

Support de cours

Cours:

UNIL-123 Physique Expérimentale II

Vidéo:

Lesson13-UNIL-123 Physique expérimentale II

Concepts (extraits des sous-titres générés automatiquement) :

Source de chaleur. Volume du cylindre. Transformation d'un gaz. Petits feedbacks. Masse égale. Capacité thermique des gaz. Énergie interne. Système adiabatique. V fois t . Cycles des machines thermiques. Foix supérieure. Système isotherme. Pression du système adiabatique. Variation d'énergie. Petits calculs.



[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/>

Vendredi !

Feedback 12^{ème} semaine

Fürbringer - Vittorangeli - Dubuisson

19 mai 2025

...

notes

résumé

0m 0s



La question 3

Comment la capacité thermique des gaz diffère-t-elle de celle des solides d'un point de vue théorique?

- ☐ a. Théoriquement, les solides ont une capacité thermique plus élevée que les gaz
- ☐ b. Théoriquement, les gaz et les solides ont la même capacité thermique
- ☐ c. Théoriquement, les gaz ont une capacité thermique plus élevée que les solides.
- ☒ d. Aucune des réponses proposée

Ces sous-titres ont été générés automatiquement ... Voilà, bonjour. Comment allez-vous ? T'as bien ? Il y a plein de choses à faire à décider aujourd'hui. Le premier point, mon premier problème, c'est vendredi. Je crois que j'ai été un peu trop honnête. J'ai posé des questions à la section. Et maintenant, je suis obligé de faire ce qu'ils m'ont dit. Donc vendredi, DS, académicus, pas de cours pour les étudiants de l'Union. Deuxième change, je voulais être quelques petits feedbacks sur la semaine, comme je fais d'habitude. Il y avait des questions qui ont eu quelques problèmes. Le résultat n'est pas fantastique. Donc soyez quand même un peu attentifs. Il commence à avoir des questions qui peuvent vraiment ressembler à des questions d'examen.

notes

résumé

0m 1s



La question 5

A partir d'un même état de deux systèmes identiques (A et B), on fait subir une détente de V_1 à V_2 , adiabatique pour le premier (A) et une détente isotherme au second (B). Quelle est le constat correcte à la fin de la transformation?

- ☒ a. $P_A < P_B$
- ☐ b. $P_A = P_B$
- ☐ c. On ne peut pas répondre.
- ☐ d. $P_A > P_B$

J'en ai repéré quelques-unes. Alors, comment la capacité thermique des gaz diffère-t-elle de celles des solides, d'un point de vue théorique ? Donc, là, si vous vous souvenez, la capacité des gaz, elle évolue avec la température. Mais si vous avez un gaz monoatomique, on est à 2... On est à 3 degrés de liberté, donc 3,5 de R, c'est assez bas. Par contre, si on a des gaz avec beaucoup de degrés de liberté, on peut se retrouver avec des nombres... Je sais pas, j'y pense juste maintenant comme ça, mais 4, 5, 6, à mon avis, sans problème. Les solides, on était toujours plus ou moins à 3. Donc, en fait, les gaz se retrouvent étonnamment, se retrouvent un peu entre les deux quand on parle de capacité... môle. Là, on n'a pas précisé. C'est vrai, quand on ne précise pas, c'est toujours un peu dangereux de quoi on parle, parce que c'est vrai que les solides, ils vont avoir une grande capacité massique, c'est tout de suite beaucoup d'atomes. Mais là, si on veut comparer des gaz et des solides, c'est clair que c'est môle. Ça n'a aucun sens de les comparer. Donc, en fait, on n'avait pas la possibilité de répondre.

notes

résumé

1m 32s



La question 6

L'eau (liquide) a une capacité thermique massique 2 fois supérieure à l'huile. On dispose d'une source de chaleur dont la puissance est constante. On effectue des expériences dans lesquelles la différence de température, ΔT , est la même. Quelles affirmations sont correctes (ce peut être une ou plusieurs) ?

- ☒ a. Aucune des réponses proposées n'est correcte
- ☐ b. Il faut chauffer 2 fois plus d'eau que d'huile.
- ☐ c. A masse égale, il faut 2 fois plus de temps de chauffage pour l'huile que pour l'eau.
- ☐ d. A masse égale, il faut transférer 2 fois plus d'énergie à l'huile qu'à l'eau.

Ensuite, on vous posait une question à partir d'un même état de deux systèmes identiques. A et B, qui vont subir une détente de V_1 à V_2 . Donc, on a des systèmes en un cylindre, on va changer le volume du cylindre. On va détendre, on va augmenter le volume. Et puis, 1, A est isotherme. Et puis, B... Non, attendez, excusez-moi. A est adiabatique et B est isotherme. On demandait... Qu'en est-il de la pression ? Donc, dans un système isotherme, vous avez des échanges de température avec l'extérieur pour permettre d'équilibrer les choses. Dans un système adiabatique, vous n'avez pas d'échange avec l'extérieur. Donc, c'est pour ça que vous avez finalement la pression du système adiabatique qui va être plus petite, parce qu'il n'y a pas de l'énergie qui a pu venir de l'extérieur pour équilibrer. C'est clair que quand je vous ai posé cette question, on n'avait pas encore fait tous les calculs qu'on va faire, je crois, maintenant, mais vous aviez quand même la notion d'adiabatique et isotherme et de comprendre que dans un adiabatique, vous n'avez pas d'échange à l'extérieur, et que c'est ça qui va... Je vous invite vraiment dans les questions à utiliser tout ce que vous avez. C'est pas toujours une formule, c'est pas toujours un slide. Essayez de voir ces définitions, des mots, adiabatiques, isothermes, et essayez de réfléchir. C'est mon objectif, c'est aussi ma mission, de vous apprendre à faire des raisonnements, des déductions dans des systèmes physiques et des systèmes thermodynamiques. Donc, la réponse n'est pas toujours dans une formule, etc. La réponse, elle est aussi en comprenant ces phénomènes et en comprenant ces mots.

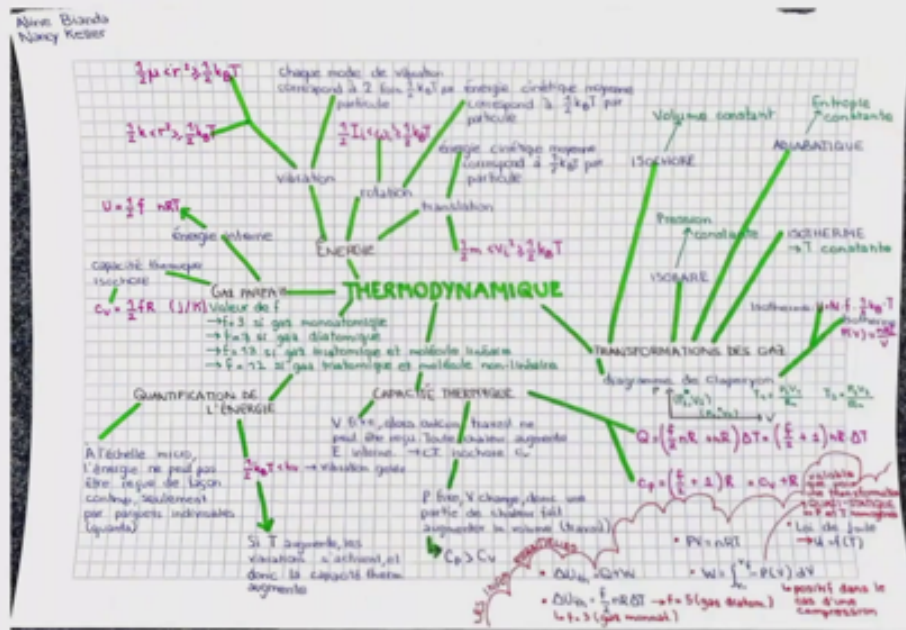
notes

résumé

2m 47s



Mind map



Et puis, là, c'est un type de question, honnêtement, je reconnais qu'il était un peu méchant, mais je me permets dans ces trucs-là de faire. Avec Zamen, j'ai vitrait quelque chose comme ça. Mais si vous voyez, dans cette question qui a eu un très mauvais score, je joue beaucoup avec les mots. Donc, c'est important de lire tous les mots dans une question, tous les mots sont importants. L'eau liquide a une capacité thermique deux fois supérieure à l'huile. J'ai pas précisé qu'elle était aussi liquide, l'huile. Mais bon. On dispose d'une source de chaleur dans la puissance et constante. On a un effectif des expériences dans laquelle la différence de température d'été est la même. Donc, les deux, l'huile et l'eau, on va les passer de, j'en sais rien, de 20 degrés à 40 degrés. On fait vraiment le même différence de température dans les deux. Quelles affirmations sont correctes ? Et puis là, c'est vraiment la salade russe. J'ai vraiment mélangé les concepts. Donc, c'est ça qu'il faut être attentif et pas lire trop vite. Donc, il faut chauffer deux fois plus. Donc, si vous voulez dire, pendant deux fois plus de temps, je peux imaginer que des fois sur les termes, on peut jouer. L'eau que l'huile. Non. L'huile. Mais moins de temps à monter en température. A masse et plus en plus, on ne dit même pas si les masses sont égales ou pas. Donc, en plus, là, on ne précise pas exactement les choses. A masse égale, là, on précise les masses. Il faut deux fois plus de temps de chauffage pour l'huile que pour l'eau. Non, c'est l'eau qui va mettre plus de temps à chauffer. Puis la question suivante, elle dit la même chose d'une autre manière. Donc, elle est aussi fausse.

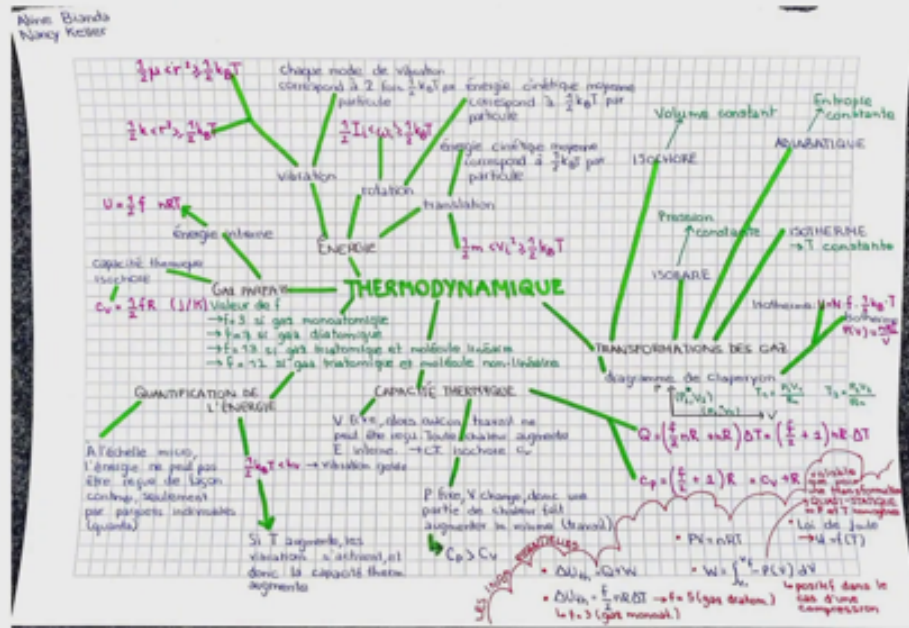
notes

résumé

4m 51s



Mind map



Merci.

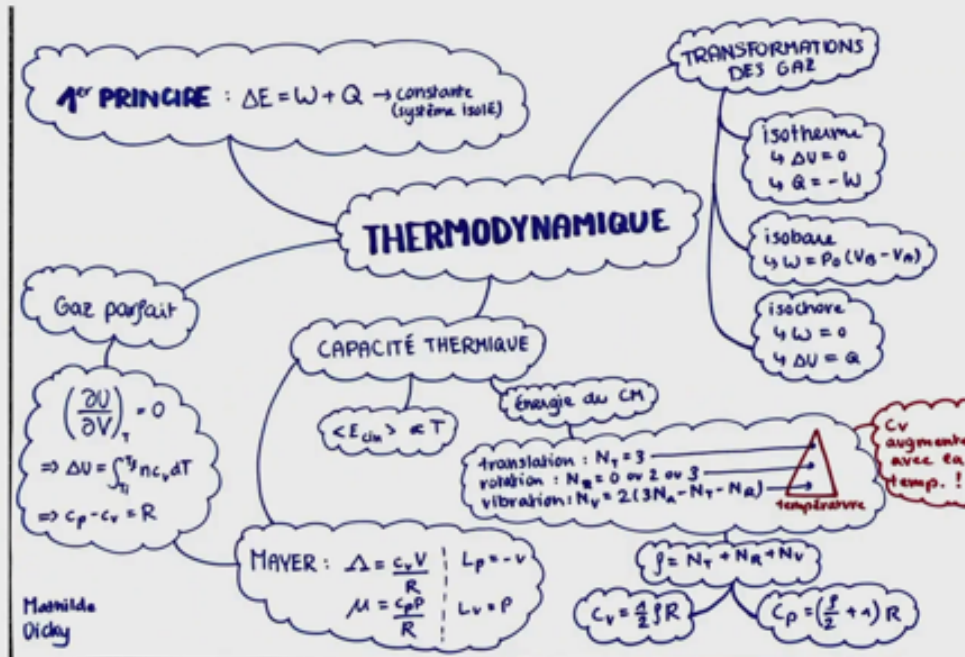
notes

résumé

7m 13s



Mind map



J'avais des cartes mentales vendredi. Donc, merci à ceux qui s'y sont remis. Je pense que c'est vraiment important. Je veux aussi les mettre en ligne. Quelqu'un m'avait dit de les mettre en ligne quand j'en ai, parce qu'il les utilisait. Merci pour le travail.

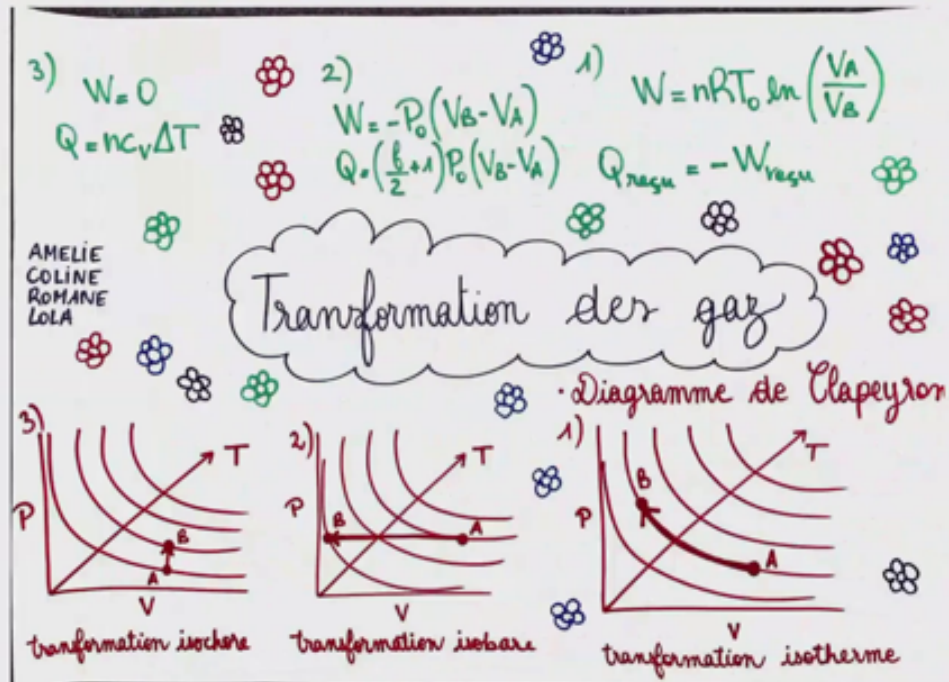
notes

résumé

7m 14s



Mind map



Je les ai trouvés toutes sympa et intéressantes avec chacun d'autres manières de présenter les choses, d'autres éléments à citer.

notes

résumé

7m 34s





Ça me fait penser que j'ai discuté vendredi avec l'une d'entre vous du formulaire. Et il y avait quelque chose qui m'a dit, « Ah oui, ça vaudrait la peine de rajouter sur le formulaire. J'ai complètement oublié. Donc, si la personne se souvient et qu'elle est là, merci de venir me rappeler ce qu'on voulait rajouter sur le formulaire. Bon, c'était pas une question de billet de mort, mais volontiers, si la personne se souvient pour aller. Alors, maintenant, il faut que vous preniez vos téléphones

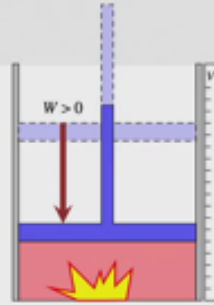
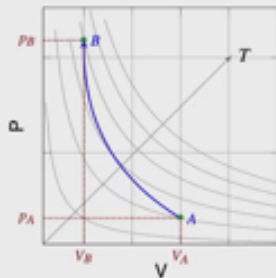
notes

résumé

7m 48s



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 :

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

et que vous répondiez au questionnaire d'évaluation de ce cours. Rassurez-moi tout de suite que ça marche. Alors...

notes

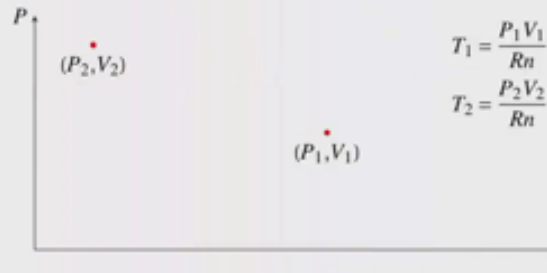
résumé

8m 19s



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 $T = T(P, V)$



Donc, ce qu'on appelle adiabatique, c'est une... une transformation d'un gaz qui n'a pas d'échange thermique avec l'extérieur, qui est isolée, c'est une chose qui se passe. Donc, il peut y avoir du travail, qui est fermé, on reçoit pas de la matière, ça, c'est quasiment pour toutes les transformations dont on a parlé. Et le... Donc, adiabatique, dans votre tête, tout de suite, ça doit s'allumer à Q égale 0. C'est en fait ça que ça veut dire, et c'est les conséquences dans le calcul doit être faites dans ce sens-là. Donc, ça veut dire que le travail est transformé en énergie interne. Donc, ça veut dire que c'est un système dans lequel vous donnez du travail et vous allez voir la température qui augmente. Donc, typiquement, dans la pompe à vélo, quand vous appuyez sur le piston, ça a fait chauffer, vous avez du travail, parce que vous êtes en train de réduire le volume, mais vous n'êtes pas en train de transférer de la chaleur au gaz, mais sa température, elle augmente quand même. Voilà, une relation, une réaction adiabatique. Alors, les... Les transformations adiabatiques, elles sont caractérisées quand on calcule avec une relation en soi, comme si on était toujours dans des systèmes divariants, ça peut être soit entre P et V , soit entre T et V , ou ça pourrait être entre T et P , mais il y a toujours une des variables qui est à un exposant, qu'on appelle l'exposant adiabatique, justement. Donc, là, je vais vous montrer qu'on arrive à la situation où le volume multiplié par la température, un exposant, l'exposant, c'est F sur 2. F , c'est le nombre de degrés de liberté de la molécule de gaz, dont on parle, F sur 2, c'est les mêmes valeurs, les mêmes F qui est

notes

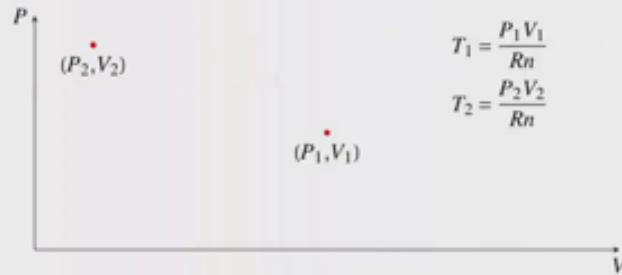
résumé

8m 32s



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 $T = T(P, V)$



pris quand on fait le calcul du CP et du CV. Elle est constante, donc ça veut dire si on compare deux situations, on peut dire que si on a une transformation adiabatique, F pour la fin, I pour initial, vous aurez le volume final fois la température finale à la puissance F sur 2 est égal à la volume initial fois la température initiale à la puissance F sur 2. Donc, pour ça, il faut un petit peu remettre dans votre tête les lois de puissance et toutes ces choses-là. C'est bien, j'ai récupéré mon iPad.

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

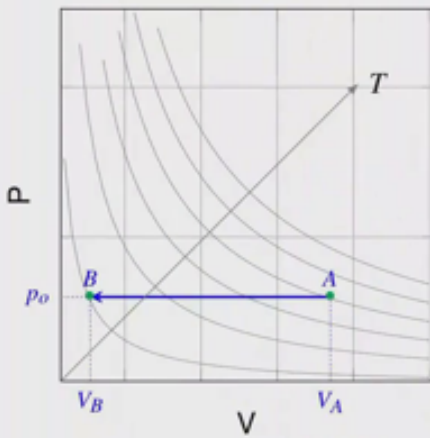


Diagramme de Clapeyron

C'est bon, ça l'a fait.

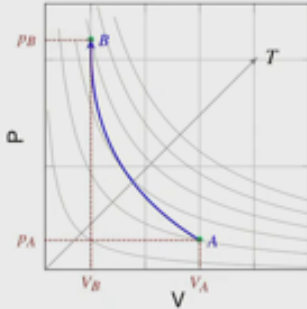
notes

résumé

12m 13s



3.7.8 Transformation adiabatique (suite)



- 1 Dans une transformation adiabatique:
 $Q_{\text{reçue}} = 0 \Rightarrow \Delta U = W_{\text{reçue}}$
- 2 Pour une transformation infinitésimale : $dU = -P(V)dV$
- 3 Or $dU = \frac{f}{2}nR dT$ d'où $\frac{f}{2}nR dT = -P(V) dV$
- 4 Si on considère l'équation d'état $P(V) = \frac{nRT}{V}$, alors
 $\frac{f}{2}nR dT = -nR T \frac{dV}{V}$
- 5 Répartir T et V de chaque côté de l'équation: $\frac{f}{2} \frac{dT}{T} = -\frac{dV}{V}$
- 6 Intégrer de A à B : $\frac{f}{2} \int_A^B \frac{dT}{T} = - \int_A^B \frac{dV}{V}$
- 7 Le résultat est $\frac{f}{2} \ln\left(\frac{T_B}{T_A}\right) = -\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$
- 8 donc $\left(\frac{T_B}{T_A}\right)^{\frac{f}{2}} = \frac{V_A}{V_B}$ c'est à dire $VT^{\frac{f}{2}} = \text{const}$

Voilà. Donc là, c'est une petite... des petits calculs pour vous montrer qu'on arrive bien à cette... Règle, on va dire, cette équation que V fois la température et la puissance F sur 2 est quand même une constante. Donc, dans une transformation adiabatique, comme on a déjà mentionné, la chaleur reçue, 0, chaleur donnée, 0. Donc, le travail, la variation d'énergie correspond au travail reçu ou donnée. Ça dépend si on est dans une compression ou une détente adiabatique. Pour une transformation infinitésimale, on peut donc écrire ça. La variation du travail, la variation de l'énergie interne, pardon, D, U , c'est égal à moins $P dV$. P , j'ai mis en parenthèse pour dire fonction de V , moins $P dV$. Et la pression va être, elle, fonction du volume pour la calculière fonction. Donc, cette équation d' U est également moins $P dV$. Compréneez-moi bien, elle est valable que dans une relation adiabatique, dans une transformation adiabatique. Ce qui est vrai tout le temps dans un cylindre, qui est soumis à une pression, c'est le travail est égal à moins $P dV$. Mais là, ce n'est valable que parce qu'on est dans une transformation adiabatique. Mais comme on est dans un gaz parfait, on sait aussi que la variation de l'énergie interne, elle dépend de la température. Et on sait même exprimer cette relation comme étant F sur 2, F, N, F, R, F, D, T . Parce qu'on a la loi de Joule qui nous dit que

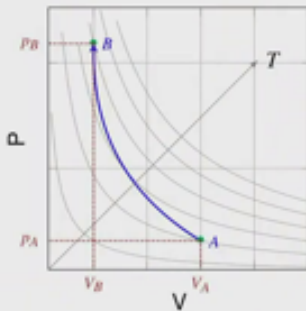
notes

résumé

12m 18s



3.7.9 Transformation adiabatique (encore)



- Dans la littérature, on utilise souvent l'exposant γ :

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{2}{f} \quad (3.43)$$

- avec les formules utiles

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (3.44)$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad (3.45)$$

la variation par rapport au volume de l'énergie, elle vaut 0. Donc, on peut écrire ça de cette manière-là. Vous avez, j'espère, enregistré que dans un gaz parfait, l'énergie interne est une fonction de la température. Maintenant, on peut mettre ces deux éléments ensemble et on a donc d'une part $F \text{ sur } 2, N, R, T$, est égal à moins $P \, dV$. Et puis, on est dans un gaz parfait tout le temps, il y a l'incocion d'état du gaz parfait. Donc, ça veut dire que la pression, comme fonction du volume et en dimet de la température, c'est $N, R, T \text{ sur } V$. Donc, ça veut dire qu'on peut écrire d'une part et d'autre. Une part, on a parlé du travail et de l'autre part, on a parlé de l'énergie interne. Le travail étant transformé en énergie interne, on peut écrire que $F \text{ sur } 2, N, R, D, T$ est égal à moins N, R, T, dV . On peut mettre... Aucun mécanicien, mathématicien, on peut dire ça. On peut mettre les V d'un côté, les T de l'autre et on arrive, on peut simplifier, vous voyez que N , donc les quantités N sont les mêmes des deux côtés, donc on peut les simplifier. Elles sont en tout cas pas égal à 0. Donc, on arrive à une équation différentielle, $F \text{ sur } 2, D, T \text{ sur } T$ d'un côté et puis égal à moins $D, V \text{ sur } V$. Et là, vous reconnaissez tout de suite la dérivée dans l'ogarithm. Quand vous avez 1 sur X , vous savez que la primitive, c'est un logarithm. Donc, ça veut dire que vous intégrer des deux côtés de A à B entre les deux états qui nous intéressent et ça veut dire que vous arrivez au résultat $F \text{ sur } 2 \text{ fois...}$ L'og de T_b

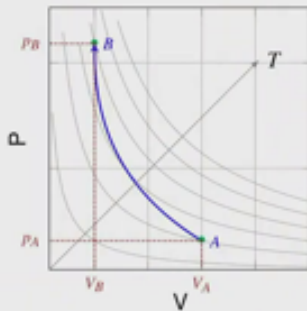
notes

résumé

14m 25s



3.7.9 Transformation adiabatique (encore)



- Dans la littérature, on utilise souvent l'exposant γ :

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1 + \frac{2}{f} \quad (3.43)$$

- avec les formules utiles

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (3.44)$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad (3.45)$$

sur T_A est égal à moins \ln de V_B sur V_A . On va juste inverser la fraction pour changer le signe du log, d'avoir un signe positif. Vous souvenez que le log de X est égal à moins le log de 1 sur X . Et puis, on arrive à la fonction suivante. T_B sur T_A à la puissance f sur 2 est égal à V_A sur V_B . Si ce passage des logs à la puissance vous crée un petit problème, revisez vos maths, c'est important d'être au clair avec ça, pas se tromper, ça peut tout à fait apparaître. Et donc, on arrive après en ayant distribué la puissance sur les deux termes de la fraction, on arrive à écrire que V_T à la puissance f sur 2 est égal à une constante. Donc, vous voyez que cette loi ici dont on parlait est vraiment simplement un calcul de ce qu'on a déjà vu sur les différentes transformations.

notes

résumé

Calcul transformation adiabatique

Calculer le travail et la chaleur échangés lors d'une transformation **adiabatique** de 1 kg de gaz d'oxygène O_2 à 293 K de 1 m^3 à 0.5 m^3

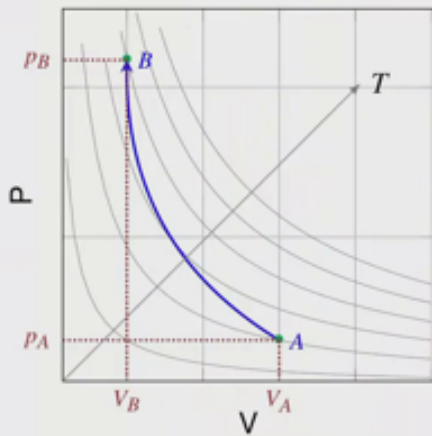


Diagramme de Clapeyron

Alors, cet exposant, on l'exprime assez rarement comme ça de F sur 2, on utilise en général un exposant qu'on appelle γ , qui s'appelle l'exposant adiabatique. Et si vous vous reportez dans les pages précédentes sur la définition de C_P et de C_V , vous arrivez à vous rendre compte qu'on arrive à définir cet exposant comme C_P divisé par C_V , et donc, c'est aussi égal à 1 plus de sur F . Et donc, on arrive à avoir les formules typiques, habituels, ça vaut la peine d'avoir quelque part, elles sont générales dans le formulaire, mais c'est bien de souvenir qu'elles existent et de faire référence quand on est en train de faire des calculs sur une transformation adiabatique. On arrive soit à la relation entre T et V , donc le F sur 2 est égal au γ moins 1, si vous regardez ce qui se passe ici, et puis le PV égal γ , c'est une autre manière d'exprimer la même chose à vous de voir en fonction de comment le problème a été posé, de choisir la bonne fonction. Elles sont équivalentes, il n'y a aucune différence entre ces deux équations, elles disent exactement la même chose, seulement elles n'ont pas les mêmes variables, et si vous remplacez n'importe laquelle de ces variables par celle qui manque dans le trio PV et T , vous arrivez à passer d'une fonction, d'une équation à l'autre.

notes

résumé

17m 53s



Calcul transformation adiabatique

Calculer le travail et la chaleur échangés lors d'une transformation **adiabatique** de 1 kg de gaz d'oxygène O_2 à 293 K de 1 m^3 à 0.5 m^3

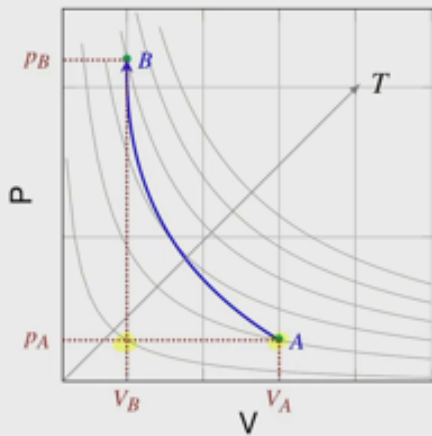


Diagramme de Clapeyron

Maintenant, comme pour les autres cas, on veut faire un petit calcul où on veut faire une transformation adiabatique de 1 kg de gaz d'oxygène, qui est à 293 Kelvin, et puis on va passer de 1 m^3 à 0.5 m^3 , donc on va diminuer le volume. Peut-être quelque chose qui est intéressant, c'est d'arriver à dessiner une transformation adiabatique sur un schéma de clapéon, donc au-delà de le schéma de clapéon, c'est simple, commence toujours le volume, on le met horizontalement, on aime bien mettre une valeur... Qu'est-ce que je veux ? Pas le cas, je veux... Extensive, on aime bien mettre une valeur extensive horizontalement et de mettre la pression verticalement. Ensuite, mentalement ou dans la réalité, vous pouvez dessiner les isothermes, c'est donc les lignes pour lesquelles la température est la même, et je vous ai parlé la dernière fois que ça suivait une hyperbole. Alors là, j'ai dessiné très précisément avec l'ordinateur, mais déjà dans votre dessin, si vous les dessinez, que vous comprenez quelles sont des hyperboles, ça peut vous aider à réfléchir. Et vous voyez que quand on est dans une transformation adiabatique, comme on n'aura pas d'échange d'énergie, on va avoir la température qui va varier, donc on ne va pas rester sur une isotherme, on va traverser des isothermes. Et donc là, on parle du volume V_A , je me suis mis par plaisir sur une isotherme, etc. Et bien, on va diminuer pour aller jusqu'à V_B , et en tout cas, on ne reste pas sur la même isotherme, on est passé sur une autre isotherme. Donc on a une courbe qui a des pentes qui sont plus prononcées que les isothermes.

notes

résumé

19m 38s



Calcul transformation adiabatique

Transformation **adiabatique** de 1 kg de gaz d'oxygène O_2 à 293 K de 1 m³ à 0.5 m³

- Adiabatique : $Q = 0$ et $\Delta U = W$
- $\delta W = dU = \frac{f}{2} nRdT$
- $W = \frac{f}{2} nR \int_{T_0}^{T_1} dT = \frac{f}{2} nR(\Delta T)$
- $T_o V_o^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1} \rightarrow \Delta T = T_o \left[\left(\frac{V_o}{V_1} \right)^{\gamma-1} - 1 \right]$
- $\gamma - 1 = \frac{2}{f} = \frac{2}{5} \approx 0.4 \rightarrow \Delta T = 293 \times (2^{0.4} - 1) = 385 \times 0.32 = 123.2 \text{ K}$
- $W = 2.5 \times 31.25 \times 8.31 \times 123.2 = 79'984 \text{ J} \approx 80 \text{ KJ}$

Alors si on veut faire le calcul,

notes

résumé

21m 49s



3.7.10 Résumé des calculs

Transformation	ΔU	Q	W	T_B	P_B	V_B
Isotherme	0	-69.3 KJ	69.3 KJ	T_A	$2 P_A$	$\frac{1}{2} V_A$
Isobare	-125 KJ	-175 KJ	50 KJ	$\frac{1}{2} T_A$	P_A	$\frac{1}{2} V_A$
Isochore	250 KJ	250 KJ	0	$2 T_A$	$2 P_A$	V_A
Adiabatique	80 KJ	0	80 KJ	$1.32 T_A$	$2.64 P_A$	$\frac{1}{2} V_A$

donc de nouveau, adiabatique, ça implique que Q égale 0, donc le travail égale à la variation d'énergie interne. On a la possibilité, au niveau infinitésimal, de dire que la variation de travail, vous souvenez que c'est un déron, parce que le travail, ce n'est pas une valeur d'état, c'est une valeur de transfert, donc c'est pour ça qu'on a ce delta. Égale, par contre, l'énergie interne est une variante d'état, donc c'est pour ça que j'ai un dédroit. Et puis je peux écrire ça comme étant $f2nRdt$. Et puis je peux calculer le travail en intégrant, en fonction de la différence de température. Je peux ensuite... Alors j'utilise les calculs que j'ai fait avant, je repars pas au départ, donc je peux utiliser, dans ce cas-là, vu que mes variables sont le volume et puis la température, je vais utiliser cette relation, T_0, V_0 à la puissance gamma-1, est égal à $T_1 V_1$ à la puissance gamma-1, ce qui me permet de calculer la différence de volume, enfin, le rapport des volumes, les divans de température en fonction de la différence des volumes qui étaient donnés dans l'énoncé de ce petit problème. Je peux ensuite réfléchir à ce que vos gammas, dans la situation de l'oxygène, c'est O_2 , les gaz oxygènes azotes, ils se mettent toujours à 2, donc c'est une molécule biatomique linéaire. Donc le numéro F , vous... F vaut 5, donc 2 sur F , ça fait 2 sur 5, ça fait 0,4. Et puis donc je peux calculer ma différence de température. Je profite pour faire un petit commentaire, vous avez des assistants qui sont même des fois plus précis que moi. C'est vrai que normalement, le standard, c'est on fait les calculs le plus tard possible, on fait tous les calculs littéralement, et puis on calcule à

notes

résumé

21m 52s



3.7.10 Résumé des calculs

Transformation	ΔU	Q	W	T_B	P_B	V_B
Isotherme	0	-69.3 KJ	69.3 KJ	T_A	$2 P_A$	$\frac{1}{2} V_A$
Isobare	-125 KJ	-175 KJ	50 KJ	$\frac{1}{2} T_A$	P_A	$\frac{1}{2} V_A$
Isochore	250 KJ	250 KJ	0	$2 T_A$	$2 P_A$	V_A
Adiabatique	80 KJ	0	80 KJ	$1.32 T_A$	$2.64 P_A$	$\frac{1}{2} V_A$

la fin, on doit donner la réponse, on calcule la réponse. Je suis un peu moins exigeant que ça, je pense que vous avez d'autres problèmes aussi à régler. C'est clair qu'il faudrait faire comme ça, le jour où vous êtes en train de faire des vrais calculs pour quelque chose, c'est vraiment comme ça qu'il faut faire. Donc ne vous faites pas de soucis à l'examen, si vous avez fait un arrondi à quelque part, il faut moins que je le trouve, donc si jamais on viendrait râler en voyant vos copies, mais c'est tout à fait pour moi acceptable que vous fassiez des calculs intermédiaires et que vous les passez. Alors faites quand même attention, parce que ça peut vous faire perdre du temps, parce que des fois, faire les calculs intermédiaires évite de passer par une simplification, et puis ce serait un peu dommage que vous perdiez du temps, mais ne vous faites pas de soucis sur la précision du calcul, je ne vais pas non plus des bêtises, arrondissez par 0,005 en 0, ça peut être un peu embêtant dans certaines situations, mais raisonnablement, je ne vais pas vous enlever des points, parce que vous n'avez pas fait l'arrondi exactement au bon moment. Et puis ensuite, je peux calculer le travail en fonction de ce qui a été donné, et j'arrive à environ dans notre situation à 80 kJ. Ce n'est pas si intéressant de 80 kJ dans cette situation-là, ce qui était intéressant,

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

3.7.10 Résumé des calculs

Transformation	ΔU	Q	W	T_B	P_B	V_B
Isotherme	0	-69.3 KJ	69.3 KJ	T_A	$2 P_A$	$\frac{1}{2} V_A$
Isobare	-125 KJ	-175 KJ	50 KJ	$\frac{1}{2} T_A$	P_A	$\frac{1}{2} V_A$
Isochore	250 KJ	250 KJ	0	$2 T_A$	$2 P_A$	V_A
Adiabatique	80 KJ	0	80 KJ	$1.32 T_A$	$2.64 P_A$	$\frac{1}{2} V_A$

c'était de comparer les différentes transformations qu'on a fait. Donc si vous reprenez les slides qu'on a fait la semaine passée, il y a un slide qui résume les différentes choses qu'on a obtenues, et c'est ça qui peut être intéressant, et peut-être vous donner un sens pratique par rapport à ces différentes transformations. Donc quand on était dans une transformation isotherme, c'est clair que la variation énergie interne, elle vaut 0, et donc ça veut dire que le travail était l'opposé de la chaleur. Et puis donc on avait travaillé sur nos variables, on avait travaillé sur la température, elle n'avait pas changé, on avait travaillé sur la pression à doubler, elle volume et divisé par 2, ce qui est assez normal. On est dans une loi des gaz parfaits, PV galénerté, il faut changer pas la température, c'est obligatoirement que les PV sont en train de varier différemment. Je vous laisse aller en pause et on recommence ça dans le son suivant. Avant qu'on soit au moteur, on a encore quelques éléments en résumé sur ces calculs pour les différentes transformations qu'on a utilisées. Donc ce qui est intéressant, c'est de voir, vous souvenez qu'on est parti un petit peu des mêmes quantités de matière, des mêmes différences de volume, et puis on a essayé de voir les caractéristiques de chacune des choses. Donc j'avais terminé isotherme. Si on est dans une situation isobar, ça veut dire que la pression reste constante, on se déplace horizontalement sur le diagramme de claperon. Là, on voit typiquement qu'on a des différences d'énergie. Donc si on est en train d'aller sur un volume qui diminue, ça veut dire qu'on est en train de perdre de l'énergie. On voit qu'on a perdu 125 kJ dans le système. Et puis on voit qu'on

[illegible][illegible]

25m 31s



3.7.10 Résumé des calculs

Transformation	ΔU	Q	W	T_B	P_B	V_B
Isotherme	0	-69.3 KJ	69.3 KJ	T_A	$2 P_A$	$\frac{1}{2} V_A$
Isobare	-125 KJ	-175 KJ	50 KJ	$\frac{1}{2} T_A$	P_A	$\frac{1}{2} V_A$
Isochore	250 KJ	250 KJ	0	$2 T_A$	$2 P_A$	V_A
Adiabatique	80 KJ	0	80 KJ	$1.32 T_A$	$2.64 P_A$	$\frac{1}{2} V_A$

a perdu de la chaleur. On a refroidi le système pour faire ça. Et puis, par contre, on a... Excusez-moi, on a perdu la chaleur, on a la de l'intérieur. Et puis on a reçu du travail, on a reçu 50 kJ de travail typiquement dans le système isobar. Et puis, sur le cadre des variables, on a travaillé entre la température et le volume. La pression était constante, c'est pas l'isobar, c'est pas pour rien. Et puis on voit qu'on a une relation de nouveau d'une demi. Donc comme on a TV, on a TV galénertés, mais quand on descend tous, on descend les deux. Donc on a diminué la température par deux et on a diminué le volume aussi par deux. Quand on est dans une situation inverse isocore, ça veut dire des verticales dans le diagramme de clépeuron. Alors là, pour des transformations comparables, on voit qu'on a gagné beaucoup d'énergie. Et puis, c'était essentiellement en chaleur que les choses se sont passées. Il n'y a pas eu de travail,

notes

résumé

3.7.11 Transformation polytropique

- Transformations isothermes et adiabatiques irréalisables
- "Isotherme" implique la transmission instantanée de la chaleur, donc des parois parfaitement conductrices
- "Adiabatique" implique des parois parfaitement isolante
- En plus, il faut compter avec les frottements du gaz sur les parois

Une transformation polytropique est une transformation réversible caractérisée par la proportionnalité entre la chaleur échangée avec l'extérieur et la variation de température du système.

$$\delta Q_r = nc_k dT \quad (3.46)$$

Avec c_k la capacité thermique polytropique

- Modèle idéal pour l'étude de procédés réels
- Étude des explosions, rendement des compresseurs et des turbines

puisque isocore, il n'y a pas de changement de volume, il n'y a pas de travail. Tout s'est fait au niveau d'un transfert de chaleur. Et puis là, le volume, je veux toujours dire vitesse, je ne sais pas pourquoi, je suis pas le monstère, pas le V pour vitesse, mais c'est les volumes. Donc le VA égale le VB. Et puis, par contre, si on voit au niveau des températures et des pressions, là de nouveau, la même chose, on a P et T qui sont au même niveau dans l'équation, donc ça veut dire qu'ils vont varier proportionnellement. Et puis là, maintenant, on vient de regarder ce qui était adiabatique. Adiabatique, ça veut dire que le gaz va gagner de l'énergie quand on va diminuer le volume. Et puis, il n'y a pas d'échange de chaleur, tout va se faire au niveau du travail. Et puis donc, on a là des relations entre... Il y a tout qui varie, là, vous avez pression, volume et température qui varient. Et puis, alors, on a plus exactement des proportions. Là, on avait varié la moitié de la pression. Ça avait multiplié presque par 3 par 2,64 la pression et ça avait multiplié la température d'environ 30 %. C'est un petit peu plus difficile, etc. Donc voilà, une comparaison. Je vous encourage vraiment à regarder ces différents calculs et de savoir qu'on y fait.

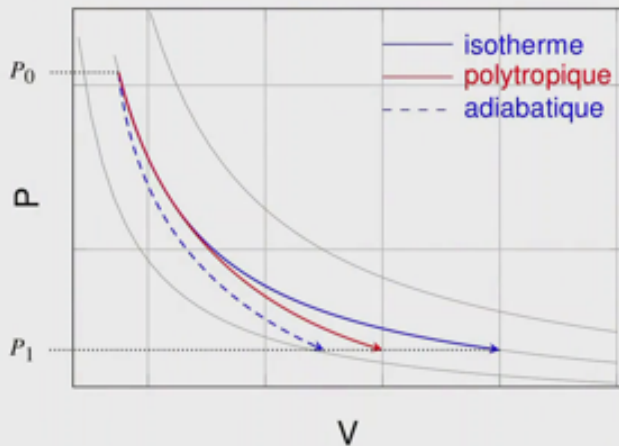
notes

résumé

29m 1s



3.7.11 Transformation polytropique



Donc si $\delta Q_r = nc_k dT$, et puisque c_v , c_p et c_k sont indépendants de la température, alors

$$PV^k = \text{const} \quad (3.47)$$

Le coefficient polytropique k est défini théoriquement par

$$k = \frac{c_p - c_k}{c_v - c_k} \quad (3.48)$$

Et expérimentalement par

$$k = \frac{\ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right)}{\ln\left(\frac{V_0}{V_1}\right)} \quad (3.49)$$

Alors, il existe une autre transformation, un petit peu générique qui est intéressante à connaître. Elle s'appelle polytropique. C'est quelque chose qui ressemble, qui est un comportement très proche du comportement adiabatique, mais la fraction est différente. Il y a quand même une partie d'énergie qui est transférée. Elle est beaucoup plus proche de la réalité parce que c'est très, très difficile de faire une vraie réaction adiabatique. Il n'y a vraiment aucune énergie qui sort. C'est vraiment très, très difficile. C'est vrai que toutes ces réactions, je vous ai présenté idéalement dans la réalité, c'est des fois très, très durs de les faire exactement. Elles sont réversibles en général. Je vous ai dit quand j'ai parlé de la réversibilité, que aussi lire la réversibilité des réactions, c'est un idéal. On n'y arrive jamais. On arrive à faire des choses quasi réversibles, mais la réversibilité, on n'arrive pas. Donc, transformation isotherme et adiabatique sont irréalisables dans le sens où je vous dis, on n'arrive pas vraiment à les faire exactement. Isotherme, ça impliquerait qu'on arrive à transférer l'énergie. Dès qu'on a produit la chaleur, la chaleur que peut sortir, dès qu'on a changé des conditions, c'est impossible. Et puis, on devrait avoir des parois parfaitement conductrices. On n'arrive vraiment pas à faire ça. Adiabatique, ça veut dire qu'on serait parfaitement isolants. C'est pas possible. Donc, en fait, on fait une relation par rapport à la capacité thermique, qui est un peu imparfaite. C'est pour ça que c'est un CK. Donc, si vous voulez, δQ est égal à N, CK, DT , ça a la même forme. C'est comme le Canada de laïre avec l'alcool. Ça ressemble, mais c'est pas exactement la même chose. Et puis, on va pouvoir définir quelle est la valeur de ce CK, et ça va permettre

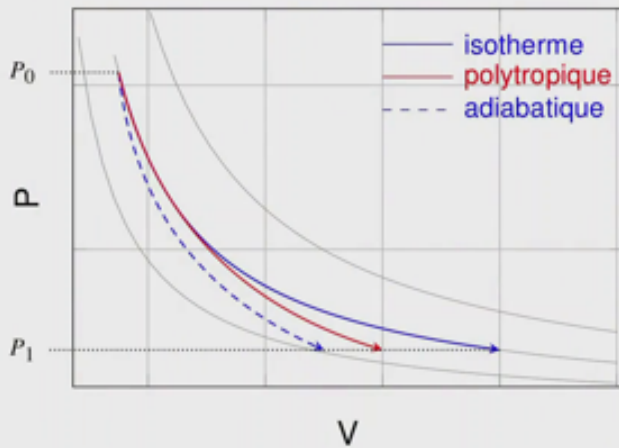
notes

résumé

30m 40s



3.7.11 Transformation polytropique



Donc si $\delta Q_r = nc_k dT$, et puisque c_v , c_p et c_k sont indépendant de la température, alors

$$PV^k = \text{const} \quad (3.47)$$

Le coefficient polytropique k est défini théoriquement par

$$k = \frac{c_p - c_k}{c_v - c_k} \quad (3.48)$$

Et expérimentalement par

$$k = \frac{\ln(\frac{P_1}{P_0})}{\ln(\frac{V_0}{V_1})} \quad (3.49)$$

de définir une relation qui est un petit peu plus proche de la réalité.

notes

résumé

3.7.11 Transformation polytropique comme modèle générique

La transformation polytropique est en fait un modèle générique des transformations des gaz suivant les valeurs de k et de c_k données dans le tableau suivant

Transformation	Valeur de k	Valeur de c_k
Isotherme	1	∞
Isobare	0	c_p
Isochore	∞	c_v
Adiabatique	γ	0

Donc, vous avez sur ce slide, déjà, un schéma de Cléperon qui montre d'une part isotherme et adiabatique. L'isotherme, elle est en bleu. Vous voyez qu'elle suit une de ses lignes noires, une de ses lignes de référence. Et puis, vous avez en pointillé la diabatique, qui se décolle à une pente plus importante. La réalité entre les deux, c'est quelque chose que ça nous arrive souvent à dire dans le monde réel, et on l'appelle polytropique. C'est un mot à mémoriser, désolé, un mot de plus. Vous voyez qu'elle est entre l'une et l'autre. Elle n'est pas tout à fait isotherme, elle n'est pas aussi prononcée qu'une adiabatique. Donc, ça veut dire qu'une relation constitutive, c'est P , V , puissance K , alors ce ne sera pas 2 sur P , ce sera un petit peu un autre exposant, mais c'est le même type de comportement, c'est aussi une sorte d'hyperbole. Et puis, ce facteur K , il est relié au C_p et au C_v , de telle manière que C_p moins C_k divisé par C_v , moins C_k est égal à ce coefficient K , cet exposant K qui est utilisé ici. Et puis donc, on peut déterminer expérimentalement si on fait le rapport des logs, du rapport des pressions et du rapport des volumes, on arrive à cette... Mais ça, c'est principalement des maths. Voilà. Je ne pense pas que je vais beaucoup vous embêter là-dessus, mais au moins, vous savez que ça existe, vous savez des choses de plus. Vous pouvez parler ce soir au super. L'importance des transformations polytropiques, vous aurez un succès incontestable. Et puis ça, c'est une manière un petit peu de résumer les choses, de mettre au clair sur cette histoire des exposants. Donc, vous avez la valeur, ce que j'ai appelé la valeur de K , donc c'est la

notes

résumé

32m 56s



3.7.11 Transformation polytropique comme modèle générique

La transformation polytropique est en fait un modèle générique des transformations des gaz suivant les valeurs de k et de c_k données dans le tableau suivant

Transformation	Valeur de k	Valeur de c_k
Isotherme	1	∞
Isobare	0	c_p
Isochore	∞	c_v
Adiabatique	γ	0

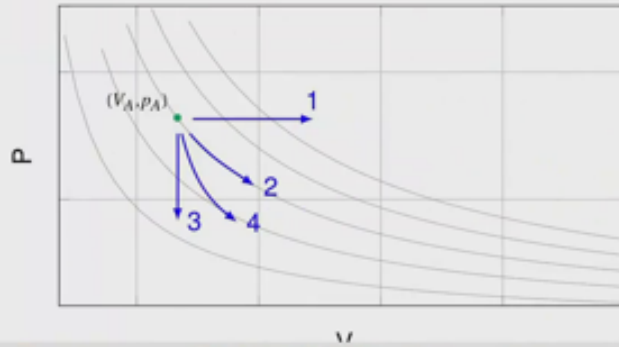
valeur de l'exposant dans la relation PV, puissance quelque chose. Et puis la valeur du C, etc. Donc, dans une situation isotherme, on considère que l'exposant, il vaut 1, PV égale à une constante. Et puis donc, le CK, on peut considérer qu'il est infini. On va pas faire des calculs avec, mais on peut considérer qu'il est infini. Dans une situation isobar, donc, on a la relation directe entre V et T. On peut considérer que l'exposant, il est nul. Donc, quand vous mettez quelque chose à l'exposant nul, ça va être égal à 1. Et puis le CK, ça va être le CP. Quand on est de une transformation isocore, ça correspond à avoir un exposant infini et puis avoir le CV comme exposant.

notes

résumé

3.7.12 Tableau récapitulatif des transformations

Chemin	Processus	Quantité constante	Résultats spécifiques
1	Isobare	P	$Q = nc_p \Delta T$, $W = -P \Delta V$
2	Isotherme	T	$Q = -W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$, $\Delta U = 0$
3	Isochore	V	$Q = \Delta U = nc_v \Delta T$, $W = 0$
4	Adiabatique	$VT^{\frac{f}{2}}$	$Q = 0$, $W = \Delta U$



Comme coefficient représentant la différence de température par rapport aux transferts de chaleur. Et puis, dans une situation adiabatique, c'est le gamin qui est comme exposant. Et puis, on considère que le C vaut puisqu'il n'y a pas d'échange de température. Non, il n'y a pas d'échange de chaleur.

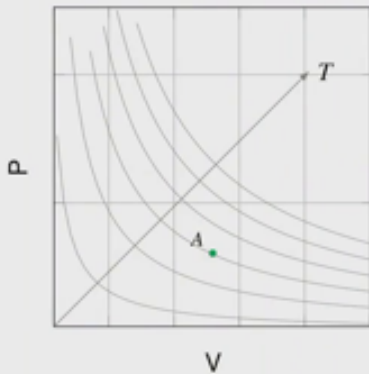
notes

résumé

36m 13s



3.7.13 Méthode pour résoudre un problème de transformation



- Identifier de quel type de transformation il s'agit (réfléchir aux échanges possibles avec l'environnement)
- Tracer la transformation dans le diagramme p vs. V
- Typiquement, on calcule d'abord le **travail reçu** en sommant $-p dV$ entre le volume initial et final.
- **On vérifie que le signe fait du sens !**
- Puis on calcule le **changement d'énergie interne** (proportionnel au changement de température pour le gaz idéal)
- Grâce au premier principe on obtient la **chaleur reçue**
Exception : Transformation adiabatique (pas d'échange de chaleur: $Q_{\text{reçue}} = 0$)

Ici, vous avez encore un autre résumé qui résume bien les choses qui sont constant dans les différentes transformations. J'ai pas mis la polytropique et puis les résultats spécifiques. C'est quelque chose aussi, éventuellement, à souvenir et de voir où vous voulez retrouver dans le fascicule, dans le formulaire. Je répète, quelqu'un qui a venu me poser une question sur le formulaire. Le formulaire, vous avez la version 24, mais elle va peut-être changer d'un shouya. Vraiment, elle va très peu changer. Vous la trouvez sur le site Moodle. C'est vraiment le moment d'aller la regarder et de voir ce qu'il y a dedans parce que c'est ce que vous aurez avec l'énoncé de l'examen.

notes

résumé

36m 33s



ation

3.7.14 Résumé calcul de transformation

échir

On résume ici les calculs de ΔU , Q , W présentés dans les slides précédents. Évidemment que ces calculs peuvent changer suivant les informations et les contraintes.

ommant

Isotherme $\Delta U = 0 \Rightarrow -Q = W = \int -P(V) dV$

Isobare $\left. \begin{array}{l} W = -P_o \Delta V \\ U = U(V, P_o) \end{array} \right\} \Rightarrow Q(V, P_o) = \Delta U - W$

e gaz

Isochore $\left. \begin{array}{l} W = 0 \\ U = U(P, V_o) \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta U(P, V_o) = Q(P, V_o)$

ue

ge de

Adiabatique $\left\{ \begin{array}{l} (Q = 0) \Rightarrow (\Delta U = W) \\ \Delta U = \Delta U(\Delta T(\Delta V)), T V^{\gamma-1} = cte \end{array} \right.$

2025 29 / 32

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 1

Ici, vous avez résumé des choses qu'il faut faire quand on a un problème de transformation. Donc, c'est une procédure à appliquer aux examens. C'est peut-être vrai que si j'avais mis ça, il y a deux leçons, peut-être que ça aurait aidé certains dans les exercices. Donc, quand vous êtes en face d'une transformation, identifiez de quel type de transformation il s'agit, réfléchissez aux échanges possibles avec l'environnement, est-ce qu'on n'échange rien, est-ce qu'on n'échange de la chaleur, est-ce qu'on n'échange du travail, est-ce qu'on n'échange les deux ? Tracer la transformation sur le diagramme P versus V. Typiquement, on calcule d'abord le travail reçu en sautant moins PDV entre volume initial et volume final. C'est quelque chose qu'on peut toujours faire pour autant qu'on arrive à exprimer la pression dans la transformée. On vérifie que le signe fait du sens, on calcule le changement d'énergie interne et puis éventuellement, on revient à la chaleur reçue. C'est vrai que souvent, on commence par calculer le travail. C'est un bon principe. Je ne suis pas sûr que ça fonctionne à 100 % des cas, mais 90 % ou 90 % des cas, je pense que c'est bien comme ça qu'il faut procéder.

notes

résumé

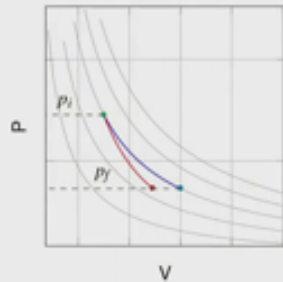
37m 19s



3.7.15 Exemple de dilatation

On laisse un gaz diatomique se dilater lentement jusqu'à ce que sa pression soit la moitié de sa valeur initiale. Par quel facteur son volume varie-t-il s'il s'agit d'un processus (a) isotherme ou (b) adiabatique?

- Si le processus est **isotherme**, $T_i = T_f$.
- En utilisant la fonction d'état, on a $P_i V_i = P_f V_f$.
- Donc $\frac{V_f}{V_i} = \frac{P_i}{P_f} = 2$.



- Si le processus est **adiabatique**, $P_f V_f^\gamma = P_i V_i^\gamma$.

- De là, on obtient $\left(\frac{V_f}{V_i}\right)^\gamma = \frac{P_i}{P_f}$.

- Pour un gaz diatomique:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\frac{f+2}{2}}{\frac{f}{2}} = \frac{f+2}{f} = \frac{7}{5}.$$

- Donc finalement $\frac{V_f}{V_i} = \left(\frac{P_i}{P_f}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 2^{\frac{5}{7}} = 1.64$.

J'ai encore fait un petit résumé, un slide que j'ai fait hier où je vous ai mis. Ça correspond au calcul qu'il y a dans les différentes pages. Chaque fois que j'ai calculé, j'ai essayé de vous montrer pourquoi j'ai passé chaque fois en résumant. Quand on a calculé le quai isotherme, on est parti du fait que ΔU est égal à 0. Donc, on est parti du fait que Q est égal à W . On a calculé W . On a calculé le travail. Ça permettait d'avoir... Chaque fois, il y a trois variables qui nous intéressent. L'énergie interne, le travail et la chaleur. Dans Isobar, on a d'une part le fait que, comme la pression est constante, le travail est très facile à calculer à partir de la différence de volume. Et puis à l'unité, l'énergie interne, elle, elle va dépendre de V et de P_0 qui ne change pas. Donc, elle va dépendre que de V . Donc, on va pouvoir contrôler V . Et puis, ça va nous permettre de calculer l'échange de chaleur de nouveau à partir du volume puisque la pression est constante. Et puis, quand on fait Isocor, là, on part du fait que le travail est nul. Et puis, le fait que, donc, vu qu'on a le volume qui est constant, on peut représenter l'énergie interne comme une fonction qui n'est que de la pression. Donc, on va pouvoir calculer la variation d'énergie interne avec la chaleur qui est transmise. Et puis, à diadatique, on va partir du fait que Q égale 0. Ça va permettre de dire que le travail est égal à la variation d'énergie interne. On sait qu'on a la variation d'énergie interne, comme c'est un gaz parfait qui dépend de la température. Et puis, on sait aussi que la variation

notes

résumé

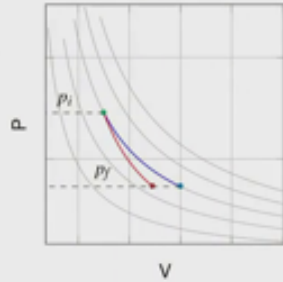
38m 36s



3.7.15 Exemple de dilatation

On laisse un gaz diatomique se dilater lentement jusqu'à ce que sa pression soit la moitié de sa valeur initiale. Par quel facteur son volume varie-t-il s'il s'agit d'un processus (a) isotherme ou (b) adiabatique?

- Si le processus est **isotherme**, $T_i = T_f$.
- En utilisant la fonction d'état, on a $P_i V_i = P_f V_f$.
- Donc $\frac{V_f}{V_i} = \frac{P_i}{P_f} = 2$.



- Si le processus est **adiabatique**, $P_f V_f^\gamma = P_i V_i^\gamma$.
- De là, on obtient $\left(\frac{V_f}{V_i}\right)^\gamma = \frac{P_i}{P_f}$.
- Pour un gaz diatomique:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\frac{f+2}{2}}{\frac{f}{2}} = \frac{f+2}{f} = \frac{7}{5}$$
- Donc finalement $\frac{V_f}{V_i} = \left(\frac{P_i}{P_f}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 2^{\frac{5}{7}} = 1.64$.

de température, elle dépend du volume. Donc, en fait, on va pouvoir régler. Et dans ce cas-là, on va plutôt s'intéresser au lieu de PV puissance gamma. On va plutôt travailler à TV gamma-moisance. Ça va être plus intéressant.

notes

résumé



3.7.16 Le moteur du Faux Dufaux

Le projet *Faux Dufaux* vise à reconstruire le Dufaux n°4 qui a battu un record de distance au dessus du lac Léman en 1909 et gagné le prix Perrot-Duval.

- 1 Le moteur rotatif est constitué de 7 cylindres de 1.6 litres qui ont un taux de compression de 3.5.
 - 2 Le temps de compression est de quelques centièmes de seconde, donc on peut considérer que la transformation est adiabatique.
 - 3 Dans un moteur Diesel, l'explosion a lieu lorsque le mélange de gaz dans le cylindre atteint sa température d'auto-allumage, 220°C pour le kérosène. On considère que l'essentiel du mélange est constitué par de l'air (95%).
 - 4 Calculer la température à la fin de la compression
- La relation adiabatique est $V_B T_B^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = V_A T_A^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$
 - On prend $T_A = 300\text{K}$ comme température d'injection du mélange de gaz.
 - Comme l'essentiel du gaz est de l'air, on considère $\gamma = 5$.
 - $T_B = \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} T_A$
 - A.N.: $T_B = (3.5)^{\frac{5}{4}} 300 \approx 495\text{K} = 222^\circ\text{C}$
 - On atteint donc la température d'auto-allumage du mélange de gaz.

Donc là, vous avez plein d'éléments pour vous aider. Là, c'est encore un autre exemple. Je vais passer. Vous pouvez regarder ça. C'est de nouveaux décalcules, etc. Quelque chose d'intéressant. Vous pouvez essayer de faire le petit problème et suivre la manière dont je les résolve. C'est comme un exercice supplémentaire. Ça va permettre de vous entraîner, mais je ne vais pas repasser encore à travers le cas.

notes

résumé

40m 49s



Physique Générale II

Leçon 5 - Cycles et machines thermiques

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

May 19, 2025

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 19, 2025

1 / 28

Et puis, j'avais un slide, mais je vais le faire aussi assez court. Il y a quelques années, avec les études de mécanique, j'ai travaillé plusieurs années en mécanique. On faisait des projets comme ça. Des projets de semestre. On a reconstruit un vieil avion, le faux du faux, qui était un des premiers avions qu'on volait en Suisse en 1909. Avec des étudiants de l'EPFL, mais aussi de l'école des métiers, de l'école de couture, de différents trucs, on a reconstruit l'avion que vous voyez là, qui est au Musée de Lucerne. Et puis, j'ai illustré au niveau du cours qu'on a fait, qu'est-ce qu'on avait au niveau du processus adiabatique dans le piston, quand on va compresser le piston. Et là, vous avez un petit peu des chiffres qui sont liés à un carréel. Donc ça, c'était pour votre information.

notes

résumé

41m 11s



3.8 Cycles thermodynamiques

Donc, dans un programme idéal, il resterait deux leçons, mais le temps n'étant pas extensible, il me reste le temps pour une leçon et quelque chose. Donc je vais attaquer le chapitre 5, qui parle des mages, des cycles, des machines thermiques. Puis on verra, je ne pense pas, voyons la vitesse à laquelle j'avance, je ne pense pas que j'aurai le temps de vous parler du second principe. C'est un peu dommage d'avoir un cours thermodynamique qui ne parle pas du second principe. Mais j'espère que vous serez d'accord avec moi, que c'est mieux d'avoir un cours où on comprend quelque chose. Non pas seulement que ça fait moins de matière pour l'examen, mais que c'est mieux de bien comprendre ce qu'on a. Et puis après, ça va aussi vous permettre, si ça vous intéresse d'aller un petit peu plus loin. Il reste d'autres options, c'est de revenir l'année prochaine, en espérant que je sois plus rapide l'année prochaine. Bon, blague à part, parlons des machines thermiques.

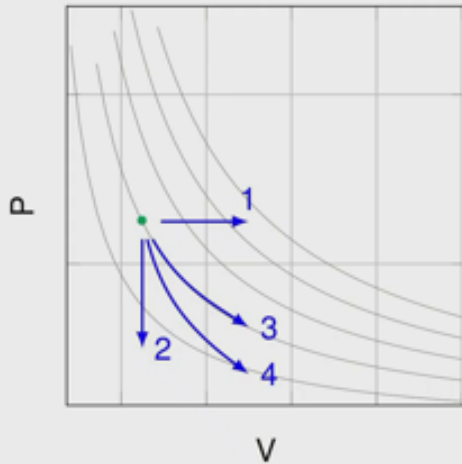
notes

résumé

42m 9s



3.8.1 Rappel sur les transformations thermodynamiques



- ❶ **isobare** : transformation à pression p constante
- ❷ **isochore** : transformation à volume V constant
- ❸ **isotherme** : transformation à température T constante
- ❹ **adiabatique** : transformation sans échange de chaleur $Q_{ech} = 0$ et $pV^\gamma = \text{const}$

Donc pour parler des machines thermiques, il faut comprendre ce qu'est un cycle thermodynamique. Mais un cycle thermodynamique, c'est simplement un ensemble de transformations qui se suivent les uns et les autres, celle qu'on a vue. Là, il n'y a pas la polytropique. Voilà, ça peut être des choses comme ça. Ça peut être au fond, finalement, bien définie.

notes

résumé

43m 12s



3.8.2 Distinction des termes : cause et effet

Terme	Volume	Pression	Cause principale	Commentaires
Expansion	/	gén. \	$W < 0$	Effet mécanique observé
Détente	/	\	$\Delta P < 0$	Fait référence à la cause interne
Compression	\	gén. /	$W > 0$	Réduction de volume par force
Contraction	\	variable	$Q < 0$	Diminution de volume passive
Dilatation	\	variable	$Q > 0$	Augmentation de volume sans nécessairement produire de travail

En général, c'est comme ça que sont définies les choses. Dans la réalité, elles ne sont pas toujours aussi pures. L'isobar n'est pas si isobar que ça. L'isocor n'est peut-être pas absolument isocor, mais on essaie de représenter les choses comme ça. Et puis, si vous en faites une série, vous arrivez à revenir à votre point de départ. Donc on va utiliser dans les modèles qu'on a des transformations isobar, isocor, isotherme, adiabatique.

notes

résumé

43m 37s



3.8.3 Définitions rigoureuses avec la loi des gaz parfaits

Détente : Diminution de pression interne entraînant une augmentation du volume. Le gaz se dilate en utilisant son énergie interne.

Expansion : Travail exercé par le gaz sur l'extérieur. Résulte souvent d'une détente, implique une variation de volume.

Compression : Travail mécanique externe réduisant le volume du gaz, augmentant pression et température.

Contraction : Diminution de volume causée par une baisse de température, sans action mécanique.

Ce que je trouvais aussi intéressant, c'est aussi quelque chose que j'ai fait hier, c'est d'être un petit peu plus précis sur ces termes qu'on utilise. Et j'ai vraiment mis de l'ordre hier sur ces termes. Je ne promets pas que dans les slides précédents, tout est exactement conforme à ce que j'aimerais. Je vais en dire, attention que les termes soient clairs. En général, quand je vous parle d'un terme, je vous dis aussi les variables qu'on changeait. Donc en général, on sent. Mais là, vous avez un tableau qui vous permet un petit peu de mettre de l'ordre dans votre vocabulaire. Alors, quand on parle d'expansion, ça veut dire qu'on s'attend que le volume augmente. Généralement, ça veut dire que la pression diminue, mais ça pourrait, dans cette situation particulière, ne pas être le cas. Et puis en général, c'est un travail qui provoque ça. Donc c'est un effet mécanique qui est observé parce que vous allez avoir le piston qui va bouger. Et donc on a un travail qui est dans ce cas-là négatif. Donc ça veut dire qu'on va fournir du travail à l'extérieur, typiquement, le piston qui va pousser sur la bielle et qui va permettre de faire avancer le train. Quand on parle d'une détente, on parle aussi d'un volume qui est en extension avec une pression qui descend. Et là, en général, c'est créé par une variation de la pression. C'est ça qui est la cause principale de la détente. Et puis on fait référence à, en général, une cause interne. On a éventuellement changé la température qui va provoquer la baisse de la pression. Quand on parle de compression, ça veut dire que le volume diminue et ça veut dire, en général, que la pression est l'augmente et c'est l'inverse de l'expansion.

notes

résumé

44m 7s



3.8.3 Définitions rigoureuses avec la loi des gaz parfaits

Détente : Diminution de pression interne entraînant une augmentation du volume. Le gaz se dilate en utilisant son énergie interne.

Expansion : Travail exercé par le gaz sur l'extérieur. Résulte souvent d'une détente, implique une variation de volume.

Compression : Travail mécanique externe réduisant le volume du gaz, augmentant pression et température.

Contraction : Diminution de volume causée par une baisse de température, sans action mécanique.

Ça veut dire que c'est le travail qui est responsable de ça et on a réduit le volume par force. Quand on parle de contraction, on a aussi le volume qui diminue. Pour la pression, ça dépend, on ne dit pas forcément ce qui se passe au niveau de la pression, mais c'est dû à une perte de chaleur, la chaleur qui est émise à l'extérieur. Et puis c'est ce qu'on appelle une diminution du volume passif. Ça veut dire que c'est le changement de température qui fait que le volume diminue, c'est pas qu'on est en train de le réduire en appuyant dessus. Et puis, un autre terme, c'est la dilatation. On l'utilise aussi pour les corps solides. Et puis ça veut dire aussi que le volume diminue, au niveau de la pression, c'est pas toujours très clair, ça peut dépendre des processus, mais là, ça veut dire, dans ce cas-là, que la chaleur est positive et puis c'est une augmentation du volume sans nécessairement produire du travail.

notes

résumé

3.8.4 Conseils pour un usage rigoureux

- Utiliser **détente** pour désigner une diminution de pression interne du gaz.
- Utiliser **expansion** pour désigner le travail exercé par le gaz.
- Réserver **compression** aux actions mécaniques externes.
- Employer **contraction** pour une réduction de volume due au refroidissement.
- Employer **dilatation** pour désigner l'augmentation de volume causée par un échauffement, sans nécessairement produire de travail.

Là, vous avez des définitions rigoureuses. En tout cas, quand j'ai discuté avec Chad GPT, il était d'accord de dire que c'était très rigoureux. Une détente, c'est une diminution de pression interne entraînant une augmentation du volume, les gaz se dilatent en utilisant son énergie interne. Expansion, travail exercé par le gaz sur l'extérieur, résulte souvent d'une détente, implique une variation de volume. Compression, travail mécanique, externe, réduisant les volumes de gaz, augmentant la pression de la température. Contraction, diminution du volume causé par une baisse de température sans action mécanique. Honnêtement, si j'avais pensé avant, j'aurais mis ça peut-être au début du chapitre. Je suis désolé si ça vous aurait facilité beaucoup le travail. Mais finalement, je suis quand même intéressé de vous donner ça et de préciser ces termes.

notes

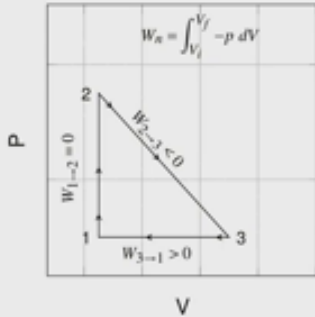
résumé

47m 11s



3.8.5 Qu'est-ce qu'un cycle thermodynamique?

Un **cycle thermodynamique** est succession de transformations après lesquelles le système revient à son état initial.



Donc, après un cycle complet $\Delta U = 0$

En effet

$$\Delta U = \frac{f}{2} nR\Delta T = \frac{f}{2} (p_f V_f - p_i V_i) = 0$$

car

$$p_f V_f = p_i V_i$$

Et puis, là, c'est encore un slide, dans le même sens, pour utiliser rigoureusement ces termes. On devrait utiliser détente pour désigner une diminution de la pression interne du gaz. On devrait utiliser expansion pour désigner le travail exercé par le gaz. On devrait réserver compression aux actions mécaniques externes. On devrait employer contraction pour une réduction du volume du refroidissement. On doit employer dilatation pour désigner l'augmentation du volume causé par les échauffements sans nécessairement produire du travail. J'espère que ça vous aide. Mon but n'est pas du tout de vous compliquer la vie. Au contraire, de vous la simplifier. Voilà. Donc qu'est-ce qu'un cycle thermodynamique ? Eh bien, vous voyez sur le dessin PV, c'est une courbe fermée dans le diagramme de clapeyron. Bien sûr que tous les points du diagramme de clapeyron précisent une température. Donc on a l'état du gaz qui est exactement défini par chacun des points. Donc ça, c'est un truc. Ce n'est pas une vraie transformation. Ce n'est pas un vrai cycle. C'est juste pour vous montrer ce qu'est un cycle. Et donc, quand on a un cycle, il y a certaines choses qu'il faut absolument avoir en tête. Parce que c'est l'objet soit de quiz, soit d'hypothèse dans un exercice. Si vous avez un cycle, ça veut dire qu'il y a toutes les variables d'état qui doivent se retrouver au même état. Et c'est pour ça que j'ai souvent dit des concepts clés de secours. C'est vraiment de comprendre cette expression variable d'état, équation d'état, parce que c'est central de comprendre ça. C'est comme la hauteur de ma maison qui normalement ne change pas, moi, que tout s'écroule autour de nous. Donc c'est vraiment ça à comprendre par rapport à d'autres choses dans cette thermodynamique qui sont des variables de transfert. C'est

notes

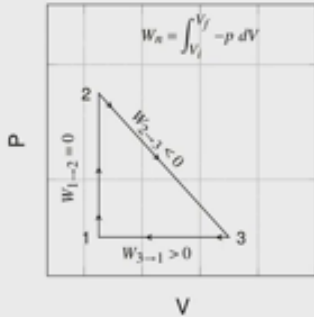
résumé

48m 1s



3.8.5 Qu'est-ce qu'un cycle thermodynamique?

Un **cycle thermodynamique** est succession de transformations après lesquelles le système revient à son état initial.



Donc, après un cycle complet $\Delta U = 0$

En effet

$$\Delta U = \frac{f}{2} nR\Delta T = \frac{f}{2} (p_f V_f - p_i V_i) = 0$$

car

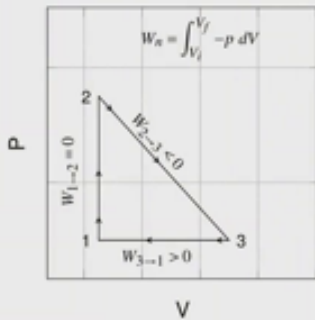
$$p_f V_f = p_i V_i$$

vraiment essentiel de bien comprendre ça et de bien distinguer. Désolé si j'insiste comme un vieil oncle, mais vraiment, ça, c'est vraiment très important d'avoir compte. Donc ça veut dire que dans une situation où vous avez un cycle, forcément, la variation d'énergie interne, elle est nulle. Et là, on a fait juste un petit calcul. On a dit, la variation d'énergie interne, c'est $\frac{f}{2} nR \Delta T$. J'ai le droit, j'ai la fonction de joule, j'ai le droit d'écrire ça pour un gaz parfait. Maintenant, je peux exprimer ΔT en fonction de la pression et du volume final. Je peux aussi dire que ΔT était 0, mais voilà, j'avais le plaisir de continuer mon équation. Et vous avez que $P_{\text{final}} \text{ fois } V_{\text{final}}$, moins $P_{\text{initial}} \text{ fois } V_{\text{initial}}$, c'est égal à 0.

notes

résumé

3.8.6 Que produit un cycle thermodynamique?



Un cycle thermodynamique peut être utilisé pour

- 1 produire du travail à partir d'un échange de chaleur entre une source chaude et une source froide: on appelle ça un **moteur thermique**,
- 2 pomper de la chaleur dans une source froide et réchauffer une source chaude à l'aide d'un travail: on appelle ça une **pompe à chaleur**.

Que réalise le cycle présenté à gauche?

- a) Convertit du travail en chaleur
- b) Convertit de la chaleur en travail
- c) Ni l'un ni l'autre, effet net nul

Donc ça veut dire que P final fois V final est égal à P initial, enfin, final, ça tourne en rond, c'est clair, etc.

notes

résumé

50m 49s



3.8.7 Interdit de Clausius et Interdit de Kelvin

- **Interdit de Clausius:** "Une transformation thermodynamique dont le seul résultat final serait de transférer de la chaleur d'un corps à une température donnée à un corps à une température plus élevée est impossible".
- **Interdit de Kelvin:** "Une transformation thermodynamique dont le seul résultat final serait de transformer en travail de la chaleur extraite d'une source à température uniforme est impossible".

————— chaud

————— froid

Alors, que produit un cycle thermodynamique ? Ben, un cycle thermodynamique peut être utilisé soit pour produire du travail, je m'intéresse à faire un moteur, j'en ai quelques-uns que j'aimerais vous démontrer ici, ou tout au long, je vais faire avec le temps. Et puis ça permet aussi de convertir... Donc ça me permet de convertir de la chaleur en travail, mais ça me permet aussi de récupérer, de pomper de la chaleur d'une source froide, pour l'amener dans une source chaude. Ça s'appelle soit un frigo, quand on est bientôt, je dredis, quand on va aller faire la fête, on a besoin d'un frigo. Et puis autrement, quand on s'occupe de sa maison, ça s'appelle une pompe à chaleur. Dans le cadre de la pompe à chaleur, vous prenez de l'énergie à l'extérieur pour la mettre à l'intérieur, qui est considérée comme votre source chaude, alors que normalement, la chaleur, elle va du chaud au froid, donc là, vous la pompez dans l'autre sens. Et puis, dans votre frigo, vous mettez un plat de pommes de terre que vous n'avez pas terminés, ou les pommes de terre que vous avez achetés au marché, et puis pour les refroidir. Donc la chaleur qui est interdite de ces pommes de terre va être pompée par le frigo pour les mettre dans l'air ambiant, qui est plus chaud que le frigo. Donc c'est toujours des transferts entre sources. Petite quiz que je vais passer tout droit.

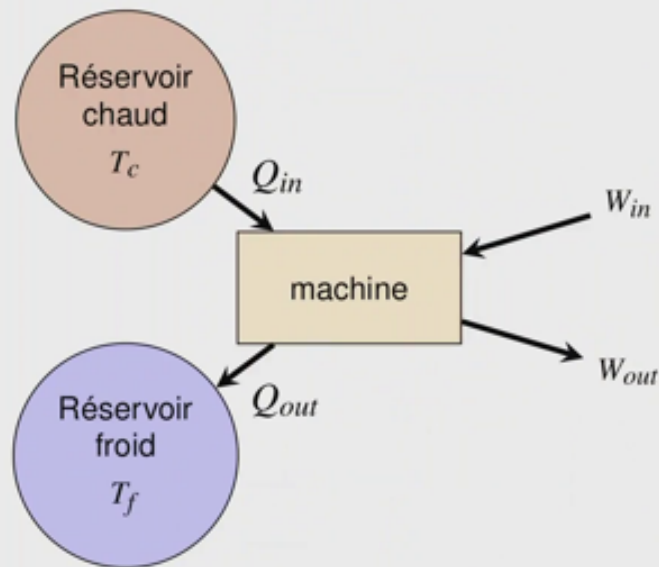
notes

résumé

50m 58s



3.8.8 Le schéma d'une machine thermique



Alors, en fait, et ça, ce serait lié, vous aurez quand même parlé du second principe, il y a dans les systèmes, ce qu'on appelle, des interdits, l'interdit de Clausius et l'interdit de Kelvin. Alors Clausius, qui était un professeur de physique allemand du XIXe siècle, disait une transformation thermodynamique dont le seul résultat final serait de transférer de la chaleur d'un corps à une température donnée à un corps à une température élevée. On ne peut pas, on a absolument besoin, je vais changer de couleur, on a absolument besoin d'amener du travail. Donc l'interdit de Clausius, c'est juste la partie qui est en rouge, ça on ne peut pas faire, on est absolument nécessaire d'amener. Et puis Kelvin, c'est en anglais, une transformation thermodynamique dont le seul résultat final serait de transformer en travail de la chaleur extraite d'une source de température uniforme et impossible. Donc ça veut dire, ce que vous ne pouvez pas faire, c'est faire une machine qui prendrait de la chaleur et coucou, voilà. Et puis qui fait du travail. Ça c'est pas possible, vous avez obligatoirement un flux de chaleur qui doit aller à une source froide, autrement ça marche pas. Et là derrière il y a le second principe que vous verrez peut-être si vous revenez l'année prochaine.

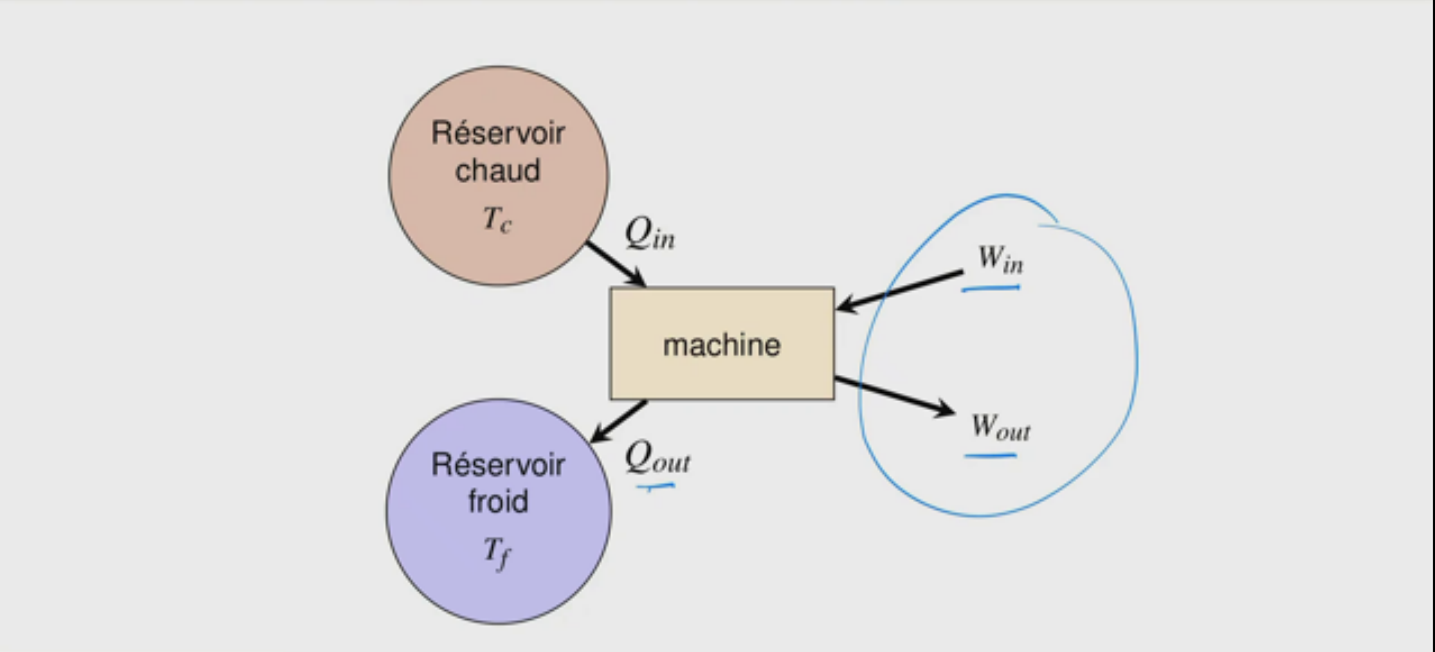
notes

résumé

52m 32s



3.8.8 Le schéma d'une machine thermique



Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 19, 2025 11 / 28


May 19, 2025 11 / 28

Donc une machine thermique, ça ressemble à ça quand on la dessine. Vous avez votre machine, bien sûr que la mécanique comment c'est fait est importante, mais c'est pas ça qui va nous intéresser dans le cours, c'est l'aspect thermodynamique qui nous intéresse. Et vous avez obligatoirement un réservoir chaud et un réservoir froid. Et puis vous avez un environnement avec lequel on peut éventuellement échanger du travail. Donc la chaleur va provenir de la source chaude, on appelle ça une source, peut-être vous allez lui prendre de la chaleur mais elle va pas baisser sa température. Elle est suffisamment grande pour ce que vous allez lui prendre, ça lui fait pas beaucoup d'effets. Imaginez que vous voulez différer à la banque nationale, ça va pas lui faire grand chose quoi. Et puis en général, à moins qu'on ait dans une pompe à chaleur, si on est dans un moteur, on prend de la chaleur à la source chaude. Et puis on va éventuellement produire du travail que j'ai appelé W_{out} . À un moment donné, on aura peut-être besoin d'en récupérer une partie pour continuer à faire le cycle. Et puis vous avez aussi de la chaleur qui doit aller sur la source froide. Et si vous prenez du chaud pour aller jusqu'au froid, c'est pas une machine, ça va tout seul, ça va naturellement. Une source chaude, elle va donner sa chaleur naturellement à une source froide. Mais par contre vous voulez en faire quelque chose, donc ça veut dire que vous allez vouloir récupérer ça.

[illegible]

résumé

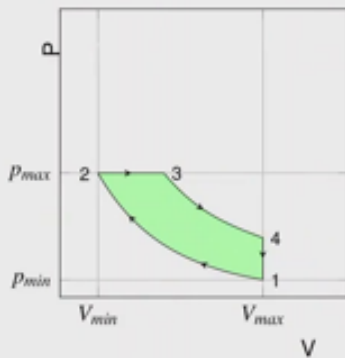
54m 39s





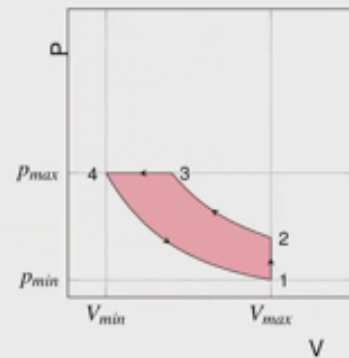
3.8.9 Cycle moteur vs cycle récepteur

Un **cycle moteur** fournit du travail à l'environnement.



Si le parcours est effectué dans le sens horaire, le travail reçu est négatif, c'est le cycle moteur.

Un **cycle récepteur** transfère de la chaleur de la source froide à la source chaude.



Si le parcours est anti-horaire, le travail reçu est positif, c'est le cycle récepteur.

Donc on pourrait imaginer qu'il n'y a pas le travail. Simplement, dans ce sens-là, ça ferait du transfert d'une machine pour refroidir plus. Un ventilateur qui refroidit plus vite quelque chose ou qui réchauffe plus vite votre glace pour être une machine comme ça. Par contre, vous pouvez pas ne pas avoir la source chaude et la source froide. Vous êtes obligé d'avoir, c'est absolument nécessaire, autrement ça marche pas. Alors ensuite, les cycles, il y en a de deux catégories. Il y a ce qu'on appelle un cycle moteur. Ça veut dire que mon objectif c'est de récupérer du travail. Et j'utilise une source chaude à laquelle je vais extraire de la chaleur. Et puis cette chaleur, je vais la transformer d'une part en travail et d'une part dans un flux de chaleur vers la source froide. Et là, c'est mon cycle qui doit tourner dans le sens horaire pour que ce soit le cas. Si je fais la même chose mais que je fais les opérations dans le sens opposé, j'ai ce qu'on appelle un cycle récepteur. Donc c'est une pompe à chaleur. Suivant, vous mettez votre frontière, ça fait un frigorigène ou ça fait une pompe à chaleur. Donc si vous voulez extraire de la source froide, de la chaleur pour la garder au froid, ça s'appelle un frigorigène. Si vous voulez amener à l'intérieur de votre maison de la chaleur qui vient, de l'air extérieur qui est plus froid que vous, ça s'appelle une pompe à chaleur. Donc ces mots-là sont des mots importants.

notes

résumé

56m 26s

