on a obtenue. Et puis donc à partir du CV expérimental, on a été calculer qu'est-ce que devrait être le nombre F. Et puis donc là on a calculé les degrés de liberté, les F à partir de la théorie. Et puis celui-là on a calculé à partir d'expérimental. Donc vous pouvez voir que pour les monogases, ça fonctionne très bien. Vous pouvez voir que pour les molécules à deux atomes, biatomiques, ça ne fonctionne pas très bien, elles devraient avoir 7 degrés de liberté. En fait, vous voyez que j'arrive en règle générale autour de 5, voire 6, mais c'est entre 5 et 6. Donc ça, ça viendra avec l'explication de la basse température. La température moyenne s'était mesurée à température moyenne. Donc expérimental, température moyenne. Donc je veux dire, autour de, je ne sais pas, 30 degrés, 21 degrés, 50 degrés pas, 1000 degrés ou un de 150 degrés, des choses comme ça. Et puis c'est d'autant plus critique. Après, si vous avez sur les molécules triatomiques, là vous voyez donc les degrés de liberté, les F calculés. Et puis vous voyez ce qu'on a obtenu. C'est en général autour de 7, il y en a un ici autour de 10. Donc là, on a le même phénomène. C'est qu'à température moyenne, les degrés de liberté liés à la rotation, non à la vibration, pardon, ce à la vibration ne rentre pas en ligne de compte.

notes

résumé

24m 58s



3.6.18 Question de compréhension

Laquelle de ces molécules a la plus grande capacité thermique molaire à température ambiante ?:

- Cl_2
- I_2
- H_2
- Toutes identiques

1	H	Atomic Number	1	H	Symbol
3	Li	Lithium	4	Be	Beryllium
11	Na	Sodium	12	Mg	Magnesium
19	K	Potassium	20	Ca	Calcium
37	Rb	Rubidium	38	Sr	Strontium
55	Cs	Cesium	56	Ba	Barium
87	Fr	Francium	88	Ra	Radium
21	Sc	Scandium	22	Ti	Titanium
23	V	Vanadium	24	Cr	Chromium
25	Mn	Manganese	26	Fe	Iron
27	Co	Cobalt	28	Ni	Nickel
29	Cu	Copper	30	Zn	Zinc
31	Ga	Gallium	32	Ge	Germanium
33	As	Arsenic	34	Se	Selenium
35	Br	Bromine	36	Kr	Krypton
39	Y	Yttrium	40	Zr	Zirconium
41	Nb	Niobium	42	Mo	Molybdenum
43	Tc	Technetium	44	Ru	Ruthenium
45	Rh	Rhodium	46	Pd	Palladium
47	Ag	Silver	48	Cd	Cadmium
49	In	Indium	50	Hg	Mercury
51	Sb	Antimony	52	Te	Tellurium
53	I	Iodine	54	Xe	Xenon
55	Ba	Barium	56	La	Lanthanum
57	Ce	Cerium	58	Pr	Praseodymium
59	Nd	Niobium	60	Pm	Promethium
61	Sm	Samarium	62	Eu	Eurium
63	Gd	Gadolinium	64	Tb	Terbium
65	Dy	Dysprosium	66	Ho	Holmium
67	Er	Erbium	68	Tm	Thulium
69	Yb	Ytterbium	70	Lu	Lutetium
71	Hf	Hafnium	72	Ta	Tantalum
73	W	Tungsten	74	Re	Rhenium
75	Os	Osmium	76	Ir	Iridium
77	Pt	Platinum	78	Au	Gold
79	Hg	Mercury	80	Tl	Thallium
81	Pb	Lead	82	Bi	Bismuth
83	At	Astatine	84	Po	Polonium
85	At	Astatine	86	Rn	Radon
87	Fr	Francium	88	Ra	Radium
89	Ac	Actinium	90	Th	Thorium
91	Pa	Protactinium	92	U	Uranium
93	Np	Neptunium	94	Pu	Plutonium
95	Am	Americium	96	Cm	Curium
97	Bk	Berkelium	98	Cf	Californium
99	Es	Einsteinium	100	Fm	Fermium
101	Lr	Lutetium	102	Sg	Seaborgium
103	Db	Dubnium	104	Rg	Rutherfordium
105	Db	Dubnium	106	Lr	Lutetium
107	Bh	Berkelium	108	Hs	Hassium
109	Mt	Moscovium	110	Ds	Darmstadtium
111	Uu	Ununium	112	Cn	Copernicium
113	Uth	Untrium	114	Fl	Flerovium
115	Uup	Unpentium	116	Lv	Livermorium
117	Uus	Unseptium	118	Og	Oganesson

Réponse:



Capacité thermique molaire à volume constant pour l'hydrogène

May 6, 2025 38 / 46

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

Je crois que je vais pas parler plus de ça, je crois pas que c'est d'intérêt. Donc à l'échelle microscopique, l'énergie ne peut pas être reçue de façon continue, c'est des cantas. Donc si vous êtes en train d'essayer de pousser quelqu'un à la balançoire, c'est comme si la force avec laquelle vous allez, chaque fois que la balançoire est vers vous, elle a repoussé au lieu d'être continu, c'est chaque fois une certaine quantité. Vous pourriez mettre un quantat, deux quantat, trois quantat, mais vous ne pouvez pas mettre au milieu. Et puis on se rend compte qu'à cause de la grandeur de ces quantats, la physique quantique nous apprend que c'est l'idée. Et puis, à l'invité, on a lié à une quantité h une certaine fréquence, il y a des cantas qui, à un moment donné, sont trop grands et peuvent pas être excités par la chaleur qui arrive. Et la conséquence de ça, et c'est la seule chose qu'à mon avis, il faut retenir de ce slide, le reste, c'est un petit peu l'explication de où ça vient, ça ne vous intéresse pas, mais ce qui est important, c'est de se souvenir de ça, c'est qu'à basse température, très basse température, vous avez que la translation qui va rentrer en ligne de compte. Après, vous commencez à avoir la rotation qui rentre en ligne de compte et finalement, à plus grande température, vous avez les vibrations qui vont se mettre à avoir un impact. Et donc, ça veut dire que le C_V , vous allez pouvoir mettre de plus en plus d'énergie pour un même écart de température et ça veut dire donc que le C_V va augmenter avec la variation de la température.

notes

résumé

27m 21s



de compréhension

molécules a la plus grande
capacité molaire à température

1

H

Hydrogen

2

He

Helium

3

Li

Lithium

4

Be

Beryllium

5

B

Boron

6

C

Carbon

7

N

Nitrogen

8

O

Oxygen

9

F

Fluorine

10

Ne

Neon

11

Na

Sodium

12

Mg

Magnesium

13

Al

Aluminum

14

Si

Silicon

15

P

Phosphorus

16

S

Sulfur

17

Cl

Chlorine

18

Ar

Argon

19

K

Potassium

20

Ca

Calcium

21

Sc

Scandium

22

Ti

Titanium

23

V

Vanadium

24

Cr

Chromium

25

Mn

Manganese

26

Fe

Iron

27

Co

Cobalt

28

Ni

Nickel

29

Cu

Copper

30

Zn

Zinc

31

Ga

Gallium

32

Ge

Germanium

33

As

Arsenic

34

Se

Selenium

35

Br

Bromine

36

Kr

Krypton

37

Rb

Rubidium

38

Sr

Strontium

39

Y

Yttrium

40

Zr

Zirconium

41

Nb

Niobium

42

Mo

Molybdenum

43

Tc

Technetium

44

Ru

Ruthenium

45

Rh

Rhodium

46

Pd

Palladium

47

Ag

Silver

48

Cd

Cadmium

49

In

Indium

50

Sn

Tin

51

Sb

Antimony

52

Te

Tellurium

53

I

Iodine

54

Xe

Xenon

1

Atomic Number

Symbol

Hydrogen

Name

Nonmetal

Chemical Group Block

Pub

Chem

Physique Générale II

May 6, 2025

39 / 46

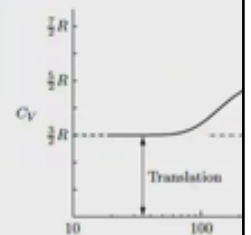
Jean-Marie Fürbringer - EPFL

3.6.19 Capacité

Cas g

- basse température : f
- température ambiante
- haute température:

$$f = 3 + N_R + 2N_V, c_V \approx \frac{3}{2}$$



Alors, petite question pour vérifier finalement votre attention. Entre quelques molécules de chlor, de iode ou d'hydrogène, qu'est-ce que vous pensez à la quelle des molécules à la plus grande capacité thermique molaire à température ambiante ? Donc, qu'en est-il au niveau des degrés de liberté ? Ils ont tous les mêmes degrés de liberté. Ils ont tous la même structure atomique. Donc, en fait, il n'y a rien dans ce que je vous ai présenté jusqu'à présent qui vous permettrait de faire une réponse justifiée en disant, c'est celui-ci ou c'est celui-là.

notes

résumé

29m 19s



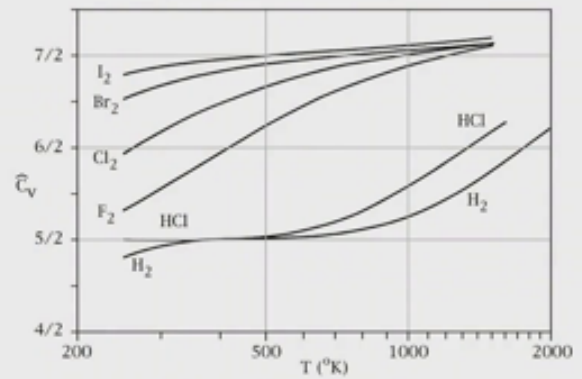
3.6.19 Capacité thermique d'un gaz/liquide diatomique

Cas général

- basse température : $f = 3, c_v \approx \frac{3}{2}R$
- température ambiante: $f = 3 + N_R, c_v \approx \frac{3+N_R}{2}R$
- haute température: $f = 3 + N_R + 2N_V, c_v \approx \frac{3+N_R+2N_V}{2}R$



Quelques exemples



Si on va voir dans l'expérience, on découvrira que c'est le iod qui est la plus importante.

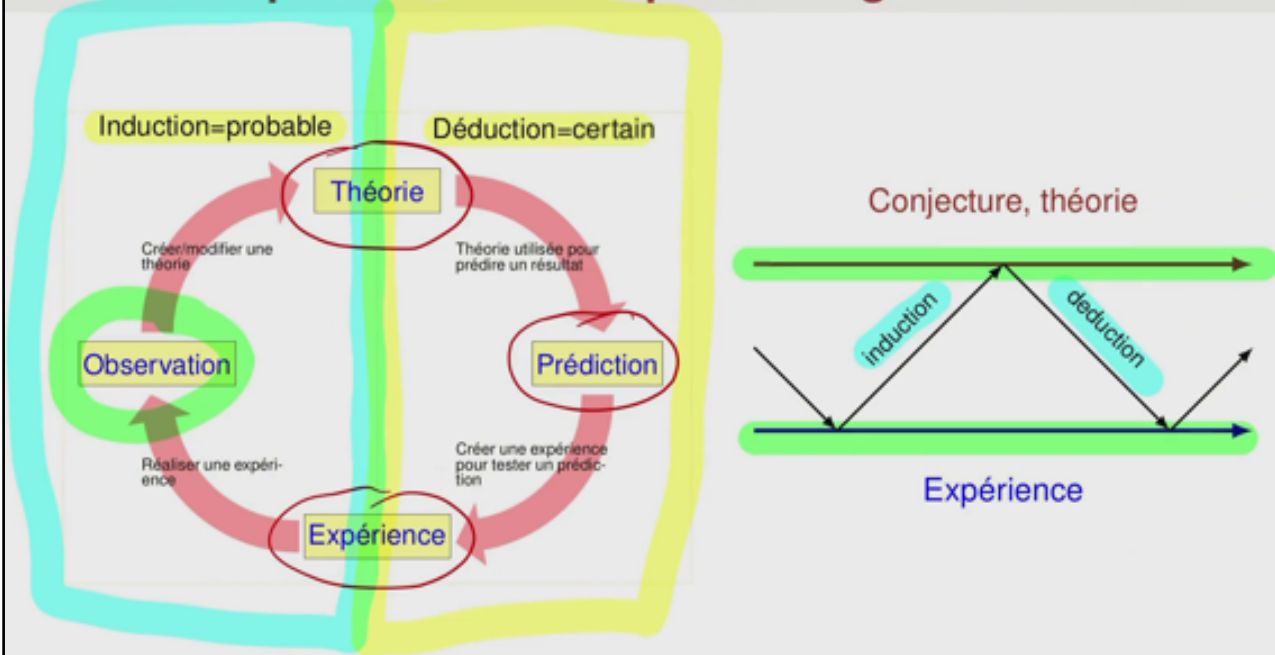
notes

résumé

30m 25s



3.5.1 Quelques éléments d'épistémologie



Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 6, 2025

4 / 46

Après, vient le chlor qui est ici. Donc, vous avez ici la température qui évolue. Donc vous avez ici la température qui évolue et puis après on a le H de qui est ici. C'est cette petite question, cette petite gague comme ça, vous vous dire voilà. C'est bien la théorie, c'est toujours le cas. Enfin on calcule des choses, on fait une théorie, puis bon la réalité elle colle sur certains aspects, et puis sur certains aspects elle ne colle pas, puis voilà, ça fait une recherche en plus, ça fait un physique, c'est de comprendre pourquoi, qu'est-ce qui se passe, qu'est-ce qu'il y a en plus, ce qui fait qu'on ne suit pas toujours exactement la théorie. Et aussi pour vous rendre attentif que les explications sur les vibrations, on comprend bien que c'est ça. Il y a peut-être d'autres choses qui rentrent en ligne de compte, il y a peut-être des aspects aussi, mais il y a des compagnies qui vont rentrer en jeu, et que c'était aussi le premier slide de ce cours si vous vous souvenez, je vous parlais du premier principe,

notes

résumé

30m 26s



•

•

•

•



notes

résumé

31m 54s



Démo : modèle de vibration dans un solide

AudiWeb: [exp 633](#)

Quelles questions poser sur ce modèle ?

-
-
-
-



Maintenant je voulais juste parler un petit peu du solide, c'est la caméra qui est mise, donc ça c'est un modèle de comment ça se passerait dans le solide. Alors dans le solide, dans un cristal, les atomes, eux, ils peuvent pas se déplacer comme dans un gaz ou comme dans un liquide, ils sont bloqués sur place. Et donc si vous prenez, ça, ça représenterait un atome, alors déjà si vous voyez que s'il se met à osciller, finalement il y a l'ensemble qui va osciller, donc c'est aussi une illustration du fait qu'il y a une équipartition de l'énergie entre les différents atomes, entre les différents modes de vibration, parce qu'au bout d'un moment, c'est l'ensemble, j'excite que sur un des atomes, et finalement c'est l'ensemble du solide qui va être excité. J'ai pas une zone qui a plus d'excitation de l'autre, juste au moment où on chauffe une partie, où on fait quelque chose sur une partie, mais au bout d'un moment, les choses vont se tempérer et puis l'ensemble les chauffe. Et c'est un relativement bon modèle du solide. Et vous pouvez voir, on s'intéresse donc au nombre de degrés de liberté, parce que c'est ces degrés de liberté qui vont permettre d'emmagasiner de l'agitation, d'emmagasiner de l'énergie. Et si vous prenez un élément qui est au centre, vous verrez qu'il a six liens, il a des liens avec six autres atomes autour de lui, quatre horizontalement et deux verticalement.

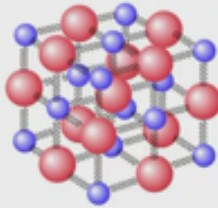
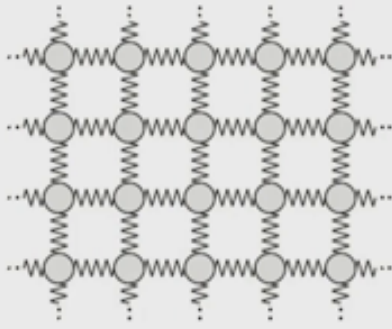
notes

résumé

32m 15s



3.6.20 Solide idéal



Rappel: Chaque vibration interne compte comme 2 degrés de liberté (énergie cinétique + énergie potentiel)

- Dans un solide chaque atome peut vibrer des 3 directions.
- Donc il y a $3 \times 2 = 6$ degrés de liberté par atome.
- Ce modèle prédit donc une capacité thermique molaire

$$c_V = 6 \times \frac{1}{2} \times R = 3R = 24.9 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (3.46)$$

- Toutes ses vibrations sont actives à température ambiante car leurs fréquences sont bien plus faibles que celle des molécules.
- Ces vibrations sont des ondes acoustiques délocalisées dans le cristal, appelées **phonons**.

Alors on aura peut-être, après vous regardez, il y a d'autres structures, il va se passer de nouveau, mais ça c'est une chose simple, après des fois il se passe des choses un petit peu plus compliquées. Mais ça c'est un modèle, ce qu'on pourrait appeler, un solide parfait. Comme il y a des gaz parfaits, il y a des solides parfaits.

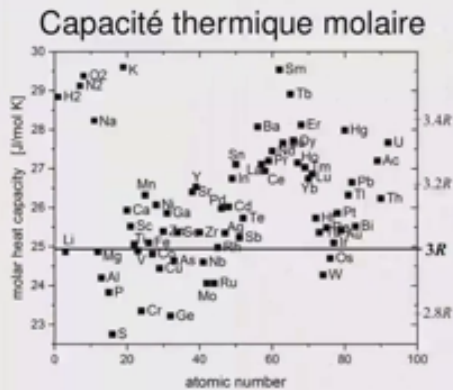
notes

résumé

34m 13s



3.6.21 Quelles sont les valeurs expérimentales?



Question: vous voulez fabriquer une « pierre chaude » qui emmagasine le plus de chaleur possible, mais dont le poids ne doit pas excéder 1 kg. Sans penser au prix, quel matériau choisiriez-vous ?

- Or: 197 uma
- Aluminium: 27 uma
- Argent: 108 uma
- Nickel: 59 uma

On les appelle aussi des solides Einstein. Et donc sans... On va pas passer beaucoup de temps, c'est les seuls slides qui vont parler de ça, mais dans ce cas-là, le nombre de degrés de liberté par atomes, c'est six. Donc on va avoir une valeur du CV qui va être autour de trois R. Donc ça veut dire qu'il y a une valeur des solides, c'est par môles, il faut toujours penser que cette réflexion est par môles, mais d'avoir environ 25 joules par Kelvin et par môles comme CV. Donc c'est un résultat quand même assez surprenant que si on parle de môles, finalement, tous les solides ont des CV qui sont très proches les uns des autres. Vous voyez que par rapport au mode d'excitation, donc c'est j'ai plus du tout des enjeux de rotation, j'ai plus du tout des enjeux de déplacement, c'est juste des vibrations, et ça, ça porte un nom que vous avez peut-être, vous entendrez peut-être une fois, on parle de faux nom, parce que c'est des vibrations comme dans le son, et donc dans un solide, c'est la forme avec laquelle on magasine l'énergie, c'est avec des faux noms.

notes

résumé

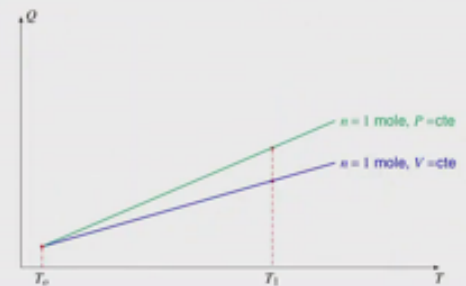
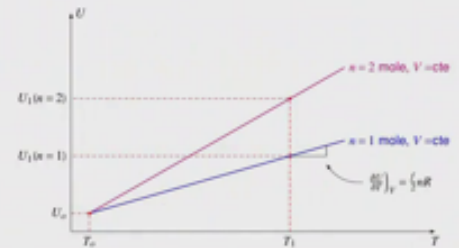
34m 31s



3.6.22 Calcul de la capacité thermique

La capacité thermique dépend des conditions de transformation :

- 1 Si le volume du système est fixe, alors aucun travail ne peut être reçu par le système. Toute la chaleur reçue fait augmenter l'énergie interne
→ **Capacité thermique isochore C_V**
- 2 Si la pression est fixe, et donc le volume peut changer, une partie de la chaleur reçue fait augmenter le volume (expansion thermique), ce qui correspond à un travail (négatif)
→ la Capacité thermique isobare C_p est donc plus grande que C_V : il faut plus de chaleur pour obtenir le même accroissement de température



Si on va regarder la réalité, donc vous avez la ligne ici, qui était celle que je vous ai dit qui vaut trois R, donc ça fait six fois une demi-R comme C_V , vous voyez, après elle fait une question du jugement, on pourrait penser que la théorie n'est pas si fausse que ça, en tout cas on se rend bien compte qu'il y a beaucoup d'éléments qui sont relativement proches de cette valeur de capacité thermique qui est de 25 kJ par moles et par quelle ville. Une question, c'est là, il est peut-être un peu plus sérieux que la précédente, on vous charge de faire une pierre chaude, une pierre chaude c'est selon cette définition, un objet, vous voulez limiter le poids, il ne doit pas faire plus qu'un kilo de poids, mais vous voulez qu'il magasine le plus d'énergie possible. Est-ce que vous allez choisir de l'or ? Vous n'avez pas de limite de budget, donc si vous avez envie de l'or, est-ce que vous allez prendre de l'aluminium, est-ce que vous allez prendre de l'argent, ou est-ce que vous allez prendre du nickel ? Il s'agit de faire un objet qui est dans une seule matière et puis il doit peser un kilo et vous devez pouvoir magasiner le plus d'énergie possible. Donc ça veut dire que, à une température donnée, pour acquérir une température donnée, vous allez devoir le chauffer beaucoup plus, vous allez devoir transférer le plus de chaleur. Alors, vous voulez de l'or, de l'aluminium, de l'argent, ou du nickel ? Qu'est-ce qu'il pense qu'il faut faire ça en or ? Mais il faudra voter, il ne faut pas attendre la bonne réponse. Or, dernier, un, deux, trois, personne, vous voulez de l'or. Aluminium, qui sait qui pense qu'il faut prendre de l'aluminium

notes

résumé

36m 0s



3.6.22 Calcul de la capacité thermique

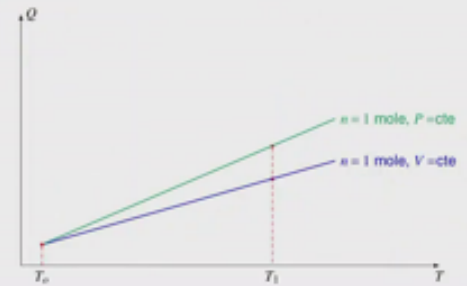
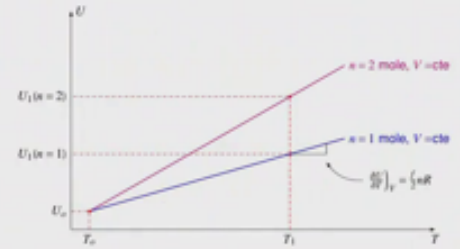
La capacité thermique dépend des conditions de transformation :

- 1 Si le volume du système est fixe, alors aucun travail ne peut être reçu par le système. Toute la chaleur reçue fait augmenter l'énergie interne

→ Capacité thermique isochore C_V

- 2 Si la pression est fixe, et donc le volume peut changer, une partie de la chaleur reçue fait augmenter le volume (expansion thermique), ce qui correspond à un travail (négatif)

→ la Capacité thermique isobare C_p est donc plus grande que C_V : il faut plus de chaleur pour obtenir le même accroissement de température



? Comment ça va des gens courageux ? Un, deux, trois, quatre, cinq, voilà. Qui sait qu'il faut qui... Pardon, excusez-moi. Qui pense qu'il faut de l'argent ? Il faut de l'argent pour tout, vous me direz, mais... Un, il y a beaucoup qui ne vote pas. Tout le monde veut du nickel, alors ? Vous voulez du nickel ? Vous voulez du nickel ? Non, en fait, la bonne solution, c'est de l'aluminium. Donc, c'est du métal. Donc, ils ont tous le même nombre de degrés de liberté. On va partir à 6. Donc, en fait, dans un kilo, ce que vous voulez, c'est d'avoir le plus d'atomes possibles. Donc, celui qui aura le plus d'atomes possibles, c'est celui qui a la densité la plus faible. Parce que si vous avez 27 unités de mass atomique, ça veut dire que ça fait 27 g par mol, vous divisez 1 kg par 27, vous avez le nombre de mol que vous avez à l'intérieur. Donc, quand vous divisez 1 kg par 27, ça va donner une quantité bien plus grande que quand vous le divisez par 59, par 108 ou par 197. Et donc, vous aurez plus d'occiaiores. Donc, vous pourrez en magasiner plus d'énergie. Puis maintenant, je n'ai pas fait le sé, qu'est-ce que ça fait si on regardait ? Parce que là, c'est molère. Alors, l'or, c'est A u. L'or est ici. L'aluminium, c'est A l. Alors, je ne sais pas si c'est A i ou A l. Ça peut être un peu ici. L'argent, c'est A r. Alors, je ne sais pas où il est. A s. Je ne le vois pas. Et puis le nickel, le nickel, c'est N i ou c'est autre chose ? Je ne sais plus. Donc, ils n'ont peut-être pas tous la

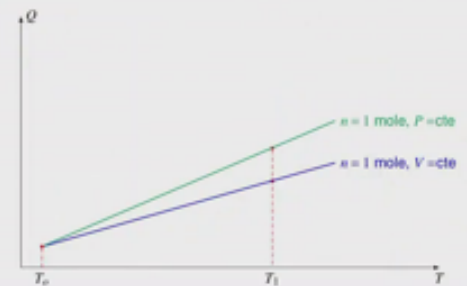
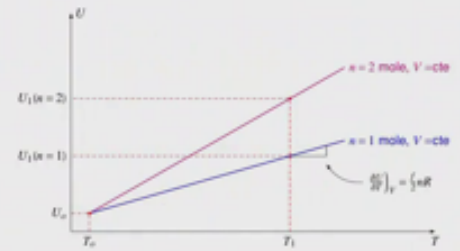
notes

résumé

3.6.22 Calcul de la capacité thermique

La capacité thermique dépend des conditions de transformation :

- 1 Si le **volume du système est fixe**, alors aucun travail ne peut être reçu par le système. Toute la chaleur reçue fait augmenter l'énergie interne
→ **Capacité thermique isochore C_V**
- 2 Si la **pression est fixe**, et donc le volume peut changer, une partie de la chaleur reçue fait augmenter le volume (expansion thermique), ce qui correspond à un travail (négatif)
→ la Capacité thermique isobare C_p **est donc plus grande que C_V** : il faut plus de chaleur pour obtenir le même accroissement de température



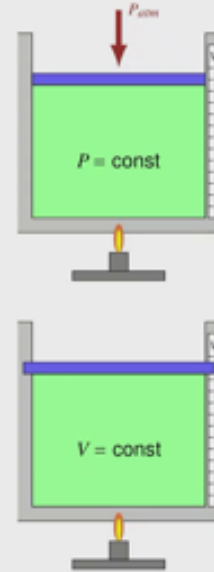
même valeur exactement, mais l'aspect molère, l'aspect de la densité, dans notre problème, a beaucoup plus d'importance que la valeur réelle de la molère. Vous pouvez essayer d'aller vérifier, je pourrais faire ça d'ailleurs, d'aller vérifier les valeurs des chaleurs massiques. C'est le passage de la valeur massique à molère. Il y avait quelques petits problèmes. Je crois que je m'en sens que j'ai déjà posé la question. Elle peut réapparaître. Pas sous cette forme, mais ça, ça ferait une bonne question d'examen.

notes

résumé

3.6.23 Capacité thermique isobare d'un gaz monoatomique

- 1 On cherche une relation du type $Q = n c_P \Delta T$
- 2 En invoquant le 1^{er} principe, on peut écrire
 $\Delta U = Q + W \Rightarrow Q = \Delta U - W$
- 3 On a toujours : $\Delta U = \frac{f}{2} n R \Delta T = Q - P \Delta V$
- 4 Donc $Q = \frac{f}{2} n R \Delta T + P \Delta V$
- 5 Maintenant considérons qu'il s'agit d'un gaz parfait,
 donc $V = \frac{n R T}{P}$
- 6 comme P et n sont fixes, on a $\Delta V = \frac{n R}{P} \Delta T$
- 7 Donc $Q = \left(\frac{f}{2} n R + n R \right) \Delta T = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) n R \Delta T$
- 8 Et $c_P = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) R = c_V + R$



Donc, maintenant, on s'est intéressé à la capacité thermique isocore. Ça veut dire qu'on ne change pas le volume. Maintenant, la capacité thermique en soi, elle, elle va dépendre dans le phénomène de transfert de chaleur. Ça va dépendre de la manière dont on va transférer la chaleur. Donc là, on a parlé du CV comme référence, etc. Mais il y a différents processus. On va passer l'heure suivante à parler de ces processus. Et ça va changer. Ce qui se passe dans isocore, toute l'énergie qu'on va amener, vu que le volume reste le même, va être utilisée pour exciter les molécules. Et on va utiliser toute la chaleur amener pour exciter les molécules. Quand vous êtes une situation à pression fixe, ça veut dire que, suivant la transformation, vous allez gagner ou perdre du volume. Donc ça veut dire qu'il y a un travail, le volume que vous allez devoir gagner. Vous devez le mériter. Et ça, ça demande du travail. Changer le volume dans un gaz parfait, ça représente du travail. Donc, si vous voulez que, quand vous augmentez le volume, vous ne pourrez pas utiliser toute la chaleur que vous recevrez pour augmenter l'agitation. Mais la température, elle représente l'agitation. Donc c'est pour ça que le CP va être plus grand que le CV. C'est une question que je vais faire réfléchir avec les dérivées, etc. Là, on arrive à la même question, mais qui peut être résolue différemment. Le CP est toujours plus grand que le CV. Et juste avant de vous envoyer en pause, faisons le petit calcul de savoir de combien il est plus grand. Donc on cherche une relation, transfert de chaleur et augmentation de la température. On sait qu'on aimerait, pour avoir une situation, avec la pression constante. Donc on a

notes

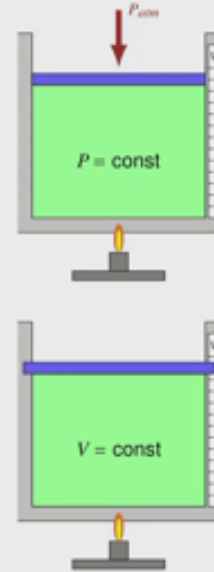
résumé

41m 27s



3.6.23 Capacité thermique isobare d'un gaz monoatomique

- 1 On cherche une relation du type $Q = n c_P \Delta T$
- 2 En invoquant le 1^{er} principe, on peut écrire
 $\Delta U = Q + W \Rightarrow Q = \Delta U - W$
- 3 On a toujours : $\Delta U = \frac{f}{2} n R \Delta T = Q - P \Delta V$
- 4 Donc $Q = \frac{f}{2} n R \Delta T + P \Delta V$
- 5 Maintenant considérons qu'il s'agit d'un gaz parfait, donc $V = \frac{nRT}{P}$
- 6 comme P et n sont fixes, on a $\Delta V = \frac{nR}{P} \Delta T$
- 7 Donc $Q = \left(\frac{f}{2} n R + n R \right) \Delta T = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) n R \Delta T$
- 8 Et $c_P = \left(\frac{f}{2} + 1 \right) R = c_V + R$



le premier principe de la thermodynamique qui nous dit que l'énergie qu'on a transférée, c'est soit sous forme de chaleur, soit sous forme de travail. Et donc que le transfert sous forme de chaleur, c'est égal à la variation de l'énergie moins la partie qui a été transférée en travail, étant donné que dans toutes ces équations, Q et W pourraient être positifs et négatifs suivant ce qu'on fait. On a toujours la définition de notre gaz. On sait que l'énergie c'est une... Peut-être que l'essai va terminer, et puis je vous rends restant. Donc on sait que l'énergie interne, c'est une équation d'état, donc ça ne doit pas dépendre de la manière dont on est arrivé à la situation. Je vous ai chaque fois raconté cette histoire. Si vous vous baladez autour de ma maison, ma maison est toujours à la même altitude. Dès que vous arrivez à ma maison, vous êtes à 650 mètres et c'est stupide. Donc on peut toujours écrire que quel que soit le processus avec lequel on est arrivé à un niveau, ΔU , c'est égal à $\frac{f}{2} n R \Delta T$. Ça, ça reste vrai, parce que ça représente une équation d'état. L'énergie est une équation d'état. Mais ΔU , c'est comme on a écrit en haut, c'est Q moins le travail. Et le travail, c'est toujours moins $P \Delta V$. Et puis là, on peut, on peut, on peut en faire l'intégral parce qu'on dit qu'on est sous une pression constante.

notes

résumé

3.6.24 Que retenir de la leçon d'aujourd'hui?

- A chaque degré de liberté correspond une énergie thermique moyenne égale à $U = \frac{1}{2}RT$ par mole
- La capacité thermique d'un corps dépend des degrés de liberté de molécules qui le constituent
- Théoriquement, (si on néglige la contribution des excitations électroniques et magnétiques) la capacité thermique molaire isochore c_V vaut $\frac{f}{2}R$ et la capacité thermique isobare $c_p = c_V + R$
- Les degrés de liberté f dépendent de la phase (Solide, liquide, gaz) et de la température
 - $f = 3$ pour les systèmes monoatomiques quelque soit la température
 - $f \approx 5$ pour les molécules diatomiques légères (en particulier pour l'air) à température ambiante (vibrations non-excitées)
 - $f \approx 6$ pour les solides à température ambiante
- Les résultats théoriques sont valables pour des gaz, liquides et solides parfaits: expérimentalement les résultats sont plus dispersés

On s'est mis à une situation où on se donne une pression constante. Donc on peut écrire que la quantité de chaleur, c'est égal à l'énergie interne U moins le travail. Donc ça, c'est la même équation que celle-là. Le changement de signe, c'est à cause du fait que le travail W , c'est moins $P \Delta V$. Vous vous souvenez qu'il y a ce signe moins quand on parle du travail. Donc maintenant, on sait que c'est un gaz parfait. Donc on peut dire que V , c'est égal à nRT sur P . Pfx, nfx, on est un système qui est fermé. Pfx, on a mis au départ que c'était la situation qui était isobar. Donc on peut écrire que ΔV , c'est égal nR sur P , fois ΔT . On peut remplacer les choses à travers l'équation et on arrive à cette équation F sur 2, plus 1, fois $nR \Delta T$. Et ceci prouve que le C_p , c'est égal à F sur 2, plus 1, fois R , donc c'est égal à C_V plus R . Et vous pouvez aller en pause.

notes

résumé

45m 49s



Physique Générale II

Transformations de gaz

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

May 12, 2025

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 12, 2025

1 / 31

Slide qui résume ce chapitre. Je pense que ces slides de résumé, on leur importe, on se permet un petit peu de voir les choses de manière panégorique. C'est des premiers éléments qui permettraient de faire une carte mentale, par exemple, du sujet. Donc on a beaucoup parlé des degrés de liberté et puis on a vu qu'au niveau de l'énergie, on avait une demi-RT d'énergie par degrés de liberté. On a regardé ce qui se passait quand on avait le C_p , le C_v . Ça veut dire qu'on avait plutôt une pression constante ou un volume constant. Et puis on a vu différents types de degrés de liberté pour les différents gaz. Observez aussi que j'ai mis 1 heure pour vous présenter ce que j'avais présenté rapidement, je crois, en 7 minutes à la fin du cours. Vous voyez la capacité d'un professeur de condenser les choses. Il faut, je ne sais pas si il faut beaucoup de travail pour augmenter, mais non, c'est important que les choses soient présentes et correctement et pas trop rapidement, j'en ai conscience.

notes

résumé

47m 13s



3.7 Transformations des gaz

On a maintenant un chapitre qui va, on va construire le chapitre suivant sur ce qu'on vient de voir.

notes

résumé

48m 37s



Plan du chapitre

- ① Notions fondamentales
- ② Outils mathématiques
- ③ Perspective expérimentale
- ④ Travail et chaleur
- ⑤ Premier principe
- ⑥ Interprétation microscopique de la capacité thermique
- ⑦ **Transformations des gaz**
- ⑧ Machines thermiques
- ⑨ Fonction enthalpie
- ⑩ Deuxième principe

Donc on va parler de la transformation des gaz.

notes

résumé

48m 49s



Un calcul sur la capacité thermique de l'hélium

On considère le gaz d'Hélium, He, masse atomique 4 uma , $C_p = 5.2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

- calculer le c_V molaire théorique
- calculer le c_V massique théorique
- calculer le c_p molaire théorique
- calculer le c_p massique théorique et comparer avec la valeur expérimentale
- calculer la chaleur nécessaire pour élever la température du gaz de 0°C à 20°C à volume constant et à pression constante et faire le rapport

Je vous invite à être attentifs au 2 premier slide, je ne vais peut-être pas les détailler vu que maintenant j'ai raconté de nouveaux plein de choses, mais quand je dis les leçons 1 à 3, donc les leçons thermodynamiques 1 à 3, donc ça résume, mais je vous laisse quand même le découvrir par vous-même, parce que même si je ne dois pas être vite, il faut quand même avancer un petit peu, mais ça résume principalement les deux résumés, enfin, la résumé de la fin de l'autre, résumé début, il se recoupe un peu, il est normalement pour but d'être en la fin d'une semaine et l'autre au début de l'autre semaine, donc c'est pour ça qu'il se...

notes

résumé

48m 50s



Capacité thermique de l'hélium

On considère le gaz d'Hélium, He, masse atomique 4 uma , $C_p = 5.2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

a) c_V **molaire** théorique : $c_V = \frac{f \times R}{2} \approx \frac{3 \times 8.31}{2} = 12.465 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

b) c_V **massique** théorique : $c_V^* = \frac{c_V}{m} \approx \frac{3 \times 8.31}{2 \times 4} = 3.116 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

c) c_p **molaire** théorique : $c_p = \frac{(f+2) \times R}{2} \approx \frac{5 \times 8.31}{2} = 20.775 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

d) c_p **massique** théorique : $c_p^* = \frac{c_p}{m} \approx \frac{5 \times 8.31}{2 \times 4} = 5.194 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

→ Quasiment égale à la valeur de l'énoncé

e) Chaleur nécessaire pour élever la température du gaz de 0°C à 20°C à volume constant et à pression constante

$$\begin{cases} Q(V = \text{cte}) = c_V \Delta T \approx 12.465 \times 20 \approx 250 \text{ J} \\ Q(P = \text{cte}) = c_p \Delta T \approx 20.775 \times 20 \approx 415.5 \text{ J} \end{cases}$$

Le rapport $\frac{Q(P=\text{cte})}{Q(V=\text{cte})} = \frac{C_p}{C_V} = \frac{(f+2)/2 R}{f/2 R} = 1 + \frac{2}{f} = 1 + \frac{2}{3} = 1.666$

Donc... Là maintenant, alors il y a 2 questions, on va utiliser ces niveaux de degré de liberté, ces niveaux de degré de liberté, ils permettent d'avoir accès à la capacité thermique molaire, donc en général, le calcul est toujours le même, on commence par imaginer le CV avec ces degrés de liberté, après on peut calculer le CP, parce qu'il faut rajouter une fois R au CV, puis après on peut essayer de... de tenir compte des aspects de densité, donc ça veut dire on peut arriver sur les CV et les CP massiques et pas molaires. Donc, si on s'intéresse là à quelques questions, c'est enfin une espèce de petit problème, c'est tout à fait ce qui pourrait être un petit problème, on a l'hélium, on a son unité de masse atomique, donc c'est quelque chose qu'on va dans une table de Mendel-EF et on trouve le nombre d'unités de masse atomique. Votre expérience en chimie vous fait comprendre que ça est d'équivalent à 4 g par mol, donc l'unité de masse atomique, c'est la porte, c'est la donnée que vous avez besoin quand vous voulez arriver sur la masse, par mol, la masse molaire de composé, et puis on a un CP qui est expérimental, qui est de 5,2. Puis on vous demande quel est le CV molaire théorique, quel est le CV massique théorique, quel est le CP molaire théorique, massique, et puis aussi de faire la différence d'énergie pour aller de 0 à 20° , qu'on aille à pression constante ou à volume constant. Et vous voyez que c'est principalement les applications de ce qu'on vient de voir, avec quelques références à des choses qui sont extérieures. Donc si on veut calculer le CV molaire, là pour être correct, j'aurais dû lui mettre... Non, c'est juste,

notes

résumé

49m 31s



Capacité thermique de l'hélium

On considère le gaz d'Hélium, He, masse atomique 4 uma , $C_p = 5.2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

a) c_V **molaire** théorique : $c_V = \frac{f \times R}{2} \approx \frac{3 \times 8.31}{2} = 12.465 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

b) c_V **massique** théorique : $c_V^* = \frac{c_V}{m} \approx \frac{3 \times 8.31}{2 \times 4} = 3.116 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

c) c_p **molaire** théorique : $c_p = \frac{(f+2) \times R}{2} \approx \frac{5 \times 8.31}{2} = 20.775 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

d) c_p **massique** théorique : $c_p^* = \frac{c_p}{m} \approx \frac{5 \times 8.31}{2 \times 4} = 5.194 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

→ Quasiment égale à la valeur de l'énoncé

e) Chaleur nécessaire pour élever la température du gaz de 0°C à 20°C à volume constant et à pression constante

$$\begin{cases} Q(V = \text{cte}) = c_V \Delta T \approx 12.465 \times 20 \approx 250 \text{ J} \\ Q(P = \text{cte}) = c_p \Delta T \approx 20.775 \times 20 \approx 415.5 \text{ J} \end{cases}$$

Le rapport $\frac{Q(P=\text{cte})}{Q(V=\text{cte})} = \frac{c_p}{c_V} = \frac{(f+2)/2 R}{f/2 R} = 1 + \frac{2}{f} = 1 + \frac{2}{3} = 1.666$

c'est comme ça. Donc le CV molaire, ça va être $f \times 2$ sur R , 3×8.31 égale 12.465. Un petit commentaire sur éventuellement ma correction et l'examen. Je n'ai pas été dans ce cours très précis avec le nombre de chiffres significatifs. Donc c'est clair que si vous mettez un résultat qui vient de votre machine à calculer, puis qu'il y a 150 000 chiffres, en tout cas, je ne sais pas si je ferai un commentaire, mais je vais râler au fond de moi. Mais après, si vous faites les calculs intermédiaires, il ne faut pas regarder un petit peu de quel erreur on ferait, mais je suis très permissif avec ça. Je ne vais pas vous embêter parce que vous avez fait avec 2. À moins que je l'aie précisé, alors si je l'ai précisé, je lui ai vu avec 3 chiffres significatifs, je l'ai vu, mais si je n'ai pas précisé, vous avez fait avec 2 et puis moi, j'avais pensé le faire avec 3, je ne vais pas vous embêter pour ça pour l'examen. Donc ne perdez pas de temps, mais pensez quand même à arrondir. Trop, trop, mais je suis tout à fait capable de tenir compte en l'examen que vous ayez arrondi un peu les choses. Voilà. Maintenant, là, une opération qui est intéressante, c'est passer du CV molaire au CV massique. Ça, c'est important. Donc, le CV massique, normalement, on doit lui mettre un étoile, en tout cas quand on est dans les équations. Et c'est quoi ? Le CV massique, c'est le CV molaire divisé par la masse molaire. Donc il faut aller chercher la masse molaire pour trouver. Et donc, vous voyez que le résultat, ça va être 3,8, 8,31, la constante des gaz, divisé par 2 et puis

notes

résumé

Capacité thermique de l'hélium

On considère le gaz d'Hélium, He, masse atomique 4 uma , $C_p = 5.2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

a) c_V **molaire** théorique : $c_V = \frac{f \times R}{2} \approx \frac{3 \times 8.31}{2} = 12.465 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

b) c_V^* **massique** théorique : $c_V^* = \frac{c_V}{m} \approx \frac{3 \times 8.31}{2 \times 4} = 3.116 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

c) c_p **molaire** théorique : $c_p = \frac{(f+2) \times R}{2} \approx \frac{5 \times 8.31}{2} = 20.775 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

d) c_p **massique** théorique : $c_p^* = \frac{c_p}{m} \approx \frac{5 \times 8.31}{2 \times 4} = 5.194 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

→ Quasiment égale à la valeur de l'énoncé

e) Chaleur nécessaire pour élever la température du gaz de 0°C à 20°C à volume constant et à pression constante

$$\begin{cases} Q(V = \text{cte}) = c_V \Delta T \approx 12.465 \times 20 \approx 250 \text{ J} \\ Q(P = \text{cte}) = c_p \Delta T \approx 20.775 \times 20 \approx 415.5 \text{ J} \end{cases}$$

Le rapport $\frac{Q(P=\text{cte})}{Q(V=\text{cte})} = \frac{C_p}{C_V} = \frac{(f+2)/2 R}{f/2 R} = 1 + \frac{2}{f} = 1 + \frac{2}{3} = 1.666$

divisé par 4, ça, c'est la masse molaire. Et ça va donner maintenant, au lieu d'avoir des joules par Kelvin et par mol, je vais avoir des joules par Kelvin et par gramme. Et puis après, le CV molaire, j'ai dû rajouter le plus 1. Alors là, j'ai rajouté plus 2, parce que c'est divisé par 2. Mais c'est comme si j'avais fait f sur 2 plus 1. Ça fait f plus 2 sur 2, c'est la même chose que f sur 2 plus 1. Et puis je peux calculer, et là, j'ai toujours des joules par Kelvin et par mol. Vous avez le calcul. Et puis massique, j'ai la même chose, j'ai divisé par 4, et j'ai des joules par Kelvin et par gramme. Voilà la manière de passer des CV molères au CV massique. Et puis il me semble que l'année passée dans l'examen, j'avais même demandé à passer au CV volumique. Eh ben il fallait encore maintenant regarder quel volume avait pour une certaine densité en passant par la densité. Et puis, peut-être quelque chose qui est intéressant. Donc on fait la chaleur nécessaire pour relever la température du gaz de 0 à 20°, à volume constant ou à pression constante. Donc, Q, volume constant, j'utilise le CV. Q, pression constante, j'utilise le CP. Et puis, vous voyez que dans un des cas, ça fait quasiment une relation de... J'ai fait le rapport, en fait, il faut 66% de plus, il faut 2 tiers, de plus d'énergie quand vous êtes à pression constante, qu'à volume constant, comme je vous ai expliqué avant, parce que vous avez besoin d'énergie pour agrandir le volume, que vous soyez à l'air libre ou pas, ça change rien. Donc, là vous avez le rapport, le rapport des deux. Bien sûr que toutes

notes

résumé

Capacité thermique de l'hélium

On considère le gaz d'Hélium, He, masse atomique 4 uma , $C_p = 5.2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

a) c_V **molaire** théorique : $c_V = \frac{f \times R}{2} \approx \frac{3 \times 8.31}{2} = 12.465 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

b) c_V **massique** théorique : $c_V^* = \frac{c_V}{m} \approx \frac{3 \times 8.31}{2 \times 4} = 3.116 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

c) c_p **molaire** théorique : $c_p = \frac{(f+2) \times R}{2} \approx \frac{5 \times 8.31}{2} = 20.775 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

d) c_p **massique** théorique : $c_p^* = \frac{c_p}{m} \approx \frac{5 \times 8.31}{2 \times 4} = 5.194 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

→ Quasiment égale à la valeur de l'énoncé

e) Chaleur nécessaire pour élever la température du gaz de 0°C à 20°C à volume constant et à pression constante

$$\begin{cases} Q(V = \text{cte}) = c_V \Delta T \approx 12.465 \times 20 \approx 250 \text{ J} \\ Q(P = \text{cte}) = c_p \Delta T \approx 20.775 \times 20 \approx 415.5 \text{ J} \end{cases}$$

Le rapport $\frac{Q(P=\text{cte})}{Q(V=\text{cte})} = \frac{C_p}{C_V} = \frac{(f+2)/2 R}{f/2 R} = 1 + \frac{2}{f} = 1 + \frac{2}{3} = 1.666$

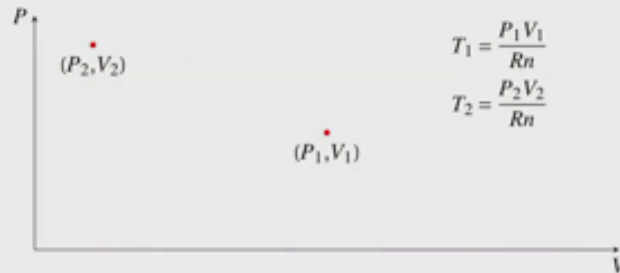
ces transformations, c'est des fois des petits chiffres, mais des relativement grandes quantités de gaz, et je voulais vous rendre attentif et puis vous amuser aussi à la puissance de la pression, la puissance des gaz. Donc... Là, j'ai une pompe, je peux mettre ça sur 5, vous voyez la pression. Donc, ce qui peut être un petit peu particulier aussi avec le monde de la pression, je sais justifier le fait que je voulais vous montrer cette expérience qui est très rigolo, c'est que la pression qui peut... autre peut avoir de l'importance, mais si une pression est très basse, vu qu'autour vous avez une pression atmosphérique, ça peut aussi avoir pas mal d'influence. On va attendre ça ne fasse plus de bruit. Donc là, ce qu'on a,

notes

résumé

3.7.1 Diagramme de Clapeyron

- Le diagramme de Clapeyron est une manière simple de se faire une carte du territoire
- **Gaz parfait** → équation d'état: $PV = nRT$
- Système **divariant**: chaque point de l'espace $P \times V$ est un état bien défini du système car $T = T(P, V)$



on a un tube que je suis en train de vider. Donc maintenant, vous voyez que je suis presque à zéro, vous avez vu le manomètre, presque à zéro. Donc en fond, il n'y a presque plus rien là-dedans. Puis ici, il y a une balle de ping-pong. Puis ici, il y a une boîte de coca. Qu'est-ce qui va se passer si tout d'un coup l'air rentrait dans son les oreilles ? C'est aussi un bon moyen d'avoir attention des élèves.

notes

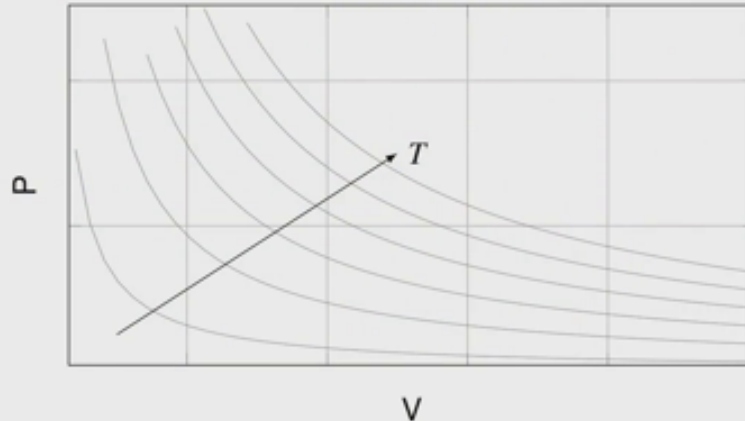
résumé

57m 13s



3.7.2 Diagramme de Clapeyron avec des isothermes

- Équation d'état: la température correspond à des courbes de niveau
- Isotherme: $P(V) = \frac{nRT}{V}$
- Isotherme: $U = N_{part} \cdot f \cdot \frac{1}{2} k_B \cdot T = cte$



On va s'intéresser aux transformations et pour les représenter, les transformations. Donc ça veut dire qu'on va travailler avec une équation d'État. Donc ça, c'est ce que je vous parle depuis deux mois. Ça, c'est ma maison à Champlain. Et puis ça, c'est le territoire au tour. Non, ça, c'est la surface dont je vous parlais. Vous avez la possibilité c'est un gaz, donc une équation d'État. Et on sait que la relation entre vous avez en face de vous la température, vous avez ici le volume, chez vous, ça fait plus de volume chez moi, ça fait moins de volume, et puis vous avez ici une éléction. Et au fond, quand on va faire une transformation, la seule chose qu'on va pouvoir faire, c'est se déplacer sur cette surface-là. Mais c'est toujours un petit peu compliqué de dessiner les choses en trois dimensions. Donc en fait, vu que toute manière c'est une surface, je vais faire une projection dans cette direction-là. Je vais avoir la pression et le volume et je ne vais pas avoir besoin d'avoir la température. Donc il faut plutôt que ce soit comme ça pour vous. Je vais projeter dans la direction de la température et vous aurez sur l'axe le volume et la pression. Et c'est ce qu'on appelle un diagramme de clapperon PV. C'est vraiment une manière. Mais ce que j'aimerais c'est que vous compreniez ça, cette surface-là, c'est la projection de cette surface-là. Et vous devez toujours être sur la surface. Vous n'êtes pas et moi non plus, on n'est pas capable de voler. Donc on est tout le temps sur cette surface-là. C'est pour ça qu'on peut représenter ça sous forme d'un rectangle alors qu'au fond c'est une surface qu'à cette forme-là. Et puis on va faire des calculs et essayer

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

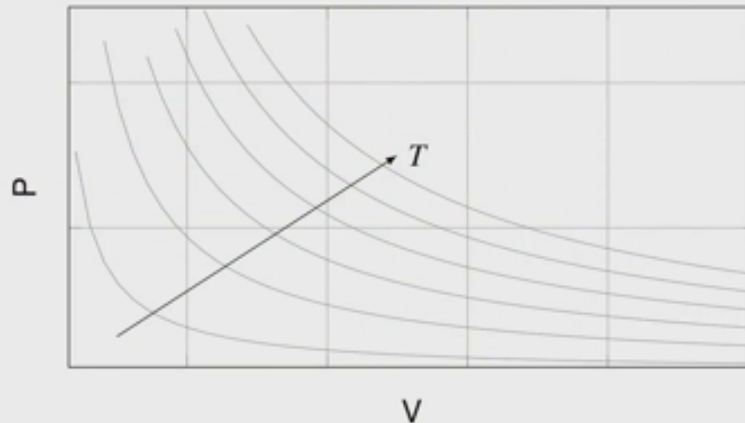
.....

58m 16s



3.7.2 Diagramme de Clapeyron avec des isothermes

- Équation d'état: la température correspond à des courbes de niveau
- Isotherme: $P(V) = \frac{nRT}{V}$
- Isotherme: $U = N_{part} \cdot f \cdot \frac{1}{2} k_B \cdot T = cte$



de comprendre les échanges de température et les échanges de travail qu'on a besoin pour se déplacer. Donc c'est ce slide a pour justification de vous parler de monsieur clapperon c'est celui qui avait déterminé la loi des gaz parfaits de dire qu'on a une équation d'état. Donc ça veut dire que si je ne change pas le nombre de molécules dans un système fermé, j'ai un système à trois variables P, V et T et que comme elles sont liées ça fait une surface, c'est la surface qui est devant vous. Et on se déplace sur cette surface-là. Eh ben la manière de se déplacer sur cette surface-là, ce qui veut dire que à chacun des points là j'ai représenté 2 points P1, V1, P2, V2 je peux chaque fois calculer la troisième variable. Donc je n'ai pas besoin de la représenter sur le dessin parce qu'elle est déterminée. T est obligatoirement d'un point P1, V1, V2, V1 divisé par NR donc P1, V1 divisé par NR et puis P2, V2, NR. OK. Ça c'est le schéma de base qu'on va utiliser pour représenter ce qui se passe. N'importe quel point là-dessus représente une situation en état où P, V étaient sont définies. Vous définissez a priori que P, T n'est pas un point P1 et derrière il y a ce mot que j'ai utilisé plusieurs fois d'invariants, ça veut dire c'est un système, une surface. Il y a 2 degrés de liberté donc vous pouvez gérer ça avec

notes

résumé

3.7.3 Transformation isotherme

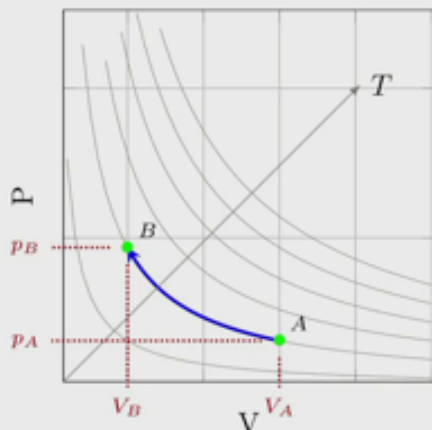
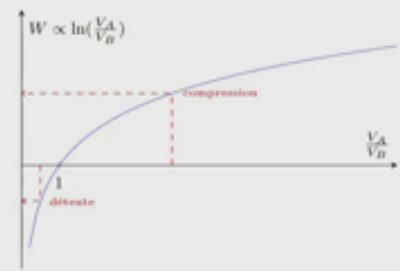
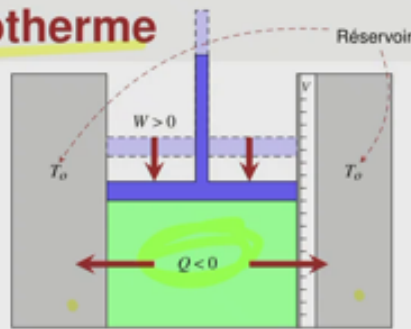


Diagramme de Clapeyron



- $\Delta U = \int_2^1 nRT = 0$
- Donc $Q + W = 0$ ce qui implique que $Q = -W$

- Calculons W :

$$W = \int_A^B -P dV = \int_A^B -nRT_0 \frac{dV}{V} = -nRT_0 [\ln(V_B) - \ln(V_A)]$$

$$W = nRT_0 \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) > 0$$

2 variables. Et ben en fait dans ce schéma vous pouvez toujours imaginer ou dessiner parce que vous pouvez toujours écrire que P est une fonction de V si la température ne varie pas. Donc si vous imaginez que la température est constante, mais donc je l'appelle T_0 pour bien indiquer qu'elle est constante, donc ça veut dire que P est égal à nR sur V et ça ça fait une hyperbole. Donc ça veut dire que une de ces courbes que j'ai dessinées que j'ai dessinées ici correspond à une température qui est qui est la même. Alors on représente parfois cet axe qu'on appelle la température mais c'est pas un axe, c'est pas un vrai axe. Les vrais axes de ce schéma c'est V et P , T c'est une indication, c'est pas un axe. Donc c'est pour ça que je ne l'ai pas fait partir de l'origine. C'est pas une représentation à 3 dimensions, c'est une représentation à 2 dimensions. Mais, sur lequel on a indiqué les lignes que suivraient des isothermes. Donc les lignes que suivraient la variation de P et de V si la température reste tout le temps constante dans ma transformation. Et donc, si c'est isotherme vu qu'on est dans un gaz parfait, l'énergie interne dépend de la température, ça veut dire que c'est aussi des lignes qui correspondent au même niveau d'énergie interne. Donc vous pouvez si vous vous écarterez ou pas d'une de ces lignes, vous pouvez comprendre si vous êtes en train de gagner de l'énergie interne ou si vous êtes en train de perdre de l'énergie interne. Alors, on s'intéresse à un certain nombre de transformations. On va les passer en revue puisque je vais vous montrer pour chacune comment est-ce qu'on calcule les échanges de travail et de chaleur

notes

résumé

62m 6s



3.7.3 Transformation isotherme

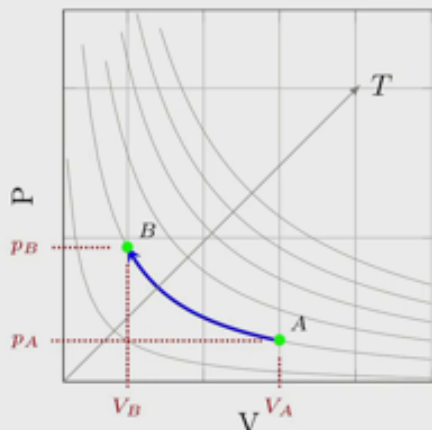
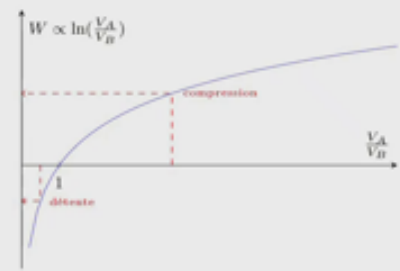
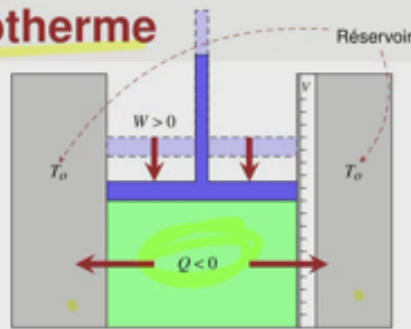


Diagramme de Clapeyron



- $\Delta U = \frac{f}{2} nRT = 0$
- Donc $Q + W = 0$ ce qui implique que $Q = -W$

- Calculons W :

$$W = \int_A^B -P dV = \int_A^B -nRT_o \frac{dV}{V} = -nRT_o [\ln(V_B) - \ln(V_A)]$$

$$W = nRT_o \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) > 0$$

pour ces transformations. Parce qu'ensuite, on va s'intéresser aux moteurs thermiques. Et pour moteurs thermiques, on va avoir une série de ces transformations qui vont faire un cycle. On veut comprendre ce qu'il y a à gagner du cycle. En général, on fait ces cycles soit parce qu'on veut gagner du travail, on veut exporter du travail, faire marcher une machine à vapeur, faire marcher une voiture ou alors on veut pomper de la chaleur, par exemple, faire fonctionner votre frigo, faire fonctionner votre pompe à chaleur à la maison pour récupérer un petit peu de la chaleur du sol et de l'air pour chauffer votre maison. On a besoin de faire un cycle. Et ça, ça va quasiment faire ce qu'on va terminer ce semestre qu'on aura. Comme je l'ai dit avant, je n'irai pas beaucoup plus loin que ça. Donc, la première transformation qui nous intéresse, c'est celle dont je viens de parler, isotherme. Donc ça veut dire c'est une transformation dans laquelle la température pendant toute la transformation est toujours constante. Alors, si vous regardez un système qui est très très très bien, ici, alors le 10 donc là, j'ai une sonde de température qui s'exprime en milliampère parce qu'on n'a pas traduit pour avoir la température mais lorsque la température va changer eh bien vous allez voir les guillemets varier. Et donc, c'est clair que si je compresse trop vite mon système la température augmente. Donc c'est très difficile de faire une transformation isotherme. Je dois déjà être sûr dans une ambiance où les transferts de chaleur peuvent se faire. Ça reste tout le temps à la température ambiante parce qu'il a priori l'air qu'elle a dans la même température qu'à l'extérieur et puis il faudra, par exemple, faire très très lentement pour qu'il ne se

notes

résumé

3.7.3 Transformation isotherme

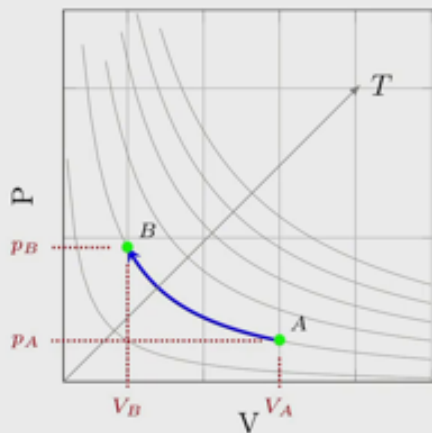
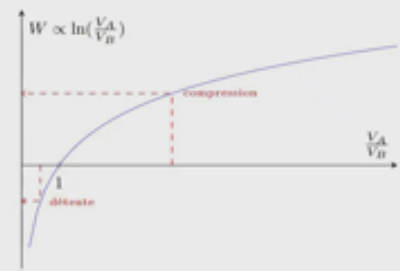
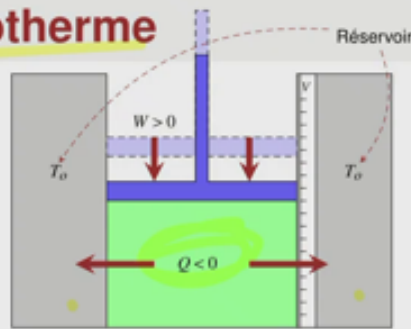


Diagramme de Clapeyron



- $\Delta U = \frac{f}{2} nRT = 0$
- Donc $Q + W = 0$ ce qui implique que $Q = -W$

- Calculons W :

$$W = \int_A^B -P dV = \int_A^B -nRT_0 \frac{dV}{V} = -nRT_0 [\ln(V_B) - \ln(V_A)]$$

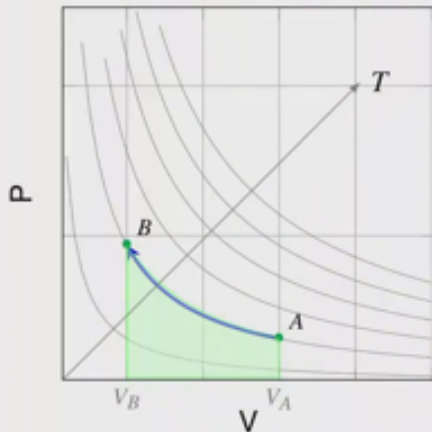
$$W = nRT_0 \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) > 0$$

passe rien. Donc là, vous voyez que je vais très très lentement, je ne sais pas si vous voyez mais je suis en train de compresser sur le piston mais je vais tellement lentement que j'arrive à compresser j'ai déjà avancé, je ne sais pas, dans 2 cm j'ai réussi à compresser sans changer la température. J'ai changé le volume et la pression mais j'ai gardé la température la même chose. Mais dès que je vais aller faire les choses plus vite voilà. Donc ça, c'est pas isotherme et la première que j'ai été très très lentement c'était isotherme parce que je suis dans un environnement toute la chaleur peut être échangée donc j'ai des échanges de chaleur entre mon piston et l'extérieur parce que je veux que la température de mon gaz à l'intérieur de mon piston soit toujours la même. Donc c'est pour ça que sur le dessin vous voyez, vous avez le gaz là qui est en vert et puis je vais par exemple compresser ou le décompresser normalement ça changerait la température mais comme j'ai un réservoir j'ai une grande masse ici autour qu'à une certaine masse si je fais les choses assez lentement toute l'énergie entre va pouvoir sortir de mon système ou toute l'énergie en moins va pouvoir être récupérée par le le réservoir qu'il y a autour ça va me permettre de faire une transformation qui va de A à B et qui suit une isotherme donc ça veut dire que je change l'état de mon système si vous voulez mais je ne change pas son niveau d'énergie je ne change pas sa température je ne change pas son niveau d'énergie interne donc si on veut faire les calculs

notes

résumé

3.7.4 Transformation isotherme (suite)



- On était arrivé à $W = nRT_0 \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right)$
- Vérification: si $V_A > V_B$ (compression) alors $\frac{V_A}{V_B} > 1$ et donc $\ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) > 0 \rightarrow$ le travail reçu est positif.
- Analysons le changement de l'énergie interne :

$$\Delta U_{th} = \frac{f}{2} nR \Delta T = 0$$
 donc $0 = Q + W$
 donc $Q_{reçu} = -W_{reçu}$
 donc de la chaleur est perdue par le gaz

avec ça, ça veut dire qu'on va partir de l'équation qui dit que j'ai suivi une isotherme ça veut dire que la température ne change pas j'ai un gaz parfait si je n'avais pas un gaz parfait je ne pourrais pas exactement faire ça comme ça j'ai un gaz parfait donc ça veut dire que U est fonction de la température si je ne change pas la température U doit rester la même chose donc ma température est égale à $\frac{f}{2} nRT$ ça ça représente l'énergie interne du système donc comme la du égale 0 ça veut aussi dire que Q est plus W donc ça veut dire la chaleur plus que le travail dans leur valeur absolue, dans leur valeur réelle je peux rentrer du travail, sortir de la chaleur ou l'inverse doit être égal à 0 donc ça veut dire que j'ai mon travail qui vaut l'opposé de ma chaleur donc je peux essayer de calculer le travail donc si je veux calculer le travail je vais faire l'intégral de A à B de moins p dv ça je peux toujours l'exprimer l'enjeu c'est que pour chaque dv je dois connaître quelle est la pression alors comme je suis dans une réaction qui est lente, qui est réversible alors je me suis tout le long je vais suivre l'équation des gaz parfaits et je peux tout le temps donc il faut que j'exprime p en fonction de V et donc ça veut dire que je remplace p par nRT divisé par V donc ça c'est p dv donc nRT0 la température c'est la même, j'ai mis un petit 0 c'est à dire que c'était la même tout ça je peux extraire de l'intégral et donc il va me rester l'intégral de A à B

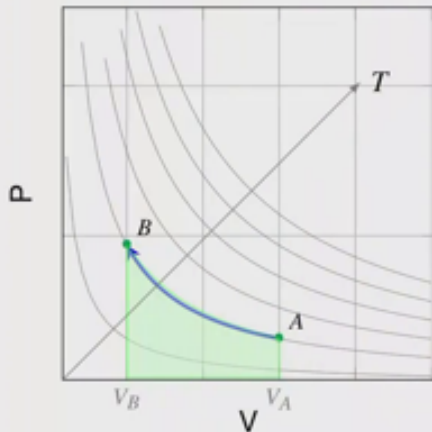
notes

résumé

68m 37s



3.7.4 Transformation isotherme (suite)



- On était arrivé à $W = nRT_0 \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right)$
- Vérification: si $V_A > V_B$ (compression) alors $\frac{V_A}{V_B} > 1$ et donc $\ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) > 0 \rightarrow$ le travail reçu est positif.
- Analysons le changement de l'énergie interne :

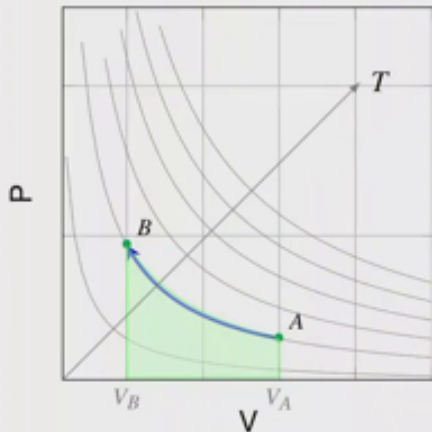
$$\Delta U_{th} = \frac{f}{2} nR \Delta T = 0$$
 donc $0 = Q + W$
 donc $Q_{reçu} = -W_{reçu}$
 donc de la chaleur est perdue par le gaz

de dv sur V donc l'intégral de 1 sur V c'est en log, on va considérer que pour vous c'est évident donc ça veut dire que ça va être moins nRT_0 fois la différence des logs entre la fin moins celui du début et puis vous savez qu'une différence dans le log ça correspond à un rapport un log dans le rapport donc ça veut dire que le travail c'est égal à $nRT_0 \ln$ et puis vous voyez que j'ai changé l'ordre donc c'est ce qui m'a permis de changer le signe j'avais moins B sur A et puis là j'ai écrit A sur B donc j'ai dû changer le signe dans le log quand vous changez l'inverse d'un nombre ça donne l'opposé du log je vous ai redessiné ici la fonction log pour que vous le ayez en tête donc c'est une fonction qui a un point fixe là A1 et puis en dessous de 1 elle est négative en dessous de 1 elle est positive et donc le log de 2 c'est moins le log de 1 demi le rapport entre les inverses elle est elle finit et donc vous avez là le moyen dans une relation dans une transformation isotherme le moyen de calculer le travail donc le moyen de calculer l'échange de chaleur si vous êtes isotherme vous devez avoir la quantité de travail qui doit correspondre à la quantité la quantité importée de travail doit correspondre à la quantité exportée de chaleur ou l'inverse parce qu'autrement vous aurez de l'énergie vous aurez plus d'énergie dans le système donc vous aurez la température qui montrait ok donc ça c'est une situation qui est assez simple on va vous la poser en commençant d'un côté ou de l'autre mais ça ne devrait pas vous troubler vous savez

notes

résumé

3.7.4 Transformation isotherme (suite)



- On était arrivé à $W = nRT_o \ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right)$
- Vérification: si $V_A > V_B$ (compression) alors $\frac{V_A}{V_B} > 1$ et donc $\ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right) > 0 \rightarrow$ le travail reçu est positif.
- Analysons le changement de l'énergie interne :

$$\Delta U_{th} = \frac{f}{2} nR \Delta T = 0$$
 donc $0 = Q + W$
 donc $Q_{reçu} = -W_{reçu}$
 donc de la chaleur est perdue par le gaz

que lorsque vous devez analyser une situation isotherme il faut penser que c'est aussi une situation dans laquelle l'énergie interne du système est constante et que vous devez faire les calculs et puis on a passé par le travail parce que ce n'est pas une situation à volume constant donc je ne peux pas utiliser le CV pour calculer directement l'échange de chaleur je ne peux pas non plus calculer le CP parce que la pression et le volume changent dans cette situation là donc c'est pour ça que j'ai passé par le travail et puis on va vous donner à l'échange de chaleur

notes

résumé

Calcul Transformation isotherme

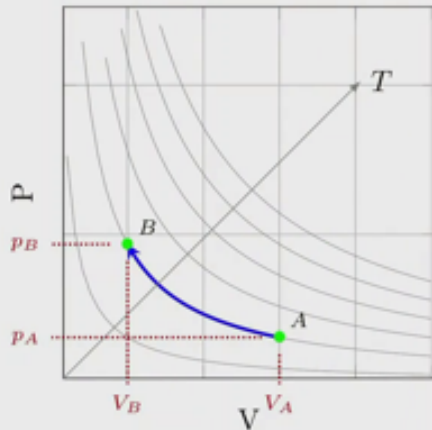


Diagramme de Clapeyron

Calculer le travail et la chaleur échangés lors d'une transformation isotherme de 1 kg de gaz d'oxygène O_2 à 385 K de 1 m^3 à 0.5 m^3

et puis là on raconte la suite que je vous ai déjà raconté en allemand donc on dit qu'on est arrivé à ça on vérifie que le volume final et le volume initial était plus grand donc on avait bien le bon signe et puis donc ça veut dire que le log était plus grand que le plus grand que 0 le travail reçu est positif et puis donc si Δu est égal ça veut dire que le Δu reçu est étonné donc la chaleur est perdue par le gaz c'est ce que je viens vous raconter en allemand et puis le petit schéma vous avez le diagramme de claperon vous avez le point de départ le point d'arrivée et donc la transformation à lieu le long d'une de ces isothermes et le travail correspond aussi à la surface qui est envers comme je suis en train de compresser ça veut dire que le travail est en train de rentrer dans le système donc là il faut considérer la surface comme positive c'est pour ça qu'on dit que c'est intégral moins PdV parce que si vous intégrer vous pensez ça comme problème mathématique et pas du tout comme problème de physique vous intégrer la surface qui est sous la courbe en allant de A à B ça va vous donner une surface négative si vous faites l'intégral c'est bien pour ça qu'on a fait l'intégral de moins PdV parce qu'on veut que le travail soit positif ça vient de la définition du signe du travail

notes

résumé

73m 31s



Calcul Transformation isotherme

Calculer le travail et la chaleur échangés lors d'une transformation isotherme de 1 kg de gaz d'oxygène O_2 à 385 K de 1 m³ à 0.5 m³

- Isotherme $\rightarrow \Delta U = Q + W = 0 \text{ J}$
- $m = 32 \text{ uma}$ donc $n = \frac{1000 \text{ g}}{32 \text{ g/mol}} \approx 31.25 \text{ moles}$
- $W = \int_{V_1}^{V_2} -PdV = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \approx -31.25 \times 8.31 \times 385 \times \ln 0.5 = 69'301 \text{ J} \approx -69.3 \text{ KJ}$
- $Q = -W = -52'740 \text{ J} \approx -69.3 \text{ KJ}$

donc refaisons un peu le calcul la derrière mettons qu'on est 1 kg de gaz d'oxygène ils sont à 385 degrés et puis on va de 1 m³ à 5 m³ donc en fait et puis la pression je n'ai pas dit quelle était la pression mais ça donne ok

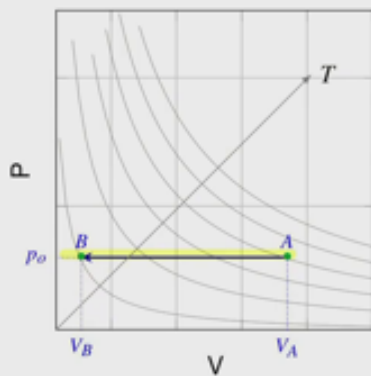
notes

résumé

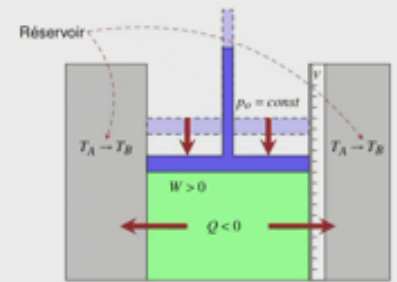
75m 14s



3.7.5 Transformation Isobare



- $W = \int_A^B -P dV = -P_o (V_B - V_A) = P_o (V_A - V_B) > 0$
- $\Delta U = \frac{f}{2} nR \Delta T \rightarrow \Delta T ?$
 $PV = nRT \rightarrow T = \frac{P_o V}{nR} \rightarrow \Delta T = \frac{P_o \Delta V}{nR}$
- $\Delta U = \frac{f}{2} nR \frac{P_o \Delta V}{nR} = \frac{f}{2} P_o (V_B - V_A) < 0$
- $Q = \Delta U - W = \left(\frac{f}{2} + 1\right) P_o (V_B - V_A) < 0$



Vérification : si $V_A > V_B$ (compression) alors $V_A - V_B > 0$ donc $W_{\text{reçu}} > 0$

Conclusion : lorsque le volume d'un gaz est réduit à pression constante, il reçoit du travail et perd de la chaleur. En outre, son énergie interne diminue.

donc on est dans une situation isotherme là on a déjà vu ça veut dire que la différence d'énergie interne c'est 0 joule la masse la moléculaire de l'O₂ c'est 32 UMA si vous allez regarder l'oxygène l'oxygène il a un numéro atomique qui est égal à 16 16 et puis on a des molécules de O₂ ça c'est en ressort ça c'est un atome et ça c'est un atome et donc j'ai deux atomes d'oxygène par molécules donc ça veut dire que j'ai une valeur de 32 g par mol ça c'est ma masse molaire j'ai passé de la masse moléculaire à la masse molaire en changeant l'unité j'avais des UMA, unité de masse atomique j'ai passé à des g par mol c'est le même mantiste c'est le même nombre et puis j'ai 1 kg faites attention aux unités les g, les kilos etc donc ça veut dire que 1000 divisé par 32 c'est environ 31,25 mol c'est ça la quantité de matière que je veux chauffer donc je peux calculer le travail je vais aller de V₁ à V₂, moins PdV comme je l'ai fait dans le truc précédent je peux remplacer P en P₂V donc je peux l'exprimer en fonction du volume donc ça fait NRT divisé donc dans mon intégral j'ai DV sur V que j'intègre de V₁ à V₂ et j'ai mis en évidence moins NRT et puis ça va donc donner comme comme résultat bon c'est NRT sur V₁ sur V₂ ou moins NRT de V₁ sur V₂ moins 31,25 8,31 308,05 Kelvin c'était les degrés donc ça c'était les Kelvin, ça c'était des mols ça c'était des joules par Kelvin et par mols donc ça simplifie avec ça le log n'a pas d'unité et le log d'une demi si vous faites le calcul

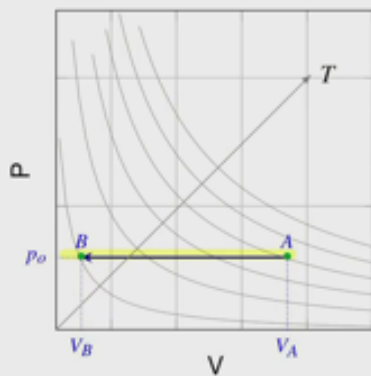
notes

résumé

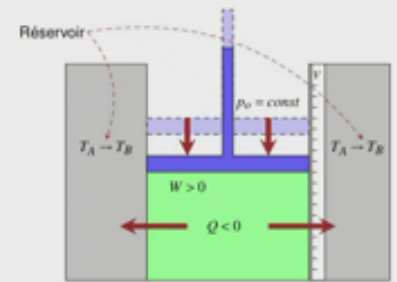
75m 47s



3.7.5 Transformation Isobare



- $W = \int_A^B -P dV = -P_o (V_B - V_A) = P_o (V_A - V_B) > 0$
- $\Delta U = \frac{f}{2} nR \Delta T \rightarrow \Delta T ?$
 $PV = nRT \rightarrow T = \frac{P_o V}{nR} \rightarrow \Delta T = \frac{P_o \Delta V}{nR}$
- $\Delta U = \frac{f}{2} nR \frac{P_o \Delta V}{nR} = \frac{f}{2} P_o (V_B - V_A) < 0$
- $Q = \Delta U - W = \left(\frac{f}{2} + 1\right) P_o (V_B - V_A) < 0$



Vérification : si $V_A > V_B$ (compression) alors $V_A - V_B > 0$ donc $W_{\text{reçu}} > 0$

Conclusion : lorsque le volume d'un gaz est réduit à pression constante, il reçoit du travail et perd de la chaleur. En outre, son énergie interne diminue.

ça fait quelque chose si je me suis pas trop trompé dans les chiffres significatifs ça fait quelque chose comme 69,301 joules donc dans ce cas là j'ai Q qui vaut moins W donc ça veut dire que je perd de la chaleur comme j'avais déjà dit et je perd la même quantité que je gagne de travail autrement j'aurais le truc je gagne je perd 69,3 qui le joule de chaleur et j'ai gagné 69, qui le joule de travail maintenant je peux m'intéresser à une autre type de relations transformation isobar donc sur le diagramme de claperon vous voyez que ça fait un déplacement horizontal de A à B donc vous voyez que j'ai passé des des lignes d'iso température je comprends tout de suite que la température va changer donc ça veut dire que je suis en train de me déplacer donc j'ai dit isobar donc le volume est là donc je suis en train il faudrait plutôt le représenter

notes

résumé

Calcul transformation isobare

Calculer le travail et la chaleur échangés lors d'une transformation **isobare** ($P_o = 1 \text{ bar}$) de 1 kg de gaz d'oxygène O_2 ($f = 5$) à 293 K de 1 m^3 à 0.5 m^3

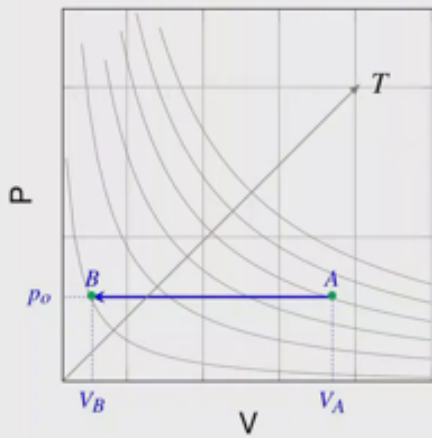


Diagramme de Clapeyron

comme ça pour qu'il soit la même chose le volume vertical et la pression horizontale donc je suis en train de me déplacer horizontalement dans ma projection donc ça veut dire que là je dois suivre l'in de niveau mais pas l'in de niveau de température donc qu'est ce que je peux utiliser là ce qui est intéressant comme j'ai la pression qui est constante je vais utiliser le travail puisque le travail c'est moins $p dv$ j'ai la pression qui est constante ça va me simplifier beaucoup mon intégral donc c'est donc mon intégral de A à B de moins $p dv$ donc vous comprenez je le redis mais quand j'écris quelque chose comme ça cet intégral là si un mathématicien la voit il hurle parce que c'est pas quelque chose qu'on peut calculer c'est une intégrale physique c'est pas une intégrale mathématique parce que A et B c'est des états c'est pas des nombres mais donc je devrais écrire je devrais écrire V de V A à VB mais je dois dire que je vais de la situation A à la situation B et donc comme la pression est constante je peux la faire sortir de l'intégral et donc il va me rester l'intégral de V A à VB de dv ça va faire VB moins VA donc le travail ça va être il va être très simple à calculer dans ce cas là c'est moins p_0 VB moins VA si je veux changer le signe p_0 VA moins VB et ça c'est positif c'est du travail qui rentre dans le système alors qu'on est-il au niveau de de l'énergie l'énergie dans ce cas là elle va augmenter parce que la température va augmenter et donc je peux l'exprimer comme ça $F \text{ sur } 2 \text{ NR } \Delta T$ mais je n'ai pas

notes

résumé

80m 1s



Calcul transformation isobare

Calculer le travail et la chaleur échangés lors d'une transformation **isobare** ($P_o = 1 \text{ bar}$) de 1 kg de gaz d'oxygène O_2 ($f = 5$) à 293 K de 1 m^3 à 0.5 m^3

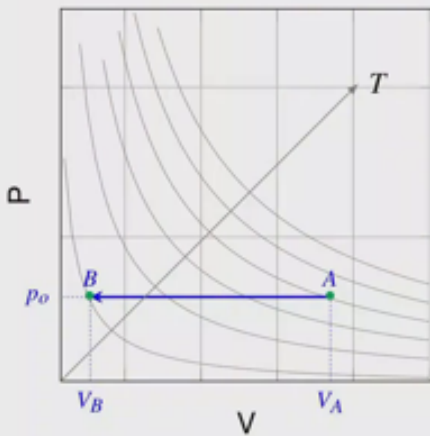


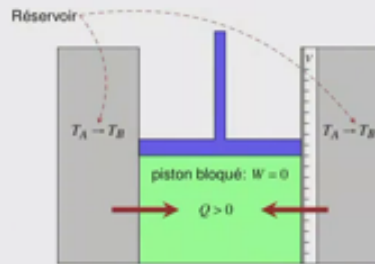
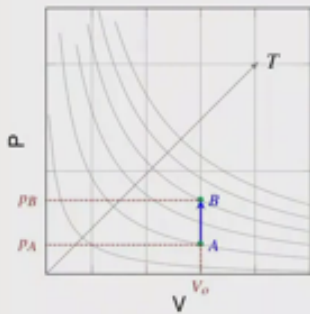
Diagramme de Clapeyron

mon ΔT mais par contre comme c'est réversible je peux utiliser la loi des gaz parfaits pour suivre ce qui se passe et donc je peux dire que ma température c'est la pression qui ne change pas le volume qui change divisé par nR qui sont des constantes donc j'ai la possibilité d'avoir accès à la température à la différence de température et à ce moment là je vais pouvoir utiliser la capacité thermique isobar puisque je suis dans une situation isobar et donc je vais pouvoir mais je peux aussi calculer la différence d'énergie c'est la même manière de calculer ça donc je vais simplement calculer l'énergie F sur 2 $nR \Delta T$ ça c'était mais que j'ai exprimé en fonction de la différence ΔT j'ai exprimé en fonction de la différence de température donc ΔT donc je peux calculer la nouvelle nouveau niveau d'énergie la différence d'énergie c'est donc F sur 2 fois P_0 c'est une constante et fois la différence de volume et ça, vu que V_B est plus petit que V_A ça c'est négatif c'est juste ça ah oui parce que c'est isobar et donc à ce moment là je peux calculer la chaleur et je vois que dans ce cas là pour faire cette transformation je peux utiliser le C_P mais je pourrais aussi utiliser la différence de du travail et de l'énergie interne et j'arrive à calculer cette chaleur qui est transférée F sur 2 plus 1 sur 2 fois P_0 et puis fois V_B moins V_A et là je suis en train de perdre de la chaleur

notes

résumé

3.7.6 Transformation isochore



❶ Pas de changement de volume: $W = 0$

❷ Pour l'énergie interne, il s'agit de déterminer T_A et T_B à partir de la pression en utilisant la fonction d'état

$$\Delta U = \int_2^1 nR \Delta T = \int_2^1 nR \frac{V_0}{nR} (P_B - P_A) = \frac{f}{2} V_0 (P_B - P_A) > 0$$

❸ En invoquant le 1^{er} principe $\Delta U = Q$ donc $Q = \frac{f}{2} V_0 (P_B - P_A) > 0$

on peut faire le calcul sur un cas précis on se retrouve dans la même situation qu'avant on a une situation de en bas on a 1 kg d'oxygène et puis on a le volume et puis on a la température donc en fait on a même une donnée de trop là en ayant juste la pression vous auriez pu trouver la température vous avez le volume mais bon je les ai données je les ai calculées pour le travail ça va être donc l'intégrale de AAB moins P0DV facilement calculable on arrive un résultat de 50 kg et puis on peut c'est un gaz parfait donc on va pouvoir calculer la différence de température qui va être égale à la pression qui change pas plus c'est isobarre divisé par NR et multiplié par la différence de volume puis on peut aussi calculer la chaleur avec le NCP delta T et puis si on fait ça on va arriver à une énergie de 175 kg et donc on a gagné 50 joules de travail on a perdu 175 joules de chaleur donc le grand système lui a perdu une énergie de 125 kg et puis on a pas eu besoin d'utiliser la température on sait pas on a pas eu besoin d'utiliser cette dimension là

notes

résumé

84m 58s



Calcul transformation isochore

Transformation **isochore** ($V_o = 1 \text{ m}^3$) de 1 kg de gaz d'oxygène O_2 à 293 K de 1 bar à 2 bar

- Isochore : $W = 0$ et donc $\Delta U = Q$
- $Q = nc_V \Delta T = \frac{f}{2} nR \frac{V_o}{nR} (P_B - P_A) \approx \frac{5}{2} \times 1 \times 10^5 = 250 \text{ KJ}$

on peut faire la même chose la même réflexion avec une transformation qui est isochore donc dans ce cas là il n'y a pas de changement de volume ça veut dire que le travail est nul je peux de nouveau réfléchir à partir de la température pour voir comment l'énergie interne a changé puisque c'est un gaz parfait que je sais que l'énergie interne dépend de la température donc j'ai l'énergie interne qui va $\frac{f}{2}$ fois 1 fois R fois delta T maintenant il s'agit d'exprimer delta T en fonction de la différence de pression puisque cette fois c'est le volume qui est constant et puis dans ce cas là j'aurai un échange qui va être positif au niveau de l'énergie je vais augmenter je vais gagner de l'énergie et puis en utilisant le premier principe je sais que delta U puisque le travail égal 0 delta U va être le transfert de chaleur donc je vais pouvoir dire que le transfert de chaleur c'est le transfert d'énergie

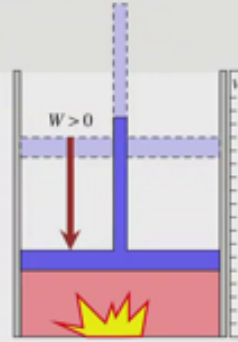
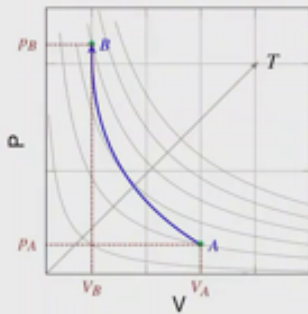
notes

résumé

86m 43s



3.7.7 Transformation adiabatique



- Expérience : compression adiabatique : le coton s'enflamme
- Transformation adiabatique \Leftrightarrow pas d'échange de chaleur
 $\Leftrightarrow Q_{\text{reçue}} = 0$
- Travail transformé en énergie interne $\Rightarrow T$ augmente !
- Nous allons montrer que pour une transformation adiabatique, l'équation suivante est satisfaite :

$$V T^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \text{const} \text{ ce qui est équivalent à } V_f T_f^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = V_i T_i^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

pour le calcul sur le cas précis c'est encore plus facile donc je sais que le travail égal 0 je sais que le transfert de chaleur va être équivalent aux transferts d'énergie donc je peux calculer mon transfert d'énergie à partir du CV et puis la différence de température que je vais calculer par le fait que c'est un gaz parfait donc je vais avoir Q est égal à F sur 2 fois N fois R V divisé par NR à la différence de pression et si vous appliquez ça à notre situation dans ce cas là j'ai pris le F pour la température moyenne j'ai pris ce qui a été annoncé donc j'ai pris F égal à 5 ça vous trouvez dans les slides précédents donc ça fait 5 demi le volume c'était 1 m³ au départ et puis la différence de pression c'était entre 1 bar et 2 bars donc ça fait 1 bar de différence de pression donc fois 10 puis 105 ça fait 250 kJ qui sont échangés sous forme de chaleur dans cette situation là et pas sous forme de travail puisque je ne varie pas le volume il n'y a pas de travail qui rentre en ligne de compte dans cette transformation là et alors maintenant on vient à celle qu'on préfère à diabatique mais je la présenterai la prochaine fois je vais juste vous présenter l'expérience donc la situation à diabatique c'est typiquement soit parce qu'elle est rapide soit parce que c'est très isolé mais vous avez vu ici quand j'utilisais si je faisais assez rapidement j'avais pas le temps d'éliminer la chaleur, la chaleur restait à l'intérieur du système il ne pouvait pas donc là on a une situation où on a mis une petite boîte qui peut s'enflammer une certaine température

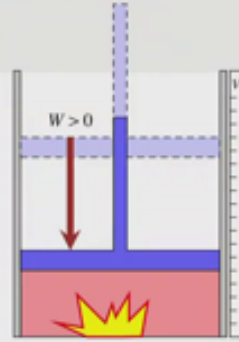
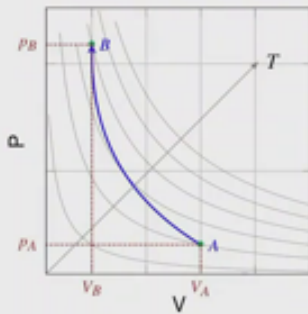
notes

résumé

88m 6s



3.7.7 Transformation adiabatique



- Expérience : compression adiabatique : le coton s'enflamme
- Transformation adiabatique \Leftrightarrow pas d'échange de chaleur
 $\Leftrightarrow Q_{\text{reçue}} = 0$
- Travail transformé en énergie interne $\Rightarrow T$ augmente !
- Nous allons montrer que pour une transformation adiabatique, l'équation suivante est satisfaite :

$$V T^{\frac{f}{2}} = \text{const} \text{ ce qui est équivalent à } V_f T_f^{\frac{f}{2}} = V_i T_i^{\frac{f}{2}}$$

donc elle s'enflamme autour de je ne sais plus presque autour de 1000 degrés donc on arrive à des hautes températures simplement avec la compression de l'air ça vous explique aussi le bruit que j'ai réussi à faire avant avec mon petit canon et c'est aussi comme ça que fonctionnent les moteurs diesel qui sont sans bougie parce que j'arrive à faire détonner à une certaine pression j'arrive à faire détonner voilà je vous remercie de votre patience vous avez terminé vivant la journée du mardi donc c'est déjà un mardi de sauvé on continue je vais aller juste vérifier dans les exercices que le retard ne vous provoque pas je vous encourage vraiment à faire pour vous des cartes mentales, des chapites il y a plein de choses, plein de petits éléments je vous encourage vraiment il y en a quelques-unes, vous pouvez vous inspirer de celles que j'ai faites vous pouvez les reprendre et les recopier mais je vous encourage à réfléchir à cet aspect-là parce que dans un mois on se retrouve en lundi matin

notes

résumé