

Support de cours

Cours:

## UNIL-123 Physique Expérimentale II

Vidéo:

### Lesson14-UNIL-123 Physique expérimentale II

Concepts (extraits des sous-titres générés automatiquement) :

**Échanges de chaleur. Niveau du travail. Source de chaleur. Première étape. Valeurs absolues. Partie c. Rendement de Carnot. Quantité d'énergie. Source chaude. Petites lettres. Extérieur du piston.  $\Delta u$  égal. Centrales nucléaires françaises. Source froide. Feu du gaz inflammable.**



[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/>

# Moteur à combustion externe

Ces sous-titres ont été générés automatiquement

notes

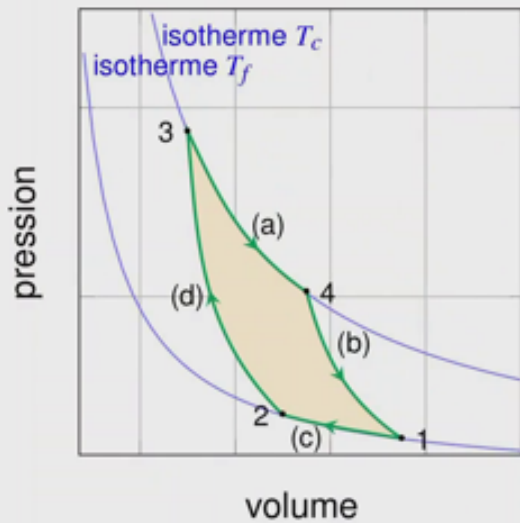
résumé

0m 0s

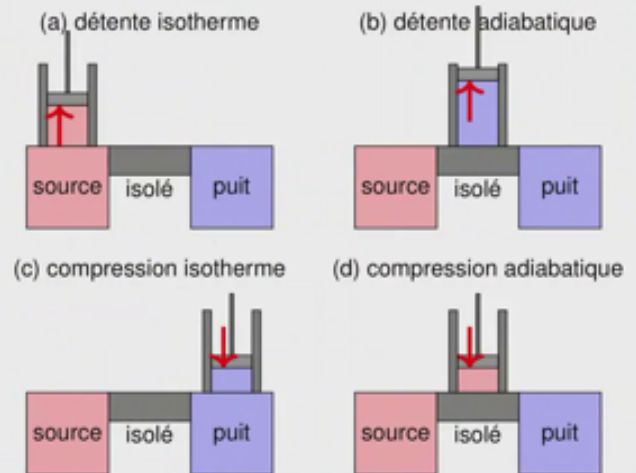




### 3.8.14 Cycle de Carnot (encore)



[http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more\\_stuff/Applets/carnot\\_cycle/carnot\\_cycle.html](http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/Applets/carnot_cycle/carnot_cycle.html)



regarder deux qui travaillent qu'avec des gaz. Le premier, c'est vraiment la référence. C'est au fond aussi comme ça que l'histoire, la thermodynamique a commencé. Ce cher monsieur Carnot, c'est intéressé à comment pouvait fonctionner un moteur à partir de gaz. Donc si vous regardez le schéma, après on regardera le diagramme de claperon. Donc on commence aussi un peu rouge, là, un. Donc on a un

notes

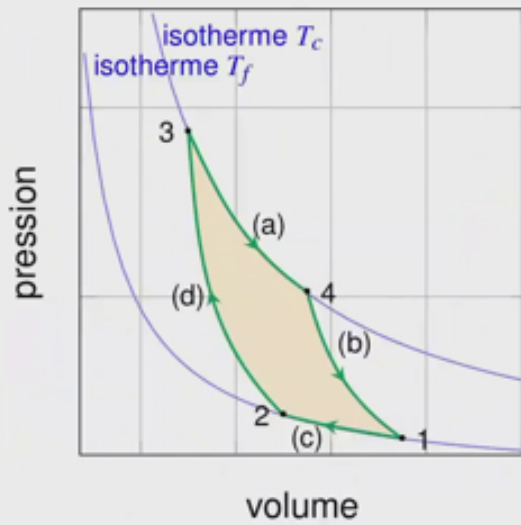
résumé

7m 10s

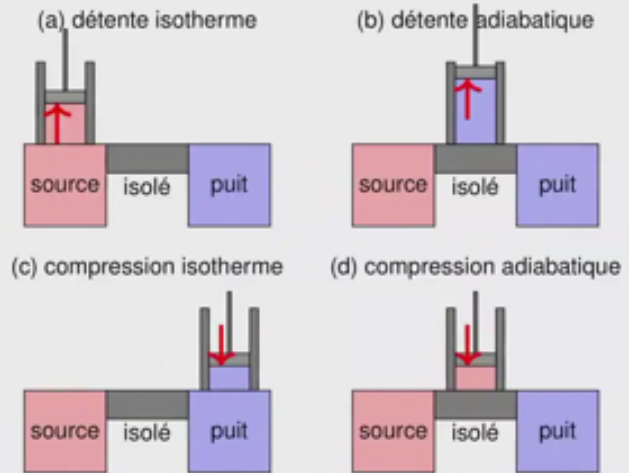




## 8.14 Cycle de Carnot (encore)



[http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more\\_stuff/Applets/carnot\\_cycle/carnot\\_cycle.html](http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/Applets/carnot_cycle/carnot_cycle.html)



gaz et puis ce que vous voyez, c'est qu'il y a d'une part une expansion du gaz et d'autre part, il y a

notes

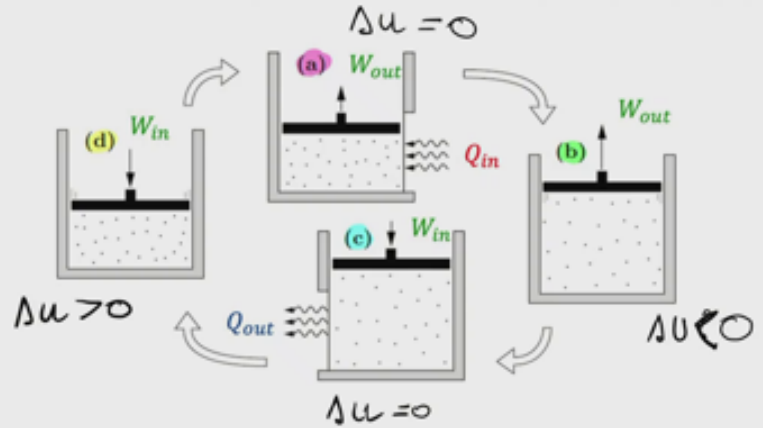
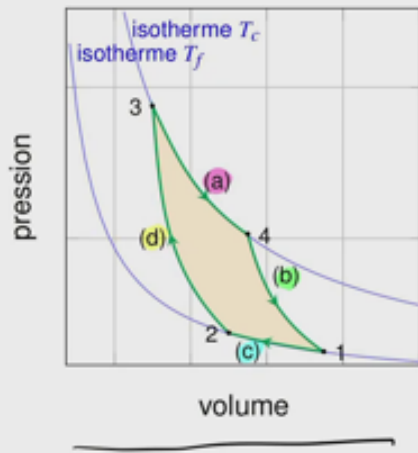
résumé

7m 35s



### 3.8.13 Le cycle de Carnot réalise l'efficacité maximale théorique

**Théorème de Carnot:** Aucun moteur fonctionnant entre deux réservoirs de chaleur ne peut être plus efficace qu'un moteur Carnot fonctionnant entre ces mêmes réservoirs.



une source de chaleur, la source chaude qui injecte de la chaleur à l'intérieur du gaz. En B, on n'est plus en contact du tout avec la source chaude et puis on a le gaz qui continue à avoir une expansion. Dans la partie C, alors on est en train de compresser le gaz et puis on est en contact avec la source froide, ça veut dire la chaleur qui peut quitter le système. Et puis dans le dernier, on est encore avec la compression qui continue, mais on n'est plus du tout en contact avec une source froide ou une source chaude. Donc si on regarde ceci dans un diagramme de claperon, vous pouvez voir donc les petites lettres A, B, C, D sont reportées sur le graphique. Donc vous avez l'étape A qui va de ce qu'on a appelé l'étape 3 à l'étape 4. Là vous voyez que vous avez, on suit une isotherme, quand on a ces courbes hyperboliques qu'on a dessinées sur le graphique qui dépasse le graphique, en général

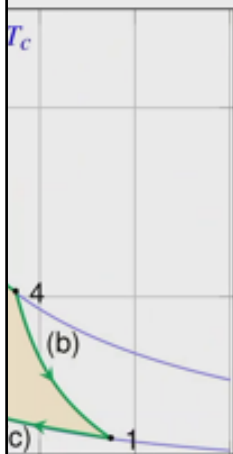
notes

résumé

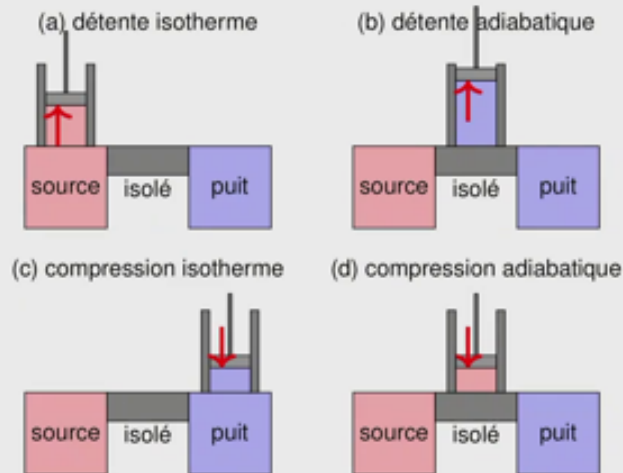
7m 37s



## Carnot (encore)



me

[n.physics.virginia.edu/more\\_stuff/Applets/carnot\\_cycle/carnot\\_cycle.html](http://n.physics.virginia.edu/more_stuff/Applets/carnot_cycle/carnot_cycle.html)


## 3.8.15 Cycle d

## Étape

1. Isotherme à  $T_H$
2. Adiabatique (dé
3. Isotherme à  $T_C$
4. Adiabatique (co

c'est des isothermes. Quand on a des adiabatiques, on les dessine en général. Soit on écrit adiabatique, soit on les dessine que sur le cycle qu'on est en train de faire. Donc en plus, j'ai écrit isotherme, mais si vous avez un graphique comme ça, en général c'est isotherme. Donc vous voyez que dans l'étape A, on est sur une isotherme parce qu'on amène de la chaleur, de la source chaude, mais on est en train au niveau du travail d'exporter la même quantité d'énergie. Donc ça veut dire que le niveau d'énergie interne du piston, dans ce cas-là, il reste constant. Donc  $\Delta U$  égal à 0. Dans l'étape suivante, on continue, c'est l'inertie du système qui va faire qu'on va continuer à détendre le gaz. Donc ça veut dire qu'il y a du travail qui est exporté du système, moins PDV, par contre, il n'y a plus d'échange. C'est une situation adiabatique. Donc ça veut dire qu'il n'y a pas d'échange de chaleur, donc il y a un échange d'énergie qui se fait au niveau du

## notes

## résumé

9m 1s



### 3.8.15 Cycle de Carnot : Synthèse des 4 étapes


Étape	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
1. Isotherme à $T_H$ (expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
2. Adiabatique (détente)	Inertie interne	$= 0$	$< 0$	$< 0$	$\downarrow$	$\uparrow$
3. Isotherme à $T_C$ (compression)	Force externe	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
4. Adiabatique (compression)	Force externe	$= 0$	$> 0$	$> 0$	$\uparrow$	$\downarrow$

travail, mais il n'y a pas d'échange d'énergie au niveau de la chaleur. Dans le C, on a l'inverse de la situation A. Vous voyez qu'on est entre, ici on est entre les points 1 et les points 2 sur le diagramme de clapperon. Ça veut dire que le volume est en train de diminuer, mais on est sur une isotherme. Donc ça veut dire que l'énergie interne du système, elle va être 0. Ici, l'énergie interne du système, elle était en train de diminuer. Et puis, dans la quatrième étape, on continue à compresser le gaz, mais il n'y a pas d'échange de chaleur. On est de nouveau sur une adiabatique. Donc ça veut dire que là, on est en train de mettre de l'énergie dans le système. Vous vous rendez compte, vous vous arrivez à comprendre que quand on va faire le cycle, on a reçu parfois de l'énergie, on a donné et puis que ça doit être à zéro, on se retrouve au point de départ. Parce que si c'était par le cas, le fait que si on perdait de l'énergie chaque fois, alors finalement le gaz, il perdrait de son volume et puis on ne pourrait plus faire fonctionner le système. Si on gagnait de l'énergie chaque fois, ça veut dire que la position du piston serait chaque fois plus haute, plus haute, plus haute jusqu'à ce que le système explose ou marche plus, etc. Donc c'est vraiment important. Attendez-vous quand même au détour d'une question. C'est vraiment une maladie de professeur de physique. Vraiment les cycles, vous avez les variables d'État qui doivent se retrouver au même état au début qu'à la fin. C'est vraiment ce qui définit l'État. Souvenez-vous de mes références incessantes à mon lieu d'habitation, champlant, où on fait tous les tours


# notes

résumé

10m 22s



10m 22s



A QR code is located on the left side of the page, below the timer. The rest of the page is a blank writing area with horizontal dashed lines.



### 3.8.15 Cycle de Carnot : Synthèse des 4 étapes

Étape	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
1. Isotherme à $T_H$ (expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
2. Adiabatique (détente)	Inertie interne	$= 0$	$< 0$	$< 0$	$\downarrow$	$\uparrow$
3. Isotherme à $T_C$ (compression)	Force externe	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
4. Adiabatique (compression)	Force externe	$= 0$	$> 0$	$> 0$	$\uparrow$	$\downarrow$

possibles, on se retrouve toujours à la même altitude. C'est vraiment ça l'État. Ça ne doit pas vous sortir. Alors autour de ce cycle de Carnot, il y a quelque chose qu'on appelle le théorème de Carnot. Et le théorème de Carnot, il dit la chose suivante, donc je l'énonce, mais je le démontre pas. Aucun moteur fonctionnant entre deux réservoirs de chaleur. C'est clair qu'on peut imaginer des systèmes beaucoup plus

notes

résumé

### 3.8.15 Cycle de Carnot : Synthèse des 4 étapes

Étape	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
1. Isotherme à $T_H$ (expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
2. Adiabatique (détente)	Inertie interne	$= 0$	$< 0$	$< 0$	$\downarrow$	$\uparrow$
3. Isotherme à $T_C$ (compression)	Force externe	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
4. Adiabatique (compression)	Force externe	$= 0$	$> 0$	$> 0$	$\uparrow$	$\downarrow$

compliqués où il y a plusieurs étapes. Vous avez fait d'ailleurs un exercice où vous devez faire les choses en plusieurs étapes. En ce moment-là, on dit que si on faisait en plus d'étapes, on pouvait récupérer des choses, etc. Donc ce qui est important, c'est que deux réservoirs de chaleur ne peuvent être plus efficaces qu'un moteur de Carnot fonctionnant entre ces deux mêmes réservoirs. Donc c'est vraiment ce qu'on appelle le rendement de Carnot. C'est le rendement maximal possible qui est un idéal. On n'y arrive jamais parfaitement parce que la réalité est toujours un peu différente.

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

12m 37s



### 3.8.15 Cycle de Carnot : Synthèse des 4 étapes

Étape	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
1. Isotherme à $T_H$ (expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
2. Adiabatique (détente)	Inertie interne	$= 0$	$< 0$	$< 0$	$\downarrow$	$\uparrow$
3. Isotherme à $T_C$ (compression)	Force externe	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
4. Adiabatique (compression)	Force externe	$= 0$	$> 0$	$> 0$	$\uparrow$	$\downarrow$

Vous souvenez, la semaine passée, il y avait une expérience avec un moteur de Stirling.

notes

résumé

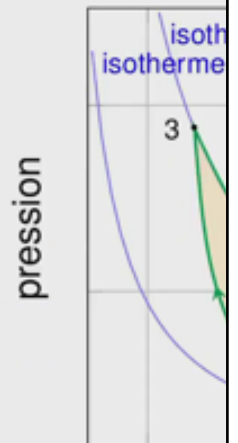
13m 10s



## e Carnot : Synthèse des 4 étapes

	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
(expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
( détente)	Inertie interne	$= 0$	$< 0$	$< 0$	$\downarrow$	$\uparrow$
(compression)	Force externe	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
( compression)	Force externe	$= 0$	$> 0$	$> 0$	$\uparrow$	$\downarrow$

## 3.8.16 Diagram



Et puis vous avez le cycle théorique qui était à l'écran, mais vous aviez le cycle réel qui était sur le sioscope. Et on voyait bien que ça ressemblait pas exactement à ce que j'avais destiné au niveau théorique. Donc c'est important de vous souvenir. Ça, c'est aussi un passage obligé de beaucoup d'examens de thermodynamique, de se rendre compte que le cycle de carnaux, c'est un idéal et que c'est le rendement supérieur. Et que ce n'est pas du tout possible d'avoir un rendement supérieur au rendement de carnaux. L'année passée, à l'examen, j'avais présenté une machine un peu farfelue qu'on avait d'ailleurs à peu de choses près. On avait essayé de me la vendre et qui donnait des rendements bien supérieurement de carnaux. Et ça suffisait pour dire que ce n'était pas correct.

### notes

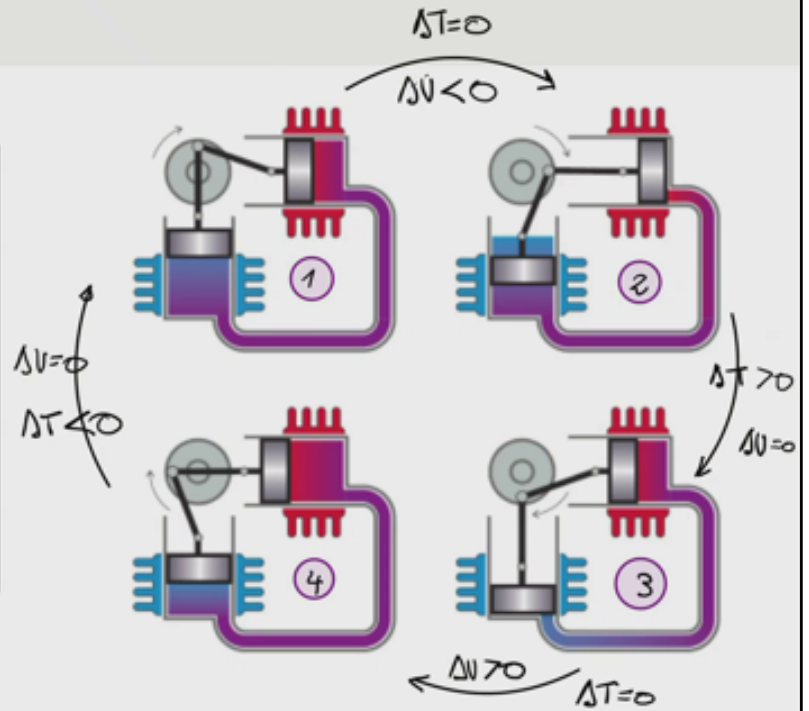
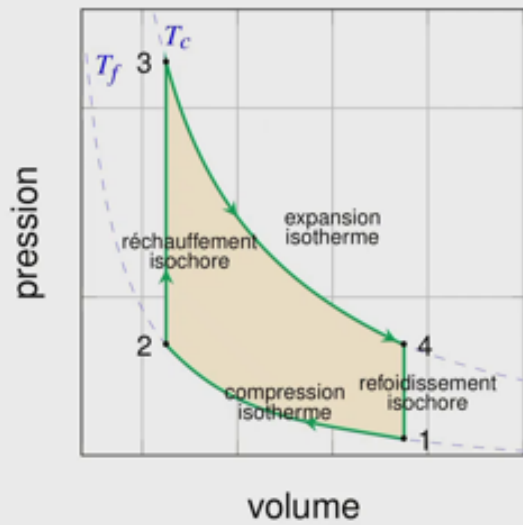
### résumé

13m 20s





### 3.8.17 Cycle de Stirling



Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 19, 2025

21 / 28

Puisqu'il y a le théorème de Carnot qui dit qu'on ne peut pas faire mieux que le cycle de Carnot.

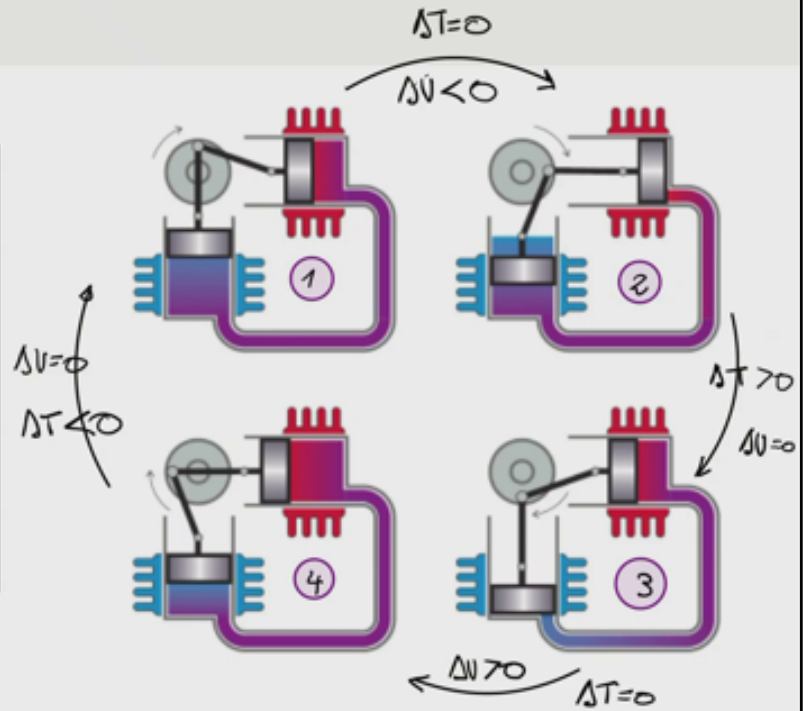
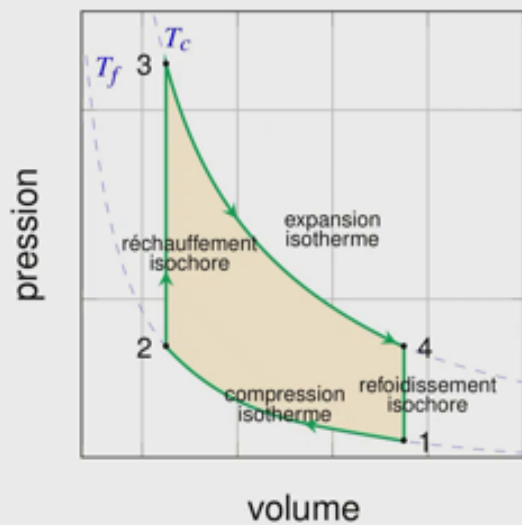
notes

résumé

14m 8s



### 3.8.17 Cycle de Stirling



Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 19, 2025

21 / 28

Là derrière, si on voulait le démontrer, vous n'avez pas tous les outils pour le démontrer, parce qu'on n'a parlé que du premier principe, puis au fond, les vraies raisons pour quoi on peut affirmer ce théorème, elles se trouvent dans ce chapitre que vous n'aurez pas, elles se trouvent avec ces livres, vraiment au deuxième principe de la thermodynamique. Mais quand on veut faire faire des choses impossibles aux physiciens en général, ils sortent carton jaune, deuxième principe de la thermodynamique, c'est vraiment une pierre angulaire de la physique. Donc je suis juste en train de vous rendre plus triste que de ne pas avoir ce chapitre-là. Dans ce slide, on voit juste, on peut dire, la côté un peu mécanique aux bandes dessinées, si vous voulez de comment fonctionne ce moteur, ça veut dire qu'il faudra faire quelque chose pour que le piston soit de temps en temps en contact avec la source froide et la source chaude. Alors il y a toujours deux manières de faire, on va dire, soit vous déplacer tout votre piston. Vous pouvez imaginer ça, mécaniquement, ça ne va pas être super simple de faire ça. Mais vous voyez qu'il y a des étapes où je suis sur la source chaude, des fois je suis sur aucune source, puis une fois sur la source froide,

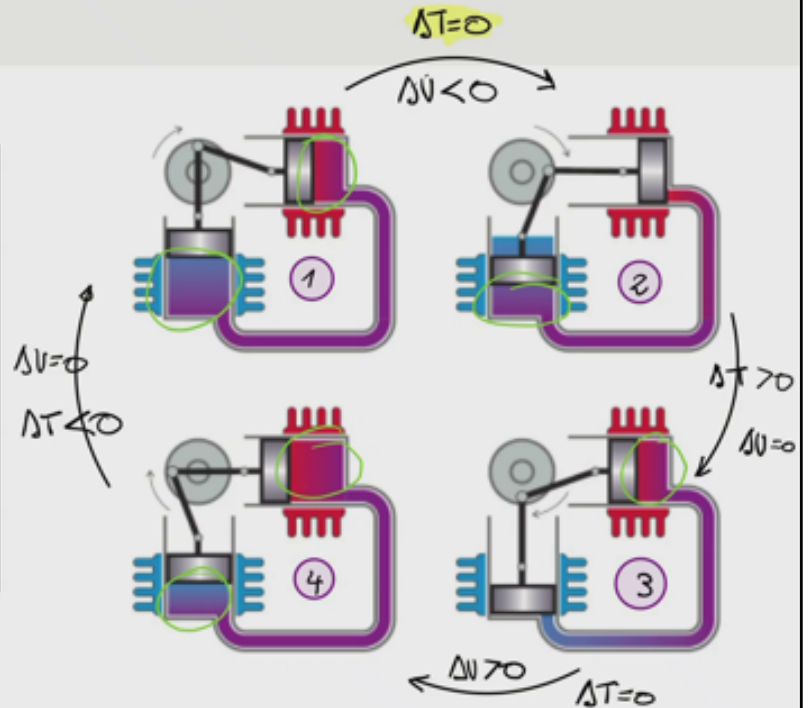
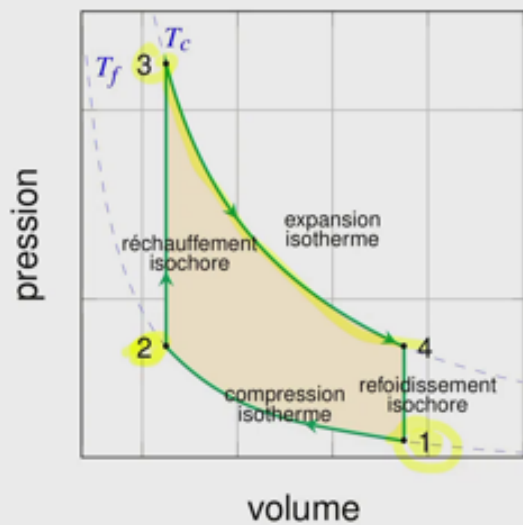
notes

résumé

14m 16s



### 3.8.17 Cycle de Stirling



Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 19, 2025

21 / 28

puis après je reviens sur la source chaude, etc. Ou l'autre possibilité qui est souvent plus fréquente, c'est que je vais faire bouger mon fluide. Je vais trouver un élément mécanique qui va faire que mon système mécanique va peu bouger, mais je vais réussir à faire passer mon fluide de temps en temps dans une zone où il est en contact avec la source chaude et de temps en temps il va être en contact avec la source froide. Et puis là vous avez une référence, si vous voulez regarder comment ça fonctionne, vous pouvez aller voir la référence, donc j'étais en train de parler de ce lien là. Donc si on veut résumer comment ça fonctionne, on a donc, c'est peut-être chose que vous pouvez vous souvenir, c'est pas grave, la question vous ne sera jamais posée comme ça, de but en blanc. Mais donc vous avez des isothermes et des adiabatiques dans le cycle de Carnot, c'est ça, il y a des isothermes et des adiabatiques. Donc la première étape, on a une expansion, ce qui provoque, c'est ça qui est intéressant un petit peu dans ce slide, c'est de montrer la cause, de faire le lien avec la cause. Qu'est-ce qui fait que le moteur avance ? Donc là c'est la source chaude qui provoque l'extension. Donc ça veut dire que le transfert de chaleur est plus grand que zéro, on amène de la chaleur au système, on lui prend du travail, et puis donc sa énergie est constante, sa température est constante, et puis son volume est en train d'augmenter. Donc la flèche en haut, ça veut dire augmenter, la flèche en bas, ça veut dire diminuer. Après on passe par une adiabatique, c'est une détente, si vous souvenez ce slide qui parlait du vocabulaire,

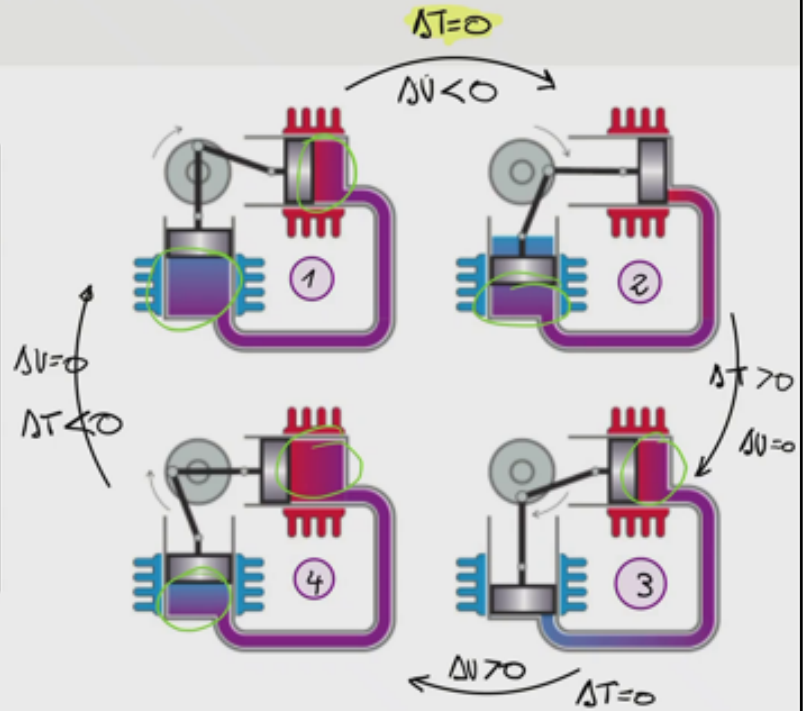
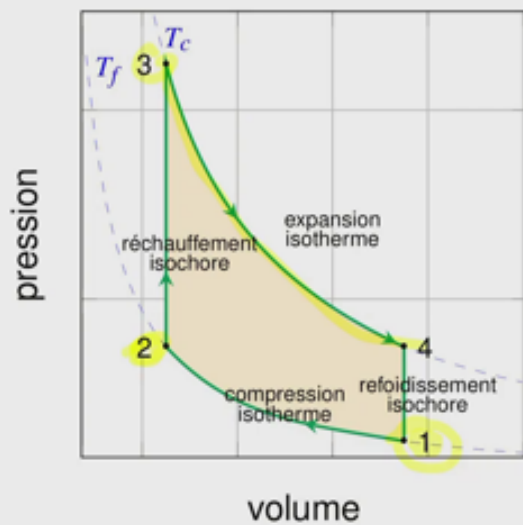
notes

résumé

15m 24s



### 3.8.17 Cycle de Stirling



Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 19, 2025

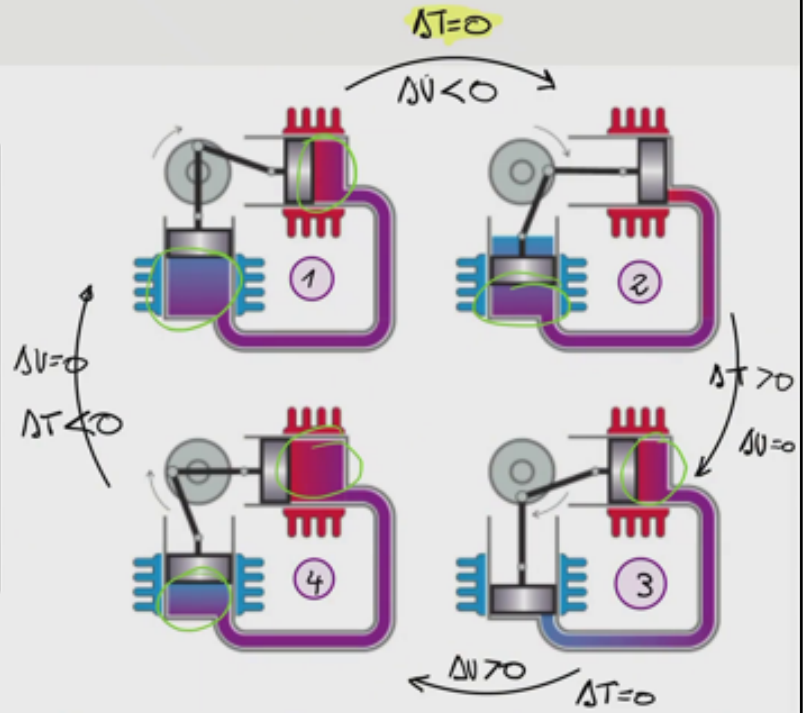
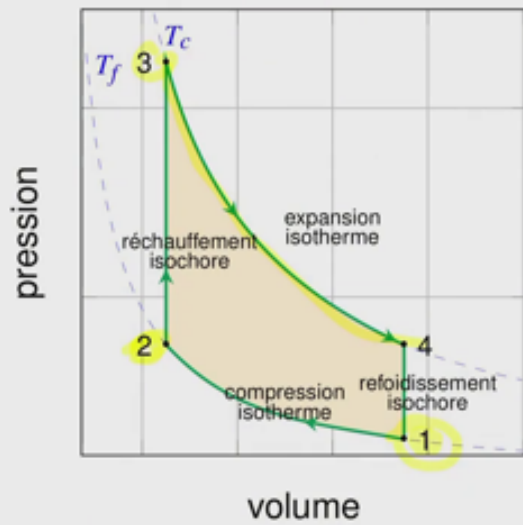
21 / 28

je ne m'attends pas non plus, vous ne serez pas attrapés sur la précision de ce vocabulaire, c'est plutôt pour vous pour vous en sortir. On parle d'expansion parce que c'est causé par une cause externe, tandis que dans la détente c'est le gaz lui-même. Donc c'est l'inertie interne qui provoque cette détente. On n'a plus de chaleur, on est dans une adiabatique, le travail est toujours exporté, et puis on est en train de perdre de l'énergie, puisque on exporte du travail, et puis la température va baisser, et puis le volume va continuer à augmenter. Et puis on peut continuer, après on est trouvé une isotherme, mais on se retrouve au sens inverse, on parle de compression, on parle de compression dans l'isotherme et la diabatique dans ce cas-là. C'est la force externe qui va être la cause, c'est l'inertie du système, c'est la bielle qui revient, et puis qui vous récomprime le piston.

notes

résumé

### 3.8.17 Cycle de Stirling



Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 19, 2025

21 / 28

Vous êtes en contact avec la source froide,

notes

résumé

18m 13s



### 3.8.18 Cycle de Stirling : Synthèse des 4 étapes

Étape	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
1. Isotherme à $T_H$ (expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
2. Isochore (refroidissement)	Régénérateur	$< 0$	$= 0$	$< 0$	$\downarrow$	Const.
3. Isotherme à $T_C$ (compression)	Source froide	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
4. Isochore (réchauffement)	Régénérateur	$> 0$	$= 0$	$> 0$	$\uparrow$	Const.

et ça veut dire qu'il y a un flux de chaleur qui est négatif. Vous avez un travail qui est positif, et ça veut dire que le travail rentre dans le système, par rapport à l'extérieur, c'est le moment où on amène du travail depuis l'extérieur, c'est-à-dire qu'on parle de force externe, et puis c'est une adiabatique, donc l'échange de chaleur est zéro, la température est constante, et puis mon volume diminue. Et puis après vous avez la dernière pour fermer le cycle, la diabatique c'est due à une cause externe, c'est la force externe qui continue, c'est vraiment la bielle qui est dans son inertie. Dans la première partie, le système fournit de l'énergie à l'extérieur, et puis la deuxième partie, il en reçoit.

notes

résumé

18m 25s



## 8.18 Cycle de Stirling : Synthèse des 4 étapes

Froid  
État

Étape	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
1. Isotherme à $T_H$ (expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
2. Isochore (refroidissement)	Régénérateur	$< 0$	$= 0$	$< 0$	$\downarrow$	Const.
3. Isotherme à $T_C$ (compression)	Source froide	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
4. Isochore (réchauffement)	Régénérateur	$> 0$	$= 0$	$> 0$	$\uparrow$	Const.

Il faut espérer qu'il en reçoit moins, que ce qu'il doit fournir autrement ça ne marcherait pas. Et puis là, on n'a pas d'échange de chaleur, on a un travail qui est positif, on reçoit du travail de l'extérieur, on a un échange d'énergie qui est positif, le système augmente dans son système d'énergie, on a une température qui augmente,

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

19m 14s





### 3.8.19 Cycle de Stirling : résumé

Caractéristique	Description
<b>Rendement idéal</b>	Même que Carnot : $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$ (si réversible)
<b>Source de chaleur</b>	Externe (combustion, solaire, géothermie, etc.)
<b>Applications typiques</b>	Générateurs solaires, spatial, sous-marins, cogénération
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Haute efficacité théorique</li> <li>• Silencieux (pas de combustion interne)</li> <li>• Polyvalence énergétique</li> <li>• Peu de pièces mobiles → grande fiabilité</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Régénérateur difficile à optimiser</li> <li>• Puissance spécifique faible</li> <li>• Rendement réel limité par les pertes</li> </ul>

et puis on a un volume qui diminue. Là, vous oubliez, puisque je ne vous parlerai pas du deuxième principe. L'autre type de moteur, qui a fonctionné la dernière fois, il s'appelle moteur de Stirling. C'est aussi donc un moteur à combustion interne, vous voyez qu'il ne se passe rien de chimique, d'électrique, ou quoi que ce soit, l'intérieur du moteur,

notes

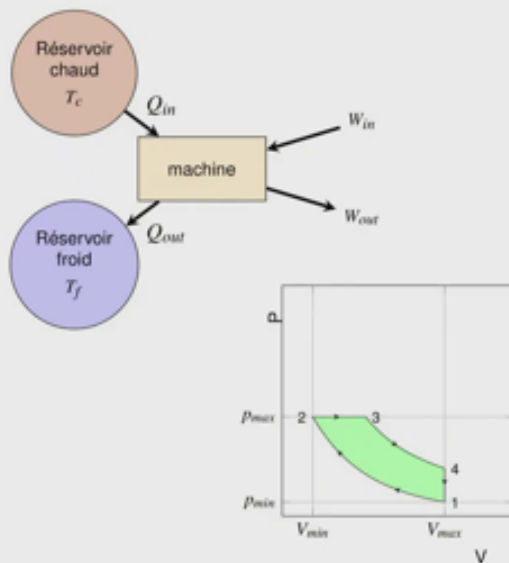
résumé

19m 43s





### 3.8.10 Rendement d'un moteur



Si le rendement est défini comme le rapport de l'utilité sur le coût, quelle expression choisiriez pour définir le **rendement d'un moteur** ?

- a)  $\frac{|W_{out}|}{W_{in}}$
- b)  $\frac{|W_{out}|}{Q_{in} - |Q_{out}|}$
- c)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in} - |Q_{out}|}$
- d)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in}}$

c'est juste le système thermomécanique qui fonctionne. Dans ce cas-là, on a isotherme, et puis on a des isocores, le volume ne change pas. Là, on voit vraiment le système dont je vous parlais avant, on va faire se déplacer, on a deux pistons, on va faire passer, on a un piston qui est plutôt en relation avec la source froide, et un piston qui est en relation avec la source chaude, et on va faire passer le gaz de l'un à l'autre. Vous avez les étapes 1, 2, 3, 4, qui se retrouvent sur le dessin. Par rapport au dessin précédent, là, on a juste montré le début des étapes. Donc si on commence à 1, on se retrouve ici, ici en bas. Vous pouvez observer, quand on passe de l'un à l'autre, le changement des volumes. Donc les volumes, ils sont là. Vous avez sur l'image, vous avez soit, on va dire, un piston et demi de volume, ou bien vous avez ici un demi piston de volume, ici vous avez un demi piston de volume, puis ici vous avez de nouveau un piston et demi de volume. Si vous voulez voir comment les volumes. Merci pour que ça servent. C'est le dessin, c'est approximatif. Je trouve que ce ne passe pas exactement comme c'est sur le dessin, mais pour vous expliquer comment fonctionnent les choses. Donc dans la première étape, on va de 1 à 2, donc on est en train de diminuer le volume. Et par contre, on augmente la pression. Donc ça veut dire qu'on est en train de gagner, le moteur est en train de gagner de l'énergie. On est sur une isotherme. Donc, je ne sais pas si c'est de couleur que je voulais, je vous laisse ça. On a une isotherme, on

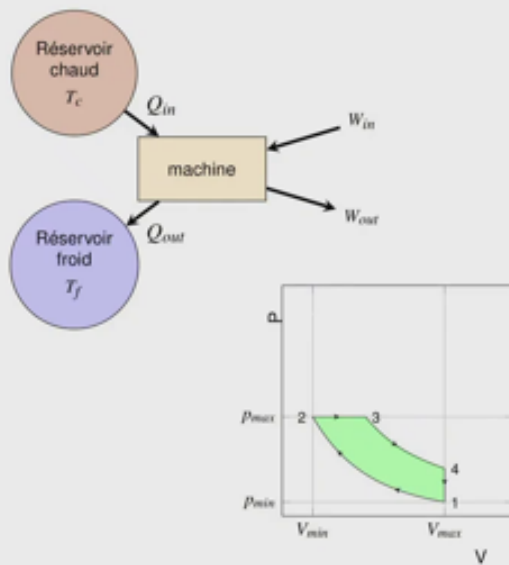
notes

résumé

20m 14s



### 3.8.10 Rendement d'un moteur



Si le rendement est défini comme le rapport de l'utilité sur le coût, quelle expression choisiriez pour définir le **rendement d'un moteur** ?

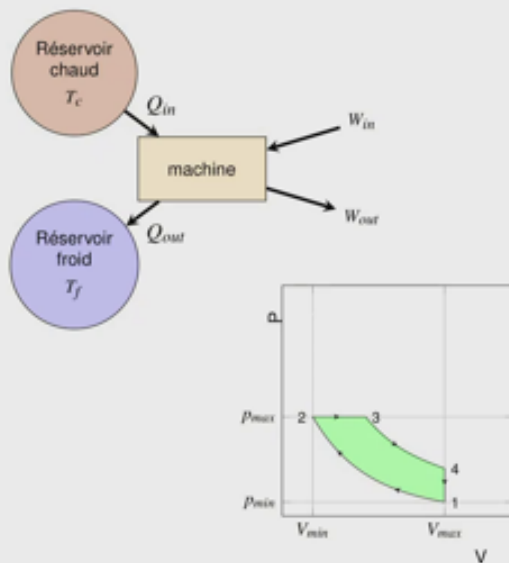
- a)  $\frac{|W_{out}|}{W_{in}}$
- b)  $\frac{|W_{out}|}{Q_{in} - |Q_{out}|}$
- c)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in} - |Q_{out}|}$
- d)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in}}$

a la température qui vaut 0 entre les deux, et puis on a le volume qui diminue et on a la pression qui augmente. Quand on est en deux, on effectue une transformation isocore. Alors elle est un petit peu particulière, parce que c'est une transformation isocore, mais le gaz est déplacé. Il est déplacé du piston chaud au piston...

notes

résumé

### 3.8.10 Rendement d'un moteur



Si le rendement est défini comme le rapport de l'utilité sur le coût, quelle expression choisiriez pour définir le **rendement d'un moteur** ?

a)  $\frac{|W_{out}|}{W_{in}}$

b)  $\frac{|W_{out}|}{Q_{in} - |Q_{out}|}$

c)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in} - |Q_{out}|}$

d)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in}}$

✓

=

Non, pardon, il est déplacé du piston froid au piston chaud. Dans le deux, vous voyez que le gaz est dans le piston froid. Dans ce schéma, le bleu veut dire froid et le rouge veut dire chaud. Et puis en trois, la même quantité, le même volume de gaz, aussi la même quantité de volume de gaz, se retrouve dans la partie chaude. Personnellement là, il va recevoir de l'énergie de la partie chaude et il va augmenter son volume. Mais au début, il est juste transvasé de l'un à l'autre. Donc dans cette opération, on va avoir quand même la température qui va augmenter

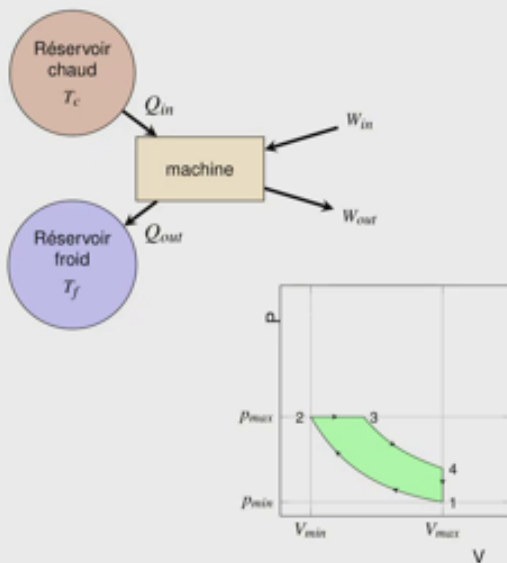
notes

résumé

22m 39s



### 3.8.10 Rendement d'un moteur



Si le rendement est défini comme le rapport de l'utilité sur le coût, quelle expression choisiriez pour définir le **rendement d'un moteur** ?

a)  $\frac{|W_{out}|}{W_{in}}$

b)  $\frac{|W_{out}|}{Q_{in} - |Q_{out}|}$

c)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in} - |Q_{out}|}$

d)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in}}$

eta

Wolie

et puis on va avoir le volume qui va rester constant. Puis après, de trois à quatre, on se retrouve. Donc on a passé de un à un, deux, de deux à trois. Et maintenant, on peut passer de trois à quatre. On est en train de suivre une isotherme. Donc quand on suit une isotherme, la température est toujours la même. Donc il veut dire que ce qui va changer, c'est qu'il y a du travail qui va être reçu ou donné à l'extérieur. Et puis comme ça, on peut effectuer notre cycle. Ça, c'est le moteur de Stirling. Donc, un moteur de Carnot, à Diabatique et Isotherme, moteur de Stirling, Isotherme et Isocore. Donc on peut refaire la même réflexion qu'avant. Qu'en est-il à les différentes étapes ? Dans l'étape isotherme, c'est une expansion. La cause, c'est la source chaude qui provoque ça. Puis après, on peut suivre les différentes variables d'état, ce qui leur arrive. Dans l'étape isocore, qui est un refroidissement, on parle d'un regenerativeur. Donc la partie où ça se passe, on peut l'appeler regenerativeur. Si vous avez envie de vous souvenir de ce mot, mais ce n'est pas essentiel. Et comme avant, on peut suivre les variables d'état et puis les variables de transfert. Les variables d'état, ici on a les variables d'état, puis ça, on a les variables de transfert. Donc Q et W, et delta U, delta T, delta V. Puis on peut suivre comme ça les différentes étapes et comprendre ce qui est la cause du mouvement. Parfois, c'est la source chaude, parfois, c'est la source froide, et parfois, c'est le regenerativeur qui est la cause du mouvement du piston. Un petit résumé, j'aurais pu le faire aussi sur Carnot. Donc si on parle du rendement, il y a le Thor

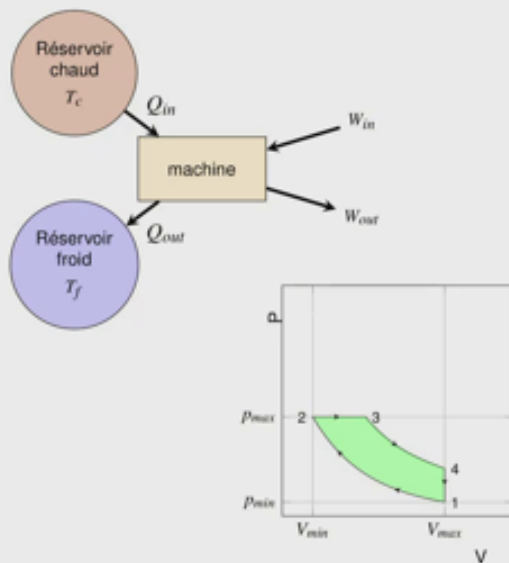
notes

résumé

23m 18s



### 3.8.10 Rendement d'un moteur



Si le rendement est défini comme le rapport de l'utilité sur le coût, quelle expression choisiriez pour définir le **rendement d'un moteur** ?

a)  $\frac{|W_{out}|}{W_{in}}$

b)  $\frac{|W_{out}|}{Q_{in} - |Q_{out}|}$

c)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in} - |Q_{out}|}$

d)  $\frac{|W_{out}| - W_{in}}{Q_{in}}$

eta

Wolie

M de Carnot, mais en fait, le moteur de Stirling est vraiment très proche au niveau du rendement. On pourrait aussi l'exprimer. Je ne sais pas si on avait parlé derrière. Je n'ai d'autre doute sur certains de mes slides. Un moteur thermique, bien sûr, ce qui est intéressant, c'est de savoir combien ça me coûte de le faire fonctionner. Si je dois choisir entre un type de moteur ou un autre,

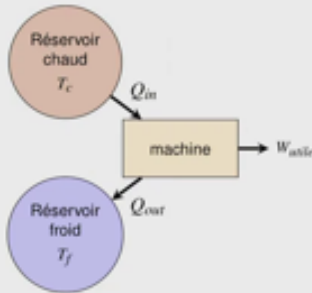
notes

résumé

### 3.8.11 Définition générale du rendement $\eta$

Le rendement d'un processus est défini comme

$$\eta = \frac{\text{bénéfice}}{\text{coût}} \quad (3.50)$$



Donc pour une **moteur thermique**

$$\eta = \frac{W_{\text{utile}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{|W_{\text{out}}| - W_{\text{in}}}{Q_{\text{in}}} \quad (3.51)$$

et en terme de puissance :  $\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{th}}}$

Le 1<sup>er</sup> principe statue que

$$Q_{\text{in}} = W_{\text{utile}} + |Q_{\text{out}}|$$

$$\text{donc } W_{\text{utile}} = Q_{\text{in}} - |Q_{\text{out}}|$$

ce qui donne finalement

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{\text{out}}|}{Q_{\text{in}}} \quad (3.52)$$

je veux savoir au fond quelles vont être les coûts. Et les coûts, vous pouvez réfléchir un petit peu. Qu'est-ce qui serait intéressant de calculer ? J'ai parlé du chemin moteur. Vous êtes capables de voir ce chemin où j'ai un système mécanique. J'appelle la machine, un réservoir chaud, un réservoir froid. Et puis, j'ai le travail que j'amène depuis l'extérieur. À mon donner, c'est souvent l'inertie de la bielle ou quelque chose comme ça qui amène un travail de l'extérieur. Et puis, ce qui m'intéresse, c'est le travail que je vais exporter parce que je veux faire quelque chose. Je veux pomper de l'eau, je veux faire avancer ma locomotive à vapeur. Là, vous avez trois possibilités. Qu'est-ce que vous pensez qui est le plus rationnel pour savoir ce que ça va me coûter ? Alors, est-ce que vous trouvez que ça vaut la peine ? Donc, les valeurs absolues, c'est pour éviter les valeurs négatives, parce que le travail qui sort, il est négatif, donc on a mis les valeurs absolues du temps que ces fractions, elles sont toujours positives. On n'avait pas des problèmes de signes. Mais qu'est-ce qui est intéressant pour savoir si mon moteur vaut quelque chose ? Est-ce que c'est de comparer le travail que je peux exporter par rapport au travail que je dois importer ? Où est-ce que c'est de faire le rapport entre le travail que je vais exporter divisé par la chaleur que j'ai utilisée ? C'est la différence entre  $Q_{\text{in}}$ , c'est la chaleur que j'ai emmenée, que j'ai extrait de la source chaude,  $Q_{\text{out}}$ , c'est la chaleur que j'ai exportée à la source froide. Ou bien, ce serait la différence entre le travail produit, donc on pourrait dire le travail brut, on appelle ça des fois le

notes

résumé

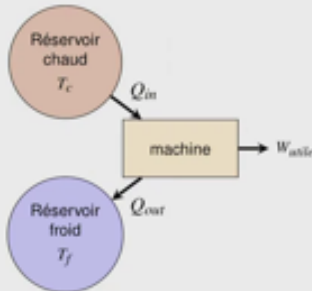
26m 10s



### 3.8.11 Définition générale du rendement $\eta$

Le rendement d'un processus est défini comme

$$\eta = \frac{\text{bénéfice}}{\text{coût}} \quad (3.50)$$



Donc pour une **moteur thermique**

$$\eta = \frac{W_{\text{utile}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{|W_{\text{out}}| - W_{\text{in}}}{Q_{\text{in}}} \quad (3.51)$$

et en terme de puissance :  $\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{th}}}$

Le 1<sup>er</sup> principe statue que

$$Q_{\text{in}} = W_{\text{utile}} + |Q_{\text{out}}|$$

$$\text{donc } W_{\text{utile}} = Q_{\text{in}} - |Q_{\text{out}}|$$

ce qui donne finalement

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{\text{out}}|}{Q_{\text{in}}} \quad (3.52)$$

travail utile. C'est ce que j'ai exporté moins ce que j'ai dû ré-importer. Ou bien, ce serait le dé, le rapport entre le travail que j'ai exporté moins le travail que j'ai importé, tout ça, valeurs absolues, pour que ce soit vraiment une différence en déquantité, divisé par  $Q_{\text{in}}$ . Malin comme vous êtes. Vous avez tout de suite deviné que la bonne réponse, c'était celle-là, ça veut dire c'est clair que je dois faire la différence entre le travail, ce que je veux c'est le travail utile. Ça m'est égal de fournir plein de travail à l'extérieur si je dois en ré-importer une grande partie parce que je dois comprimer le ressort, je dois comprimer le cylindre à un moment. Ce qui est important, c'est d'avoir la différence entre les deux travaux. Des fois, on appelle cette différence là, vous la trouvez dans certains slides, écrit comme double V utile. Et puis, pourquoi est-ce que je divise par  $Q_{\text{in}}$ , parce qu'en fait c'est ce qui me coûte. La source froide en général, c'est l'environnement. Donc ça me coûte rien. Alors, je sais pas si vous avez suivi les discussions à propos du Léman et des centrales nucléaires françaises ces dernières semaines dans les nouvelles, où les Français disent

notes

résumé



### 3.8.12 Inégalité de Clausius et rendement maximal

On part du résultat expérimental suivant :  $\frac{Q_{in}}{T_{in}} + \frac{Q_{out}}{T_{out}} \leq 0$

En le manipulant, on obtient l'inégalité suivante :  $\frac{T_{out}}{T_{in}} \leq \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}}$

Dans un cycle, les états finaux sont identiques aux états initiaux

Donc  $\Delta U = W_{cycle} + Q_{cycle} = Q_{in,cycle} + Q_{out,cycle} + W_{util} = 0$

On peut alors borner le rendement :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} \leq 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (3.53)$$

oui, le lac on aimerait quand même bien utiliser l'eau du rône pour refroidir nos centrales nucléaires, ils le disent pas exactement comme ça, mais on se rend bien compte que c'est ça. Donc c'est vrai que, quand je dis ça coûte rien, c'est peut-être une approximation. Mais quand on a décidé de faire ces calculs, on estime que la chaleur qu'on laisse aller dans la nature, elle coûte rien. Si vous regardez les centrales nucléaires en Suisse, en tout cas celle de Gözgen, si je me trompe pas, ils ont ces grosses cheminées de refroidissement qui sont devenues le symbole des centrales nucléaires, alors qu'au fond c'est pas là qui se passe la réaction nucléaire, c'est parce qu'en fait ils doivent refroidir l'eau avant de pouvoir faire un échange, genre ils ne laissent pas aller leur eau radioactive dans l'art, mais ils évacuent une partie de la chaleur dans la rivière, mais ils ne peuvent pas en éliminer tant que ça dans la rivière, ils doivent en éliminer une partie dans l'air avant pour être dans la loi, parce que les poissons n'aiment pas tellement des chaleurs trop importantes, et puis le poisson bouillie, c'est quand même pas aussi bon que le poisson frit, donc je pense que les gens n'avaient pas forcément vieille et radioactive. Vous pouvez me comprendre. Donc le bon calcul du rendement d'une machine, c'est le travail utile que vous avez produit. Là il y a une différence, donc ce que vous exportez moins, ce que vous devez éventuellement réimporter, vous pouvez toujours réimporter une petite partie, et puis par contre, en général, toujours divisé par la chaleur que vous avez importée depuis la source chaude. En fait on néglige le fait qu'on doit réexporter obligatoirement quelque chose à la source froide. Ça c'est la

notes

résumé

29m 28s





### 3.8.12 Inégalité de Clausius et rendement maximal

On part du résultat expérimental suivant :  $\frac{Q_{in}}{T_{in}} + \frac{Q_{out}}{T_{out}} \leq 0$

En le manipulant, on obtient l'inégalité suivante :  $\frac{T_{out}}{T_{in}} \leq \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}}$

Dans un cycle, les états finaux sont identiques aux états initiaux

Donc  $\Delta U = W_{cycle} + Q_{cycle} = Q_{in,cycle} + Q_{out,cycle} + W_{util} = 0$

On peut alors borner le rendement :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} \leq 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (3.53)$$

bonne définition du rendement. Et en général le rendement, on aime bien lui donner la lettre ETA. Voilà, ça c'est j'essaye d'écrire. ETA. Égal. C'est la lettre ETA. Ok, donc là vous l'avez définie, vous voyez qu'on écrit bien la lettre à quoi elle ressemble, et puis on décide donc que c'est double-v utile divisé par QIN. Et puis c'est une manière, on va dire, économique de parler du rendement. C'est clair que ce type de rendement, elle est liée à l'économie. Alors il y a l'économie énergétique, puis après derrière il y aura l'économie, et ce que vous faites ça avec du charbon, du pétrole, l'énergie solaire, etc. Il y a aussi ces aspects de l'économie. On peut en parler en termes de puissance. Ça veut dire si on divise, ça n'a pas par le temps que vous utilisez votre machine, mais par seconde. Vous utilisez le double-v utile et le QIN par le temps, par exemple du cycle, et puis vous avez la puissance utile sur la puissance thermique que vous avez de la source chaude. Vous vous extrayez de la source chaude. On peut un petit peu jouer, parce que ce qu'on sait, c'est que la chaleur qui est entrée dans le système doit être égale à la partie qui a été utile, c'est-à-dire la partie qui a été exportée, on a rajouté la partie qu'on a dû réimporter, c'est le bilan du travail. Plus, on a mis les valeurs absolues pour être juste dans les signes, plus la partie de la chaleur exportée vers la source froide. Donc ça, c'est le premier principe. Donc ça veut dire qu'on peut écrire que votre puissance utile c'est la même chose que votre chaleur en entrée moins votre chaleur en sortie, de nouveau, le valeur absolue, parce que la

notes

résumé

### 3.8.12 Inégalité de Clausius et rendement maximal

On part du résultat expérimental suivant :  $\frac{Q_{in}}{T_{in}} + \frac{Q_{out}}{T_{out}} \leq 0$

En le manipulant, on obtient l'inégalité suivante :  $\frac{T_{out}}{T_{in}} \leq \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}}$

Dans un cycle, les états finaux sont identiques aux états initiaux

Donc  $\Delta U = W_{cycle} + Q_{cycle} = Q_{in,cycle} + Q_{out,cycle} + W_{util} = 0$

On peut alors borner le rendement :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} \leq 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (3.53)$$

chaleur en sortie, elle est négative, on voulait juste être sûr qu'on parlait correctement avec des quantités qui sont toutes positives. Donc ça veut dire qu'on peut définir notre rendement maintenant, simplement par regardant le travail mais en regardant ce qui se passe au niveau de la chaleur, des échanges de chaleur, notre rendement c'est égal à 1 moins, on a intégré la partie de l'équation W utile égale que Q in moins Q out. On a intégré 1 et puis il reste Q out sur W. Donc c'est aussi intéressant de se rendre compte que si vous n'arrivez pas c'est conforme à ce qu'on a expliqué qu'il y a des choses qui sont impossibles. On ne peut pas faire juste du travail à partir de la chaleur. On doit obligatoirement et vous voyez que plus Q out sera petit plus vous allez avoir un rendement qui est important mais vous ne pouvez pas avoir de la tente chaleur que ça. Vous n'avez pas une source à 0 Kelvin si vous avez une source à 0 Kelvin ce serait absolument intéressant. Vous arriverez

notes

résumé

### 3.8.12 Inégalité de Clausius et rendement maximal

On part du résultat expérimental suivant :  $\frac{Q_{in}}{T_{in}} + \frac{Q_{out}}{T_{out}} \leq 0$

En le manipulant, on obtient l'inégalité suivante :  $\frac{T_{out}}{T_{in}} \leq \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}}$

Dans un cycle, les états finaux sont identiques aux états initiaux

Donc  $\Delta U = W_{cycle} + Q_{cycle} = Q_{in,cycle} + Q_{out,cycle} + W_{util} = 0$

On peut alors borner le rendement :

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_a}$$

$$\eta = \frac{|W|}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} \leq 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (3.53)$$

à faire un moteur d'une efficacité redoutable ce qui n'est pas le cas. Encore, juste une petite étape. Si on va

notes

résumé

35m 7s





voir si on fait des expériences et ce qui s'est passé au XIXe siècle

notes

résumé

35m 22s



$$1 - \frac{270}{400} \approx 0.33$$

on s'est rendu compte expérimentalement qu'on avait toujours une inégalité c'est que si on faisait on prenait la chaleur qui rentrait dans le système et puis divisé par la température à laquelle cet échange de chaleur avait lieu, donc la température se chauffe, t'est in et puis qu'on enlevait parce que le Qout va être négatif donc ce plus Qout, c'est aussi comme moins Qout, valeur absolue divisé par t'est in là on avait une quantité qui était inférieure à 0 ah oui c'est normal c'est que ça lié au travail qui va être récupéré. En tout cas là derrière il y a désolé, je leur dis encore une fois, c'est ce chapitre que je ne vais pas vous présenter, là il y a tout l'enjeu de l'entropie c'est à cause du deuxième principe de la thermodynamique mais surtout là ce slide, ça vient des résultats expérimentales, on a vu que chaque fois qu'on avait des machines et qu'on les analysait on pouvait observer cette inégalité

## notes

## résumé

35m 27s



### 3.8.12 Inégalité de Clausius et rendement maximal

On part du résultat expérimental suivant :  $\frac{Q_{in}}{T_{in}} + \frac{Q_{out}}{T_{out}} \leq 0$

En le manipulant, on obtient l'inégalité suivante :  $\frac{T_{out}}{T_{in}} \leq \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}}$

Dans un cycle, les états finaux sont identiques aux états initiaux

Donc  $\Delta U = W_{cycle} + Q_{cycle} = Q_{in,cycle} + Q_{out,cycle} + W_{util} = 0$

On peut alors borner le rendement :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} \leq 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (3.53)$$

*Handwritten notes:  $\eta = 1 - \frac{T_f}{T_a}$  and green arrows pointing from the equation to the text.*

donc on peut manipuler cette inéquation il faut faire attention avec le signe des choses  
on peut manipuler des inéquations c'est pour ça qu'il y a une valeur absolue

notes

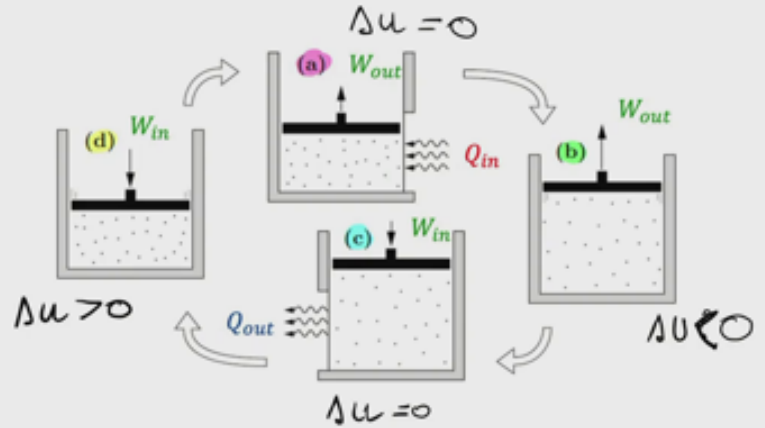
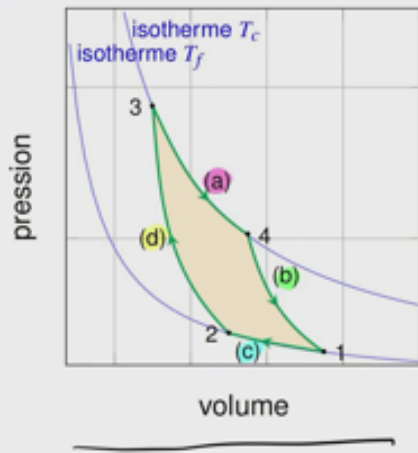
résumé

36m 34s



### 3.8.13 Le cycle de Carnot réalise l'efficacité maximale théorique

**Théorème de Carnot:** Aucun moteur fonctionnant entre deux réservoirs de chaleur ne peut être plus efficace qu'un moteur Carnot fonctionnant entre ces mêmes réservoirs.



qui apparaît mais ça veut dire qu'on peut exprimer que on peut mettre les températures d'un côté et les flux de chaleur de l'autre côté on a mis les valeurs absolues de manière à ce que toutes les quantités dont on parle sont des quantités positives

notes

résumé

36m 49s



### 3.8.15 Cycle de Carnot : Synthèse des 4 étapes

Étape	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
1. Isotherme à $T_H$ (expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
2. Adiabatique (détente)	Inertie interne	$= 0$	$< 0$	$< 0$	$\downarrow$	$\uparrow$
3. Isotherme à $T_C$ (compression)	Force externe	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
4. Adiabatique (compression)	Force externe	$= 0$	$> 0$	$> 0$	$\uparrow$	$\downarrow$

et là on arrive à montrer que  $T_C$  est divisé par  $T_H$  donc c'est à dire la température de la source froide qui est divisé par la température de la source chaude en Kelvin on parle en Kelvin, on parle pas en degrés celsius, autrement

notes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

résumé

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

37m 6s





### 3.8.18 Cycle de Stirling : Synthèse des 4 étapes

Froid  
Chaud

Étape	Cause	$Q$	$W$	$\Delta U$	$\Delta T$	$\Delta V$
1. Isotherme à $T_H$ (expansion)	Source chaude	$> 0$	$< 0$	$= 0$	Const.	$\uparrow$
2. Isochore (refroidissement)	Régénérateur	$< 0$	$= 0$	$< 0$	$\downarrow$	Const.
3. Isotherme à $T_C$ (compression)	Source froide	$< 0$	$> 0$	$= 0$	Const.	$\downarrow$
4. Isochore (réchauffement)	Régénérateur	$> 0$	$= 0$	$> 0$	$\uparrow$	Const.

les choses sont fausses et même de température négative je sais pas quoi c'est impossible

notes

résumé

37m 23s



### 3.8.19 Cycle de Stirling : résumé

Caractéristique	Description
<b>Rendement idéal</b>	Même que Carnot : $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$ (si réversible)
<b>Source de chaleur</b>	Externe (combustion, solaire, géothermie, etc.)
<b>Applications typiques</b>	Générateurs solaires, spatial, sous-marins, cogénération
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Haute efficacité théorique</li> <li>✓ Silencieux (pas de combustion interne)</li> <li>✓ Polyvalence énergétique</li> <li>• <u>Peu de pièces mobiles</u> → <u>grande fiabilité</u></li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Régénérateur difficile à optimiser</u></li> <li>• <u>Puissance spécifique faible</u></li> <li>• <u>Rendement réel limité par les pertes</u></li> </ul>

cette quantité là elle est plus petite ou égale que le rapport entre Q out valeur absolue divisé par Q in après on va sur les cycles que la variation d'énergie dans le cycle est égale à zéro donc ça veut dire W du cycle plus Q du cycle est égale à Q in du cycle plus Q out du cycle plus W est égale à zéro et puis ça va permettre de remplacer certaines des valeurs dans notre équation du rendement et ce qui est important c'est d'arriver à ça il y a deux étapes au début je vous ai défini le rendement entre ce qui était utile que vous avez produit divisé parce que ça vous coûtait ensuite on a introduit ce qu'on comprenait de la thermodynamique pour parler que des chaleurs échangées on parlait plus du travail c'est chose qu'on contrôle on contrôle pas forcément toujours le travail ce qui va toujours facile à vérifier par contre les chaleurs qui sont échangées, ce que vous avez mis comme charbon ce que vous avez mis comme pétrole puis la température et la quantité qui a été mis c'est un peu plus facile à calculer donc là c'était la première étape puis on a changé la définition on a une autre manière de calculer le rendement à partir des chaleurs au lieu d'avoir besoin de le calcul à partir du travail dans la deuxième partie ce qu'on fait c'est que on utilise l'inégalité qu'on vient de définir dans la première partie du slide pour non plus parler des chaleurs mais parler des températures et donc vous voyez quelque chose qui est un un élément un clé, une nouvelle pierre angulaire de cette théorie de la thermodynamique que le rendement est obligatoirement inférieur à un moins le rapport des températures

#### notes

#### résumé

37m 27s



### 3.8.19 Cycle de Stirling : résumé

Caractéristique	Description
<b>Rendement idéal</b>	Même que Carnot : $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$ (si réversible)
<b>Source de chaleur</b>	Externe (combustion, solaire, géothermie, etc.)
<b>Applications typiques</b>	Générateurs solaires, spatial, sous-marins, cogénération
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Haute efficacité théorique</li> <li>✓ Silencieux (pas de combustion interne)</li> <li>✓ Polyvalence énergétique</li> <li>• <u>Peu de pièces mobiles</u> → <u>grande fiabilité</u></li> </ul>
<b><u>Inconvénients</u></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Régénérateur difficile à optimiser</u></li> <li>• <u>Puissance spécifique faible</u></li> <li>• <u>Rendement réel limité par les pertes</u></li> </ul>

température froide divisé par la température chaude un  $T_{out}$  c'est la température froide et  $T_{in}$  c'est la température chaude donc ça veut dire que vous avez une relation directe entre les températures qu'on peut utiliser dans le système avant qu'il fonde ou qu'il explose ou que ce soit pas possible donc la technologie va avoir un impact important ici et ça veut dire que le rendement peut pas être plus haut que ça donc quand vous êtes avec ou encore vous êtes aussi limité dans les rendements parce que peut monter en température de la vapeur mais on peut pas non plus aller dans des températures incroyables et puis dans les températures froides vous pouvez éventuellement avoir de l'eau à 0 degrés mais vous pouvez pas utiliser de la glace à moins 60 degrés ou de l'azote ça va pas être possible mais vous pouvez vous rendre et c'était donc là dessus sur cette inégalité qui est basée le rendement de Carnot et le rendement de Carnot c'est quand c'est égal mais même quand c'est égal c'est inférieur à 1 déjà si vous écrivez état est égal à 1 moins  $T_{par}$   $T_{c'est}$  déjà inférieur à 1 je peux faire juste avant que ça sonne la pose on peut faire un petit calcul en fait il était déjà là le calcul mais si vous dites 1 moins donc on a mettons  $T_{froide}$  c'est pas  $T_{froide}$  qu'on voit c'est non excusez-moi je vais le faire comme il faut mettons qu'on soit à 0 mettons qu'on mette la température jusqu'à 400 degrés et puis j'ai 1 moins 400 degrés

#### notes

#### résumé

# Moteur à combustion interne

Kelvin vous voyez que ça fait un rendement de 33% vous voyez que les rendements il faut les mériter ça va demander technologiquement de faire un certain nombre de choses pour pouvoir supporter d'avoir des vapeurs et des températures incroyables et de pouvoir éliminer la chaleur qui vous reste dans une source froide voilà je vous laisse aller en pause et puis on continue

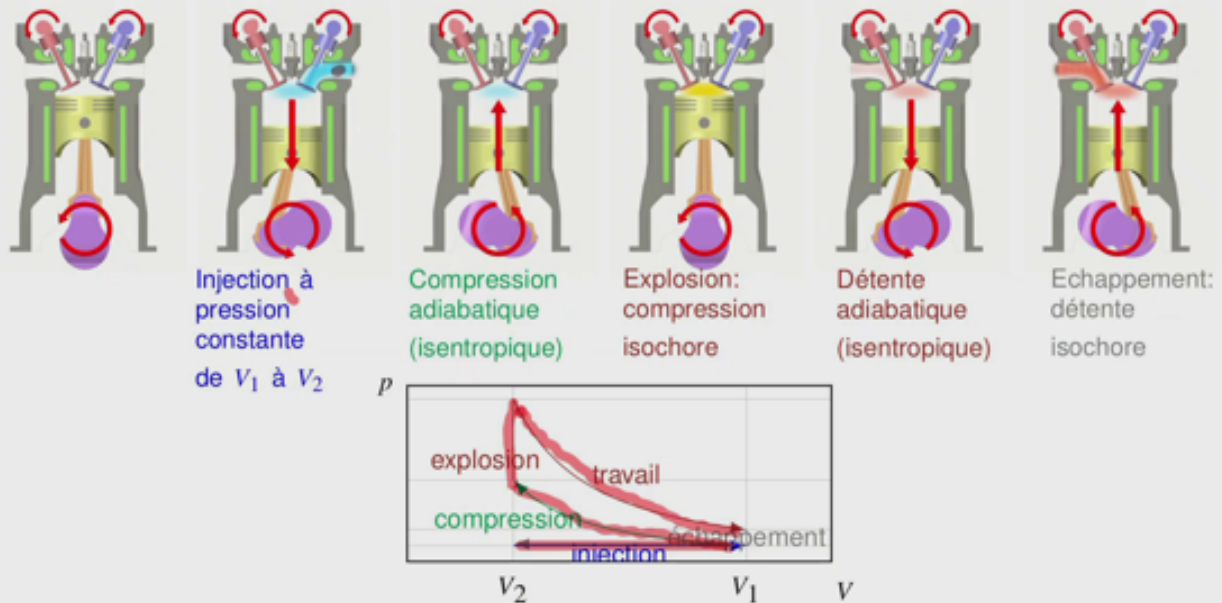
## notes

## résumé

41m 40s



### 3.8.20 Cycle d'Otto (moteur à essence)



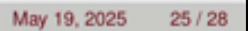
l'explication après donc maintenant je vous ai expliqué ce qu'est un rendement comment on peut le calculer puis par quoi il est limité et donc le théorème de Carnot ou si c'est pas le théorème ou tout la théorie de Carnot c'est clair que le moteur de Carnot idéal il fonctionne avec un rendement qui est égal à un moins le rapport des températures et on peut pas avoir mieux que ça fait on peut même pas l'avoir mais on peut s'approcher c'est un moteur de Carnot idéal mais les moteurs ne sont jamais idéaux donc ça c'était pour expliquer ça et au moment où je m'étais rendu compte que ça marche que vous manquez quelque chose c'est parce que j'étais en train de vous parler dans le moteur de Stirling du rendement donc le moteur de Stirling il est quasiment aussi idéal que le moteur de Carnot mais en général la référence c'est le moteur de Carnot mais en fait il est au même type de rendement il est aussi très pratique le moteur il est intéressant dans ce qu'on vit sur Terre ces temps parce qu'on a des sources de chaleur des pertes de chaleur et ça permet très de récupérer parfois à partir de différences de chaleur dans l'industrie etc ça permettrait de récupérer une partie d'électricité ou de force liée au désordre de chaleur donc c'est assez intéressant on pourrait aussi utiliser ça pour faire à partir de l'énergie solaire on peut utiliser des cellules solaires qu'utilise un phénomène quantique lorsque le soleil traverse les photons sur un composé semi-conducteur

notes

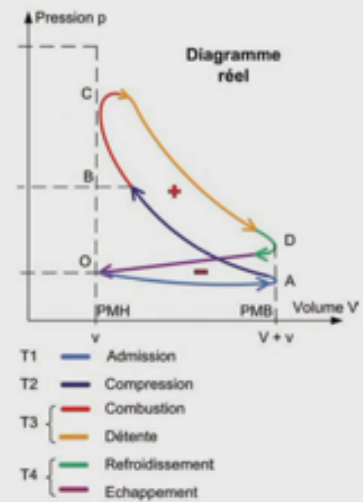
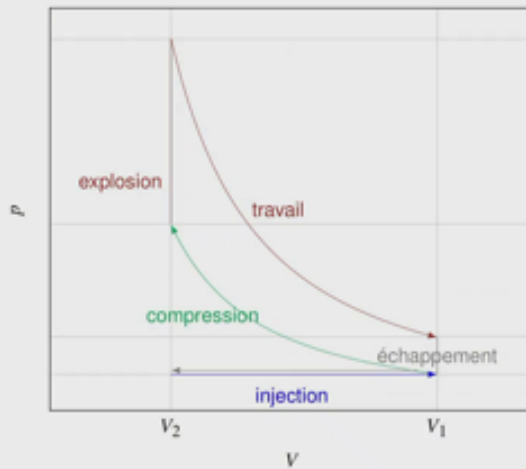
résumé

42m 5s





### 3.8.21 Cycle de Otto réel



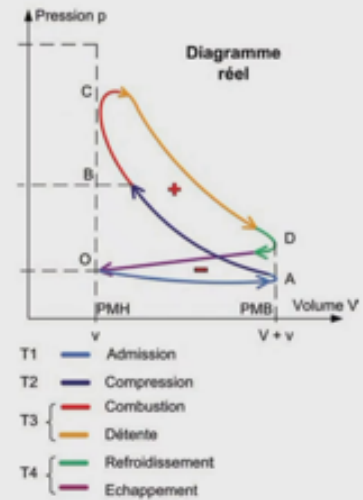
pour des générateurs solaires dans le spatial il est aussi intéressant parce qu'il est

notes

résumé

44m 47s





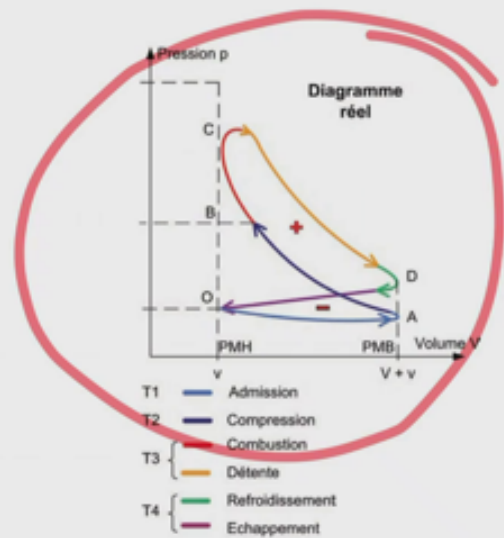
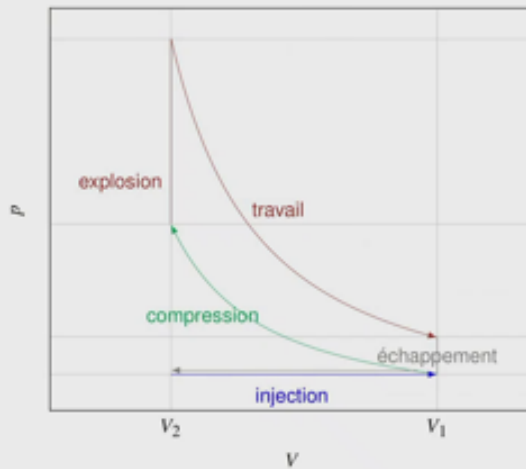
notes

44m 54s





### 3.8.21 Cycle de Otto réel



et puis on a l'intérêt mais ça fait pas beaucoup de bruit contrairement à un moteur explosion donc ça fait des moteurs très silencieux et puis ce qu'on appelle la co-génération c'est un mot qui est derrière la récupération d'énergie

notes

résumé

45m 9s



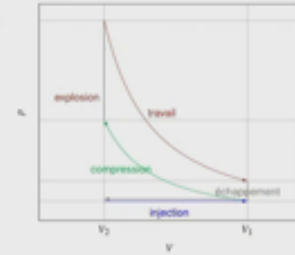
### 3.8.22 Efficacité du cycle de Otto

Pour le cycle d'Otto

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} < 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Pour l'air, on a  $\gamma = \frac{7}{5}$  et si la compression est  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{8}$ , on obtient  $\eta = 0.56\%$  théoriquement.

En réalité, à cause des imperfections,  $\eta$  est **entre 20% et 30%**



Pour augmenter l'efficacité → augmenter le rapport de compression, donc diminuer  $\frac{V_2}{V_1}$

Si le gaz est trop comprimé, risque de auto-allumage (avant l'allumage par la bougie)  
→ dégâts matériel à long terme.

**Solution** : injection de carburant après la compression = **moteur Diesel**

dans des processus industriels où il y a éventuellement pour une assérie on a besoin de très haute température et puis à un moment donné

notes

résumé

45m 28s



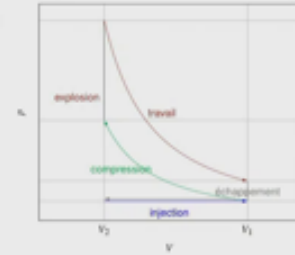
### 3.8.22 Efficacité du cycle de Otto

Pour le cycle d'Otto

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} = 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} < 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Pour l'air, on a  $\gamma = \frac{7}{5}$  et si la compression est  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{8}$ , on obtient  $\eta = 0.56\%$  théoriquement.

En réalité, à cause des imperfections,  $\eta$  est **entre 20% et 30%**



Pour augmenter l'efficacité → augmenter le rapport de compression, donc diminuer  $\frac{V_2}{V_1}$

Si le gaz est trop comprimé, risque de auto-allumage (avant l'allumage par la bougie)  
→ dégâts matériel à long terme.

**Solution** : injection de carburant après la compression = **moteur Diesel**

recupérer de grandes quantités de chaleur ça ça permettrait on peut redistribuer cette chaleur dans des quartiers on peut chauffer des villes, des quartiers des hôpitaux etc mais on pourrait aussi imaginer faire de l'électricité par exemple ou de la force mécanique à partir de cette différence de température ce qui permettrait de pas avoir

notes

résumé

45m 37s



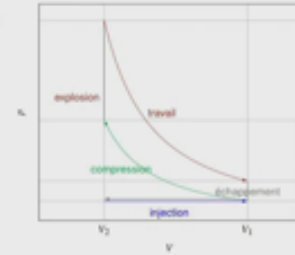
### 3.8.22 Efficacité du cycle de Otto

Pour le cycle d'Otto

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} < 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Pour l'air, on a  $\gamma = \frac{7}{5}$  et si la compression est  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{8}$ , on obtient  $\eta = 0.56\%$  théoriquement.

En réalité, à cause des imperfections,  $\eta$  est **entre 20% et 30%**



Pour augmenter l'efficacité → augmenter le rapport de compression, donc diminuer  $\frac{V_2}{V_1}$

Si le gaz est trop comprimé, risque de auto-allumage (avant l'allumage par la bougie)  
→ dégâts matériel à long terme.

**Solution** : injection de carburant après la compression = **moteur Diesel**

des pertes thermiques si importante que ça on peut récupérer une partie donc il a une haute efficacité je suis en recherche

notes

résumé

46m 1s



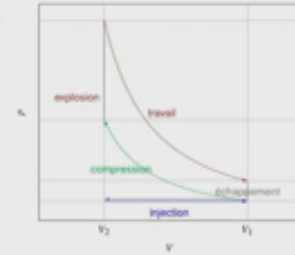
### 3.8.22 Efficacité du cycle de Otto

Pour le cycle d'Otto

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} < 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Pour l'air, on a  $\gamma = \frac{7}{5}$  et si la compression est  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{8}$ , on obtient  $\eta = 0.56\%$  théoriquement.

En réalité, à cause des imperfections,  $\eta$  est entre 20% et 30%



Pour augmenter l'efficacité → augmenter le rapport de compression, donc diminuer  $\frac{V_2}{V_1}$

Si le gaz est trop comprimé, risque de auto-allumage (avant l'allumage par la bougie) → dégâts matériel à long terme.

**Solution :** injection de carburant après la compression = **moteur Diesel**

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique Générale II

May 19, 2025

27 / 28

de mon qu'est-ce que j'ai fait avec mon style il est là donc haute efficacité silencieux polyvalent énergétiquement et puis c'est un système qui a peu de pièces mobiles donc il a une grande fiabilité il peut utiliser par rapport à son potentiel donc il y a des gens qui essaient de promouvoir d'utiliser le moteur de styling c'est vraiment un moteur très intéressant mais il faut pas parler des avantages il faut aussi parler des inconvénients semble-t-il que la partie du régénérateur la partie la source froide n'est pas si facile que ça à optimiser sa puissance spécifique est relativement faible donc ça veut dire aussi une relation par rapport à son poids et puis le rendement réel est limité par des pertes il faudrait l'isoler il y a différents impacts technologiques c'est très bien mais c'est pas non plus la solution forcément à tout autrement ça fait déjà longtemps qu'il en a été généralisé maintenant regardons deux autres types de moteurs qui sont des moteurs qui ont une question interne donc il veut dire qu'il y a une production d'énergie qui va être fait par la consommation l'explosion d'un hydrocarbure et puis ça se passe à l'intérieur du cylindre donc le premier qui a été inventé c'est le cycle d'auto j'ai découvert par hasard aujourd'hui qu'il y avait un autre nom aussi français un nom auto était probablement un allemand et ils ont dû trouver un autre français qui avait aussi découvert ça quelques années après mais je me souviens de Bourg quelque chose comment ça fonctionne vous avez un schéma de clapet en dessous donc suivant plus tôt d'abord au schéma de clapet après on peut vous pouvez voir en fonction des couleurs sur mon schéma de clapet on a également ce que ça produit puis ceux

notes

résumé

46m 13s



### 3.8.22 Efficacité du cycle de Otto

Pour le cycle d'Otto

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} < 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

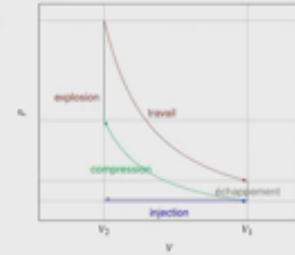
Pour l'air, on a  $\gamma = \frac{7}{5}$  et si la compression est  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{8}$ , on obtient  $\eta = 0.56\%$  théoriquement.

En réalité, à cause des imperfections,  $\eta$  est entre 20% et 30%

Pour augmenter l'efficacité → augmenter le rapport de compression, donc diminuer  $\frac{V_2}{V_1}$

Si le gaz est trop compressé, risque de auto-allumage (avant l'allumage par la bougie) → dégâts matériel à long terme.

**Solution** : injection de carburant après la compression = **moteur Diesel**



qui sont restés la dernière fois on aura fait une démonstration de comment il fonctionnait on appelle ça aussi un moteur à quatre temps donc il y a d'abord je vais vous choisir ça donc on a une injection on va injecter à l'intérieur donc vous avez si je me trompe pas ici que ça vient la vanne doit être ouverte puis on va injecter la vasine à l'intérieur du piston ensuite on va donc le piston va descendre pendant qu'on fait l'injection non il y a plutôt de l'autre côté vous voyez en bleu là c'est vraiment l'entrée du gaz là

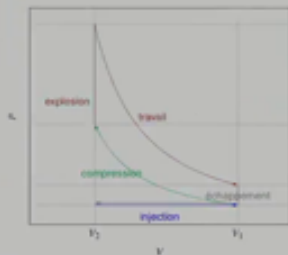
notes

résumé

to

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{8},$$

entre 20%



rapport de compression, donc diminuer  $\frac{V_2}{V_1}$   
 o-allumage (avant l'allumage par la bougie)

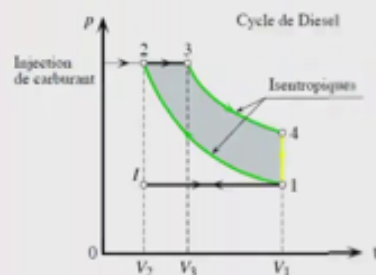
ompression = **moteur Diesel**

générale II

May 19, 2025

27 / 28

### 3.8.23 Cycle de Diesel



1 → 2 ad  
 1 → 2 forte  
 2 → 3 inje  
 3 → 4 déte  
 4 → 1 éva  
 d'éc

- Rapport de compression typique pour m
- Efficacité réelle = environ 40%
- Problèmes environnementaux : gaz noc
- animation: <https://youtu.be/fTAU>

Jean-Marie Fürbringer - EPFL

Physique 4

donc ce que j'ai écrit là

notes

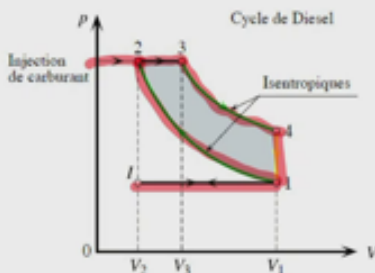
résumé

49m 12s





### 3.8.23 Cycle de Diesel



- 1 → 1 admission de l'air (soupape admission ouverte)
- 1 → 2 forte compression adiabatique (soupapes fermées)
- 2 → 3 injection du carburant et combustion → **travail**
- 3 → 4 détente adiabatique → **travail**
- 4 → 1 évacuation des gaz de combustion (soupape d'échappement ouverte)

- Rapport de compression typique pour moteur Diesel = 20
- Efficacité réelle = environ 40%
- Problèmes environnementaux : gaz nocifs (CO, NOx, SOx)
- animation: <https://youtu.be/fTAUq6G9apg>

il faut l'oublier vous avez en bleu l'entrée du gaz l'injection le piston descend donc la partie bleue et la partie rouge deviennent hermétiques le piston va remonter on va donc diminuer le volume et augmenter la pression donc on est dans cette zone là et puis après on va avoir aussi un peu par une partie inertie là on a une période qui est isocore comme dans l'autre et là il va y avoir une explosion on va faire repartir dans l'autre sens le on va faire repartir le piston dans l'autre sens le volume va augmenter la pression va diminuer et puis après on va encore par inertie dernier changement isocore on va vider les gaz qui sont à l'intérieur du cylindre donc c'est comme ça que fonctionne votre voiture c'est clair vous avez le moteur, votre moteur plus ou moins c'est un moteur à deux temps des fois il y a différents types de moteurs pour les motos mais c'est comme ça qui fonctionne alors de nouveau comme je vous avais montré pour le cas du moteur de surlink il y a la théorie super donc vous avez une isocore une isocore, tout ça c'est joli c'est parfait, c'est comme ça qu'on fait les calculs théoriques puis après vous avez la réalité qui ressemble des fois à des choses un petit peu différentes technologiquement on n'arrive jamais à faire ces choses parfaitement et donc ça va chaque fois ça va faire des rendements un peu inférieurs par rapport au rendement au rendement théorique donc comme on a une relation adiabatique on peut utiliser pour calculer le rendement une loi qui est basée sur ce qu'on appelle le facteur de compression ça veut dire que l'échange de chaleur peut être remplacé par la variation des volumes et

#### notes

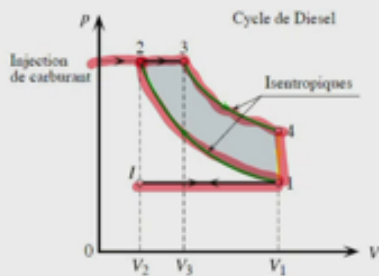
#### résumé

49m 13s





### 3.8.23 Cycle de Diesel



- 1 → 2 admission de l'air (soupape admission ouverte)
- 1 → 2 forte compression adiabatique (soupapes fermées)
- 2 → 3 injection du carburant et combustion → **travail**
- 3 → 4 détente adiabatique → **travail**
- 4 → 1 évacuation des gaz de combustion (soupape d'échappement ouverte)

- Rapport de compression typique pour moteur Diesel = 20
- Efficacité réelle = environ 40%
- Problèmes environnementaux : gaz nocifs (CO, NOx, SOx)
- animation: <https://youtu.be/fTAUq6G9apg>

vous voyez réapparaître ce fameux gamma-1 que le gamma donc c'est le co-efficient adiabatique qui est lié au degré de liberté et puis donc en fonction du gaz qu'on est en train de compresser on va avoir une certaine valeur qui sera là et puis le rendement est inférieur au rendement de Carnot là vous avez pas inférieur ou égal c'est vraiment inférieur au rendement de Carnot par contre il est clair que les températures auxquelles on va éventuellement arriver sont un peu supérieures à celles qu'on ferait avec une vapeur de l'air ou avec de la vapeur donc si on considère un gamma qui est de l'ordre de 7,5 et puis qu'on peut imaginer d'avoir une compression à l'intérieur du cylindre qui est de 1,8 on arrive là à un rendement qui est de l'ordre de 56% qui est quand vous le lisez comme ça il est supérieur au rendement de Carnot pour de l'air ou de la vapeur d'eau comme je l'avais montré avant mais ça reste en tout cas vous voyez que 56% à c'est presque 60% vous perdez quand même plus d'un tiers de votre énergie qui va pas être utilisé qui va partir en chaleur

notes

résumé



## 3.11.22 Résumé de la thermodynamique classique

### Fonctions d'état et gaz parfait

- **Fonctions d'état** : Dépendent uniquement de l'état du système (énergie interne, enthalpie, entropie, température).
- **Gaz parfait** : Modèle idéal où les molécules n'interagissent pas et occupent un volume négligeable. Équation d'état :  $PV = nRT$ .

### Premier et deuxième principe

- **Premier principe** : Conservation de l'énergie,  $\Delta U = Q - W$ .
- **Deuxième principe** : L'entropie d'un système isolé ne peut jamais diminuer,  $\Delta S \geq 0$ .

### Capacité thermique

- Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un degré.
- À volume constant ( $C_V$ ) et à pression constante ( $C_P$ ).

### Chaleur et travail

- **Chaleur** : Énergie transférée due à une différence de température, mesurée en joules (J).
- **Travail** : Énergie transférée lorsqu'une force est appliquée sur une distance,  $W = \int P dV$ .

### Énergie interne et entropie

- **Énergie interne** : Somme de toutes les énergies microscopiques du système.
- **Entropie** : Mesure du désordre ou de la dispersion de l'énergie. Ne peut qu'augmenter ou rester constante dans un système isolé.

où on va injecter on va pour commencer on va injecter de l'air on va injecter de l'air on va compresser jusqu'à un élément et là on va injecter du carburant et c'est ça qui va provoquer l'explosion parce qu'on a aussi des moteurs à explosion il va y avoir d'abord une partie du cycle qui est isobar et puis après on aura une partie qui est adiabatique là ils ont mis le mot isentropique mais c'est la même chose de dire adiabatique et puis après il y a une dernière étape qui est de nouveau l'élimination des gaz qui est une partie isocore et là on arrive à des rendements qui sont un peu supérieurs et puis la réalité de ces moteurs c'est qu'ils doivent être beaucoup plus lourds on a des pressions qui sont plus fortes donc on doit avoir des structures mécaniques qui sont plus robustes c'est pour ça que ça marche bien pour des gros camions des grosses berlines des grosses voitures et c'est moins intéressant pour des voitures plus légères pour des moteurs et des choses comme ça donc c'est pour ça que les moteurs diesel et les chantiers, des camions des bateaux ce genre de choses ou on a beaucoup moins de problèmes l'avantage aussi du bateau c'est que le poids est pas si critique que ça pour le bateau alors que pour les véhicules ou alors pour les avions c'est clair que là le poids est vraiment super critique il y a différents types de problèmes entre les deux donc un problème aussi du moteur diesel c'est qu'il aime des choses qu'on n'aime pas tellement respirer donc du gaz du monoxyde de carbone du CO ce qu'on appelle des NOX et puis des SOX donc des composés à partir de N

### notes

### résumé

55m 19s



## 3.11.22 Résumé de la thermodynamique classique

### Fonctions d'état et gaz parfait

- **Fonctions d'état** : Dépendent uniquement de l'état du système (énergie interne, enthalpie, entropie, température).
- **Gaz parfait** : Modèle idéal où les molécules n'interagissent pas et occupent un volume négligeable. Équation d'état :  $PV = nRT$ .

### Premier et deuxième principe

- **Premier principe** : Conservation de l'énergie,  $\Delta U = Q - W$ .
- **Deuxième principe** : L'entropie d'un système isolé ne peut jamais diminuer,  $\Delta S \geq 0$ .

### Capacité thermique

- Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un degré.
- À volume constant ( $C_V$ ) et à pression constante ( $C_P$ ).

### Chaleur et travail

- **Chaleur** : Énergie transférée due à une différence de température, mesurée en joules (J).
- **Travail** : Énergie transférée lorsqu'une force est appliquée sur une distance,  $W = \int P dV$ .

### Énergie interne et entropie

- **Énergie interne** : Somme de toutes les énergies microscopiques du système.
- **Entropie** : Mesure du désordre ou de la dispersion de l'énergie. Ne peut qu'augmenter ou rester constante dans un système isolé.

d'azote d'azote merci donc des composés à zoter et des composés à partir de soufre et ça c'est pas très bien pour l'environnement à part ça je suis pas un spécialiste du thème mais semble-t-il étrangement par rapport au changement climatique ça fait un petit peu des particules plus avoir du tout de particules dans l'atmosphère ça augmente ça évite une partie de la réflexion des choses des rayons solaires avant qu'ils arrivent sur Terre et donc ça minimise un petit peu l'arrivée des rayons solaires sur la surface de la Terre donc ça améliore un tout petit peu le bilan thermique de la Terre mais ça a d'autres types de problèmes qui sont de l'ordre de la pollution donc après je laisserai les spécialistes se bagarrer sur l'intérêt de l'un ou de l'autre et puis vous avez là un lien YouTube j'ai pas revérifié j'espère qu'il est toujours valable où on vous présente le fonctionnement de ce moteur là j'ai fait un cycle qui les qui les compare cycle d'auto c'est drôle auto parce que c'est ce qu'il y a dans les autos mais Aute et Ateo et puis donc ils fonctionnent avec des hydrocarbures dans le moteur à essence l'essence dans le diesel c'est un autre type d'hydrocarbure un petit peu plus un petit peu plus lourd mais qui est un meilleur marché à produire un fonctionne à volume constant l'autre fonctionne à pression constante dans la compression du moteur auto on a de l'air et du carburant dans le moteur diesel on comprime de l'air et puis c'est au dernier moment qu'on injecte du carburant les veuillez que les taux de compression sont un petit peu différents on a des taux de compression plus petits donc c'est le jeu le chemin du piston va être plus important

### notes

### résumé

## 3.11.22 Résumé de la thermodynamique classique

### Fonctions d'état et gaz parfait

- **Fonctions d'état** : Dépendent uniquement de l'état du système (énergie interne, enthalpie, entropie, température).
- **Gaz parfait** : Modèle idéal où les molécules n'interagissent pas et occupent un volume négligeable. Équation d'état :  $PV = nRT$ .

### Premier et deuxième principe

- **Premier principe** : Conservation de l'énergie,  $\Delta U = Q - W$ .
- **Deuxième principe** : L'entropie d'un système isolé ne peut jamais diminuer,  $\Delta S \geq 0$ .

### Capacité thermique

- Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un degré.
- À volume constant ( $C_V$ ) et à pression constante ( $C_P$ ).

### Chaleur et travail

- **Chaleur** : Énergie transférée due à une différence de température, mesurée en joules (J).
- **Travail** : Énergie transférée lorsqu'une force est appliquée sur une distance,  $W = \int P dV$ .

### Énergie interne et entropie

- **Énergie interne** : Somme de toutes les énergies microscopiques du système.
- **Entropie** : Mesure du désordre ou de la dispersion de l'énergie. Ne peut qu'augmenter ou rester constante dans un système isolé.

on va aussi des cylindres avec des volumes peut-être plus important dans le cadre du diesel les rendements thermiques elle est plus élevée elle est moins élevée elle est 30 ou 40% dont j'ai parlé la consommation c'est un petit peu plus intéressant d'avoir du diesel au niveau de la consommation l'utilisation typique voiture moto pour le moteur auto et puis camion, bus, machine bateau pour le moteur diesel polyonymi il y a plus de particules fines pour le diesel la construction des moteurs les moteurs diesel sont un peu plus coûteux donc en général les vendeurs de voiture quand ils veulent vendre du diesel ça coûte plus cher à l'achat mais après à l'usage vous allez dépenser moins et puis l'entretien et peut-être aussi le diesel c'est quelque chose de plus robuste qui demande un petit peu moins d'entretien c'est pas comparaisant en des deux types de moteurs voilà donc j'arrive à la fin des matières que je voulais vous transmettre là vous avez un résumé que j'ai été récupéré dans la dernière partie que je vous n'ai pas donné donc il y a la partie entropie mais on l'a pas vu dans le cours donc vous sautez à pied joint sur ces éléments là vraiment quelque chose qui est important de comprendre, de manipuler sur lequel vous êtes sûr d'avoir des questions à l'examen c'est vraiment cet aspect de fonction d'état, j'ai beaucoup insisté sur cet aspect là donc c'est vraiment très important de saisir quelles sont les variables qui font partie d'état alors bah l'enthalpie on l'a pas vu la fois il appartient pas à ce cours là l'entropie on l'a non plus pas vu mais on a vu l'énergie interne, on a vu les autres variables du système qui sont des variables d'état on a beaucoup

### notes

### résumé



## 3.11.22 Résumé de la thermodynamique classique

### Fonctions d'état et gaz parfait

- **Fonctions d'état** : Dépendent uniquement de l'état du système (énergie interne, enthalpie, entropie, température).
- **Gaz parfait** : Modèle idéal où les molécules n'interagissent pas et occupent un volume négligeable. Équation d'état :  $PV = nRT$ .

### Premier et deuxième principe

- **Premier principe** : Conservation de l'énergie,  $\Delta U = Q - W$ .
- **Deuxième principe** : L'entropie d'un système isolé ne peut jamais diminuer,  $\Delta S \geq 0$ .

### Capacité thermique

- Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un degré.
- À volume constant ( $C_V$ ) et à pression constante ( $C_P$ ).

### Chaleur et travail

- **Chaleur** : Énergie transférée due à une différence de température, mesurée en joules (J).
- **Travail** : Énergie transférée lorsqu'une force est appliquée sur une distance,  $W = \int P dV$ .

### Énergie interne et entropie

- **Énergie interne** : Somme de toutes les énergies microscopiques du système.
- **Entropie** : Mesure du désordre ou de la dispersion de l'énergie. Ne peut qu'augmenter ou rester constante dans un système isolé.

parlé des gaz parfaits on a tourné autour des gaz parfaits j'ai essayé parfois de généraliser vous avez des exercices on a parlé une fois dans l'IQI des choses comme ça c'est vrai que à l'examen il y aura de façon des gaz mais peut-être on a fait réfléchir à utiliser certains des principes qu'on a vu pour d'autres systèmes que les gaz parfaits ça y est juste attentif quand on parle d'un gaz parfait pour les différentes règles les différentes lois qu'on a vu faites attention aux choses plus génériques en général quand on n'est pas un gaz parfait on utilise surtout les dérivées de fonction d'état et de choses comme ça quand on avait des valeurs très précises souvent c'était plutôt pour les gaz parfaits donc dans votre vision soyez attentif quand les choses sont vraies de manière générale pour tout système thermodynamique et quand elles sont vraies seulement pour un gaz parfait je vais pas vous tenter des pièges là dessus mais ces pièges vont s'ouvrir d'eux-mêmes éventuellement donc soyez un petit peu attentif à ça mais c'est vrai que dès que vous avez un gaz parfait vous avez cette loi PVNRT qui permet de régler toutes les choses et puis on a toute cette théorie qu'on a fait par rapport à la capacité thermique des gaz qui peuvent être utilisés autrement on a vu le premier principe on n'a pas vu le deuxième donc le premier principe il dit que tous les systèmes thermodynamiques ont des échanges de type énergétique qui sont soit sous forme de travail et puis quelque chose que vous pouvez c'est bien si vous ne l'ignorez pas même si il n'y a pas partie de l'examen il n'y aura pas de question là dessus c'est le principe d'entropie c'est ce chapitre qu'il

### notes

### résumé

## 3.11.22 Résumé de la thermodynamique classique

### Fonctions d'état et gaz parfait

- **Fonctions d'état** : Dépendent uniquement de l'état du système (énergie interne, enthalpie, entropie, température).
- **Gaz parfait** : Modèle idéal où les molécules n'interagissent pas et occupent un volume négligeable. Équation d'état :  $PV = nRT$ .

### Premier et deuxième principe

- **Premier principe** : Conservation de l'énergie,  $\Delta U = Q - W$ .
- **Deuxième principe** : L'entropie d'un système isolé ne peut jamais diminuer,  $\Delta S \geq 0$ .

### Capacité thermique

- Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un degré.
- À volume constant ( $C_V$ ) et à pression constante ( $C_P$ ).

### Chaleur et travail

- **Chaleur** : Énergie transférée due à une différence de température, mesurée en joules (J).
- **Travail** : Énergie transférée lorsqu'une force est appliquée sur une distance,  $W = \int P dV$ .

### Énergie interne et entropie

- **Énergie interne** : Somme de toutes les énergies microscopiques du système.
- **Entropie** : Mesure du désordre ou de la dispersion de l'énergie. Ne peut qu'augmenter ou rester constante dans un système isolé.

faut revenir à l'année prochaine si vous voulez vraiment la voir où on va développer une nouvelle fonction qu'on appelle l'entropie une nouvelle fonction d'état qui va permettre de faire un certain nombre de suivi quand on le domine bien simplifie un peu certains des calculs qu'on a dû faire dans les cycles quand on a dû intégrer sur la température le vol de la pression on pourra aussi intégrer sur l'entropie ça permet un certain nombre de choses un petit peu plus simples et puis surtout ça permet de comprendre comment les systèmes évoluent à ce propos quand même je ne résiste pas au plaisir de vous présenter un des systèmes essayer de vous donner un petit goût de parfum des systèmes pourquoi quelle serait la suite d'un cours de thermodynamie qu'est ce qui nous manque encore c'est comprendre comment des systèmes arrivent à l'équilibre pourquoi c'est toujours la même chose finalement pourquoi est-ce qu'un tas de sables va simplement s'écraser et pas se remonter pourquoi la bière est-ce que le temps est toujours se réchauffe, pourquoi le thé se refroidit dans la tasse etc donc vous avez une petite explication dans ce qu'est présenté là ce se s'appelle une table de galton en fait c'est des petits grains qui vont tomber sur un lit de clous et puis à chaque fois les choses se font au hasard et puis ça peut être soit à gauche soit à droite donc un petit grain va va être projeté néanmoins quand on va faire ça donc je ne sais plus comment je dois appuyer, je dois retirer ça même si chacun chacune des petites actions est aléatoire et au fond il y a la même probabilité d'aller à gauche que d'aller à droite le fait qu'il y a toute une série

### notes

### résumé

## 3.11.22 Résumé de la thermodynamique classique

### Fonctions d'état et gaz parfait

- **Fonctions d'état** : Dépendent uniquement de l'état du système (énergie interne, enthalpie, entropie, température).
- **Gaz parfait** : Modèle idéal où les molécules n'interagissent pas et occupent un volume négligeable. Équation d'état :  $PV = nRT$ .

### Premier et deuxième principe

- **Premier principe** : Conservation de l'énergie,  $\Delta U = Q - W$ .
- **Deuxième principe** : L'entropie d'un système isolé ne peut jamais diminuer,  $\Delta S \geq 0$ .

### Capacité thermique

- Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un degré.
- À volume constant ( $C_V$ ) et à pression constante ( $C_P$ ).

### Chaleur et travail

- **Chaleur** : Énergie transférée due à une différence de température, mesurée en joules (J).
- **Travail** : Énergie transférée lorsqu'une force est appliquée sur une distance,  $W = \int P dV$ .

### Énergie interne et entropie

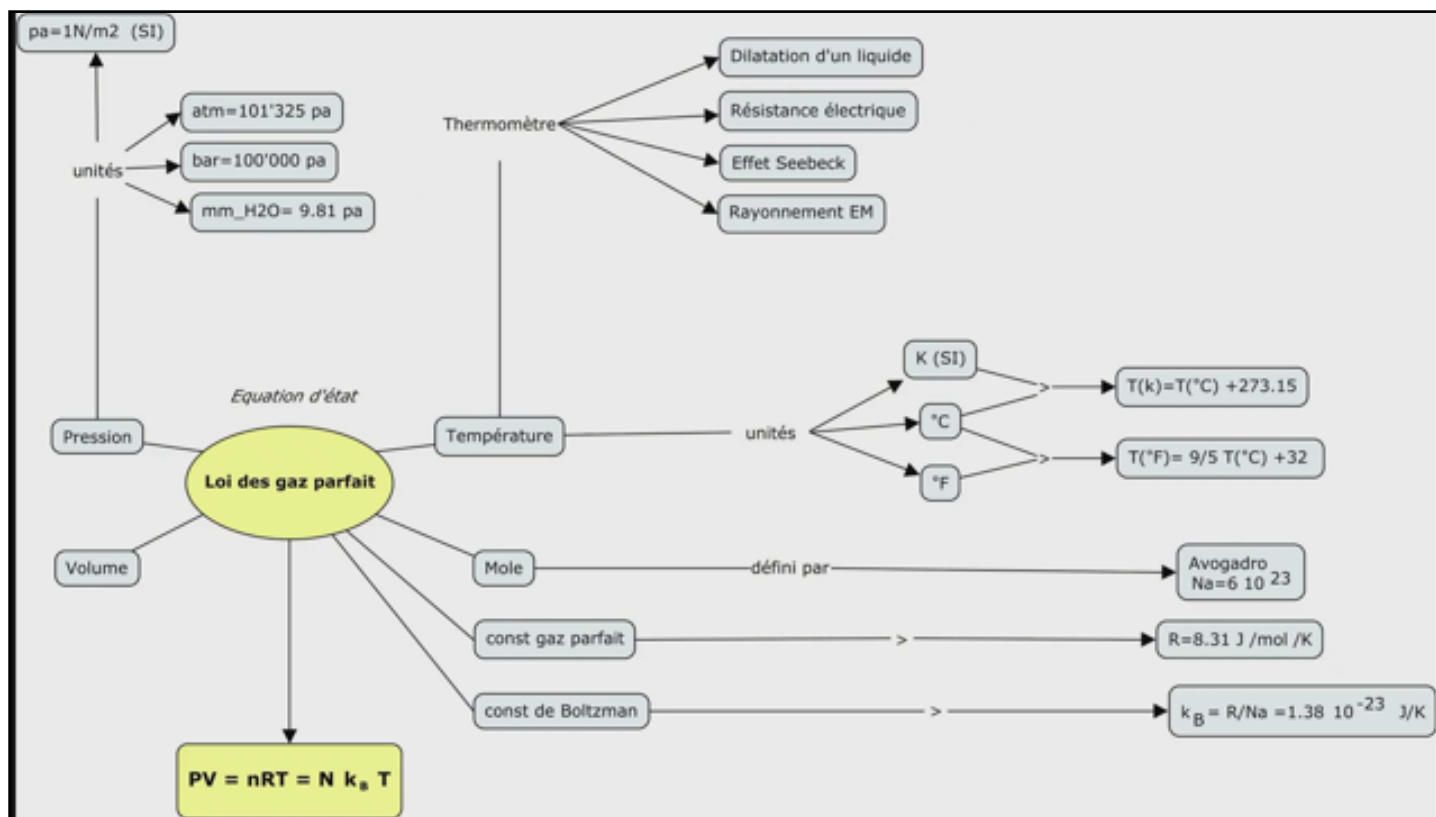
- **Énergie interne** : Somme de toutes les énergies microscopiques du système.
- **Entropie** : Mesure du désordre ou de la dispersion de l'énergie. Ne peut qu'augmenter ou rester constante dans un système isolé.

et que en moyenne je vais tant entendre à gauche en moyenne je vais tant entendre à droite et bien en fait la plus grande probabilité c'est de se retrouver au milieu puis là vous avez une distribution normale c'est aussi lié à quelque chose, vous avez vu des transstatistiques théorème qui dit qu'au fond

notes

résumé





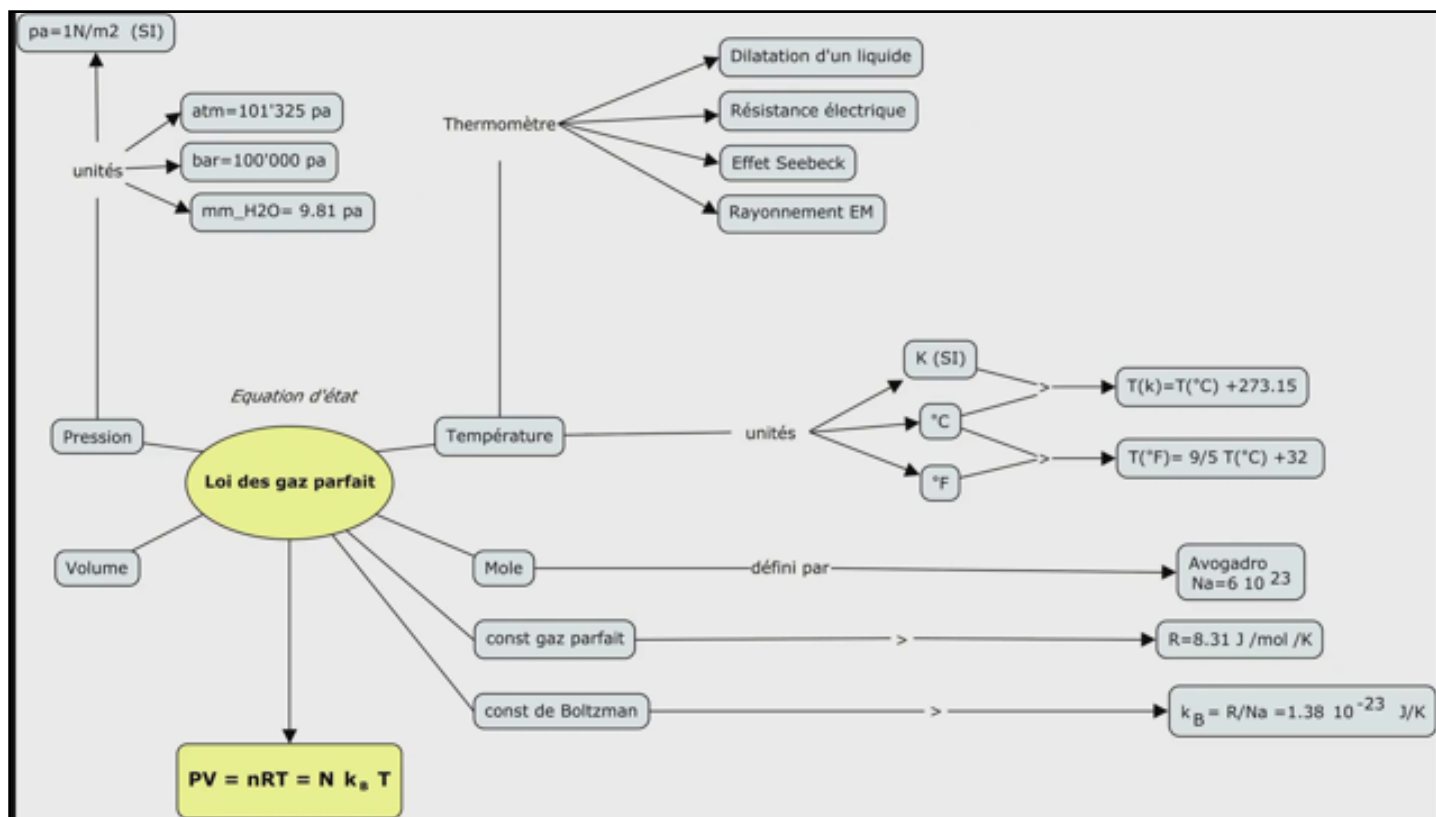
j'avais des petites décisions oui non à gauche, à droite, rouge, vert quand j'en mets plein ensemble je vais me retrouver sur une distribution comme ça normal et puis là on a je ne sais pas, on a peut-être 1000 petits grains dans la réalité vous avez le nombre d'avogadro dans une moule vous avez 10 puissance, 23 atomes qui vont peut-être chacun passer dans un système comme ça ou de temps en temps, de manière aléatoire ils vont aller à gauche ou à droite ce qui fait que les choses vont bien se mélanger et ça va faire à la fin une loi qui va être très très pointue ça reste une loi qui est de l'ordre de la loi normale mais la variance est très très petite et on va être très très très resserré autour de la moyenne et c'est ça il y a dans ce fameux chapitre que vous n'aurez pas vu cette année où j'essaie de vous expliquer microscopiquement pourquoi les systèmes vont à un niveau à un niveau d'équilibre et puis ce que vous avez peut-être entendue c'est lié à ça vous avez entendu de l'entropie que c'est au fond la mesure du désordre donc on peut se dire voilà un peu d'ordre vous avez les molécules noires qui sont d'un côté les molécules blanches les atomes blancs qui sont d'un autre côté c'est clair que si j'enlève ça et que je secoue je peux secouer longtemps il y a très peu de chance que tout d'un coup on se couant j'ai toutes les blanches d'un côté mais en fait c'est pas impossible la probabilité d'avoir les balles exactement comme ça mais je parle exactement ça veut dire celle-ci ici, la noire ici, la blanche exactement la même chose ou de les avoir toutes

notes

résumé

66m 39s

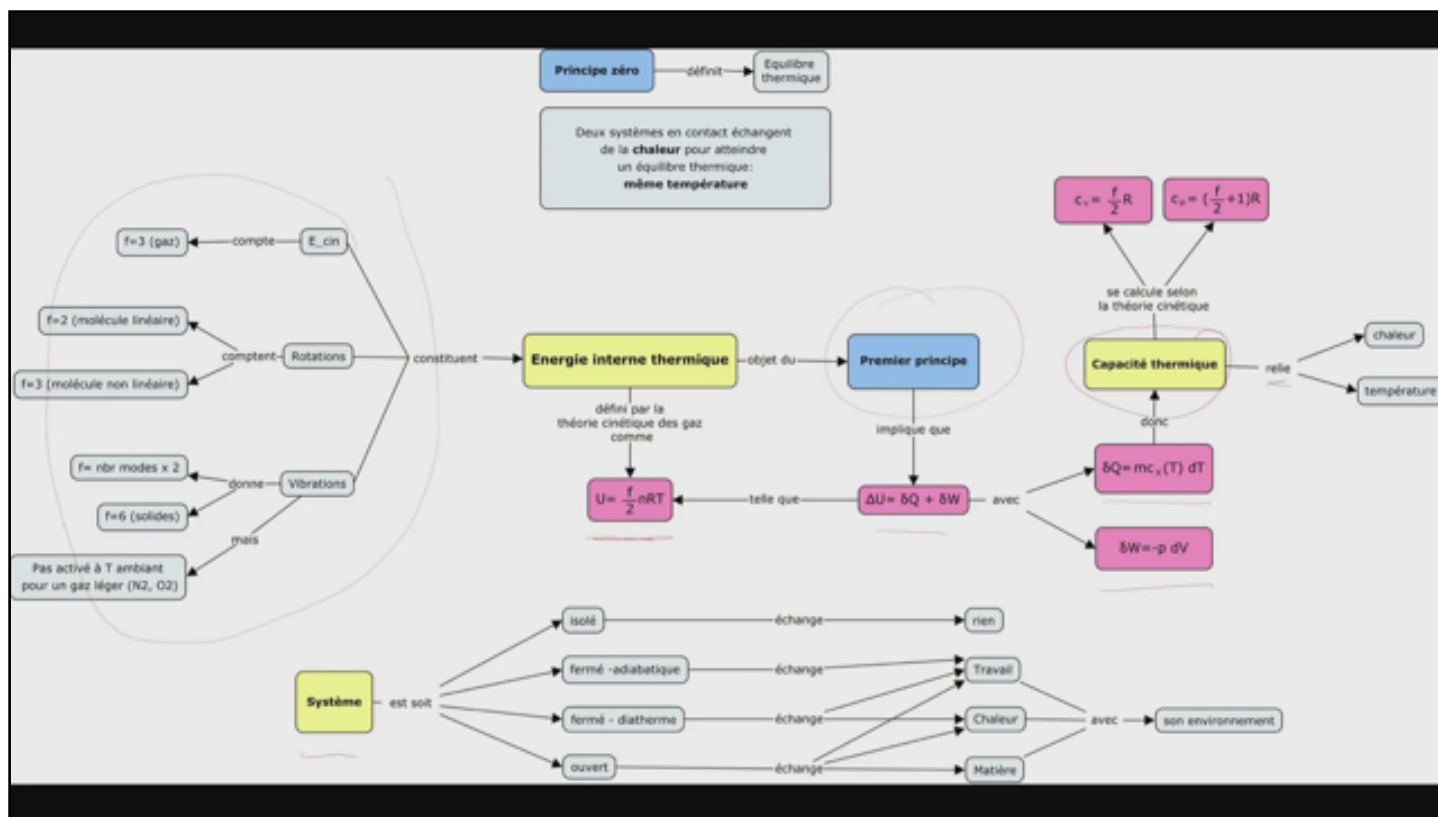




les blanches ou toutes les noires d'un côté la probabilité est la même mais seulement il y a quasiment un seul état où il y a toutes les blanches d'un côté et toutes les noires de l'autre alors qu'il y a plein d'états et toutes les blanches qui sont toutes mélangées donc si vous acceptez ce principe là et que vous y ajoutez ce que je vous ai présenté au niveau du fait d'avoir des tas de probabilités très très simples gauche noire quand elles sont ajouter les unes derrière les autres ça va créer une distribution très pointue c'est ce qui explique que les choses vont aller dans le sens où on les voit se déplacer

notes

résumé



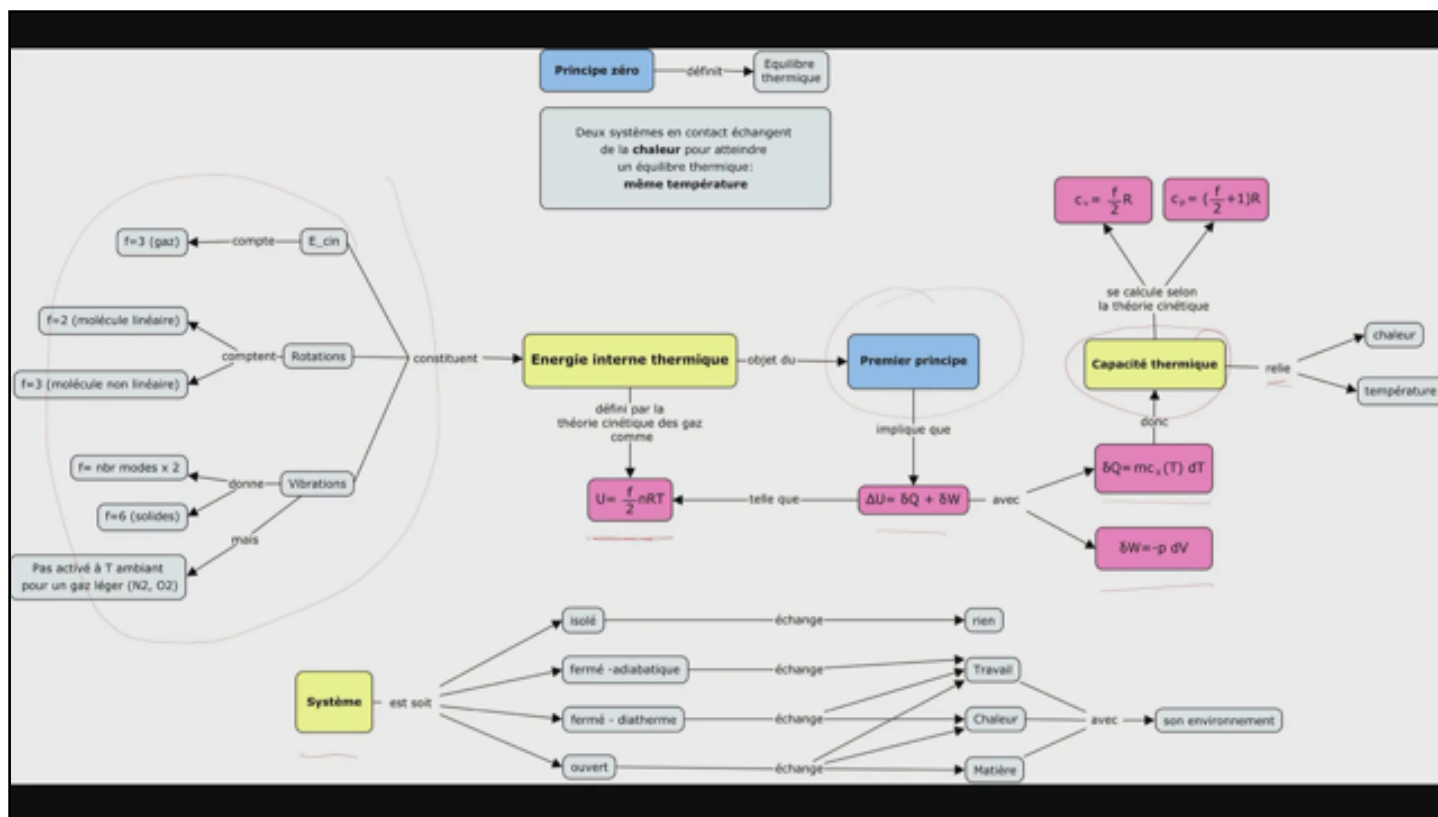
c'est ça qui fait que l'état de sable s'affaisse la montagne valaisanne descend la vallée au lieu de remonter la vallée la bière se réchauffe et le thé se refroidit on n'a pas d'autre choix autrement on a pas mal parlé quand même de capacités thermiques c'est un des aspects développés plus théoriquement dans ce cours on a parlé du CV du CP comment le calculer quand c'est qu'on nous disait l'un quand c'est qu'on nous disait l'autre le rapport des deux qui donnent le coefficient en diabatique etc donc ça c'est typiquement des choses qui vont se retrouver dans l'examen et puis on a quand même pas mal parlé j'ai pas mal insisté sur ce qui vient du premier principe ça veut dire chaleur il y a une énergie interne on peut faire plein de plein peu jouer autour de ça souvenez vous que l'énergie se calcule on joue, que les échanges de chaleur se calculent on joue que le travail se calcule on joue on parle d'énergie et puis pour la chaleur dans certaines situations on peut utiliser les CV et les CP pas dans toutes, soyez bien au clair ou pas et puis pour le travail on peut même être moins ça ne ferait pas de mal d'utiliser moins PDV donc le travail est toujours calculé comme ça l'enjeu on n'a pas toujours accès à  $p\Delta V$  c'est ça qui peut être la difficulté mais le travail c'est toujours une variation d'un volume, c'est pas de version de volume c'est pas de travail et puis on peut toujours calculer moins PDV, le jeu c'est d'être sûr dans le processus qui soit suffisamment régulier pour qu'on puisse vraiment calculer l'intégral et puis on a parlé d'énergie interne pas mal on n'a pas parlé d'entropie c'est bien dommage mais c'est

notes

résumé

69m 25s

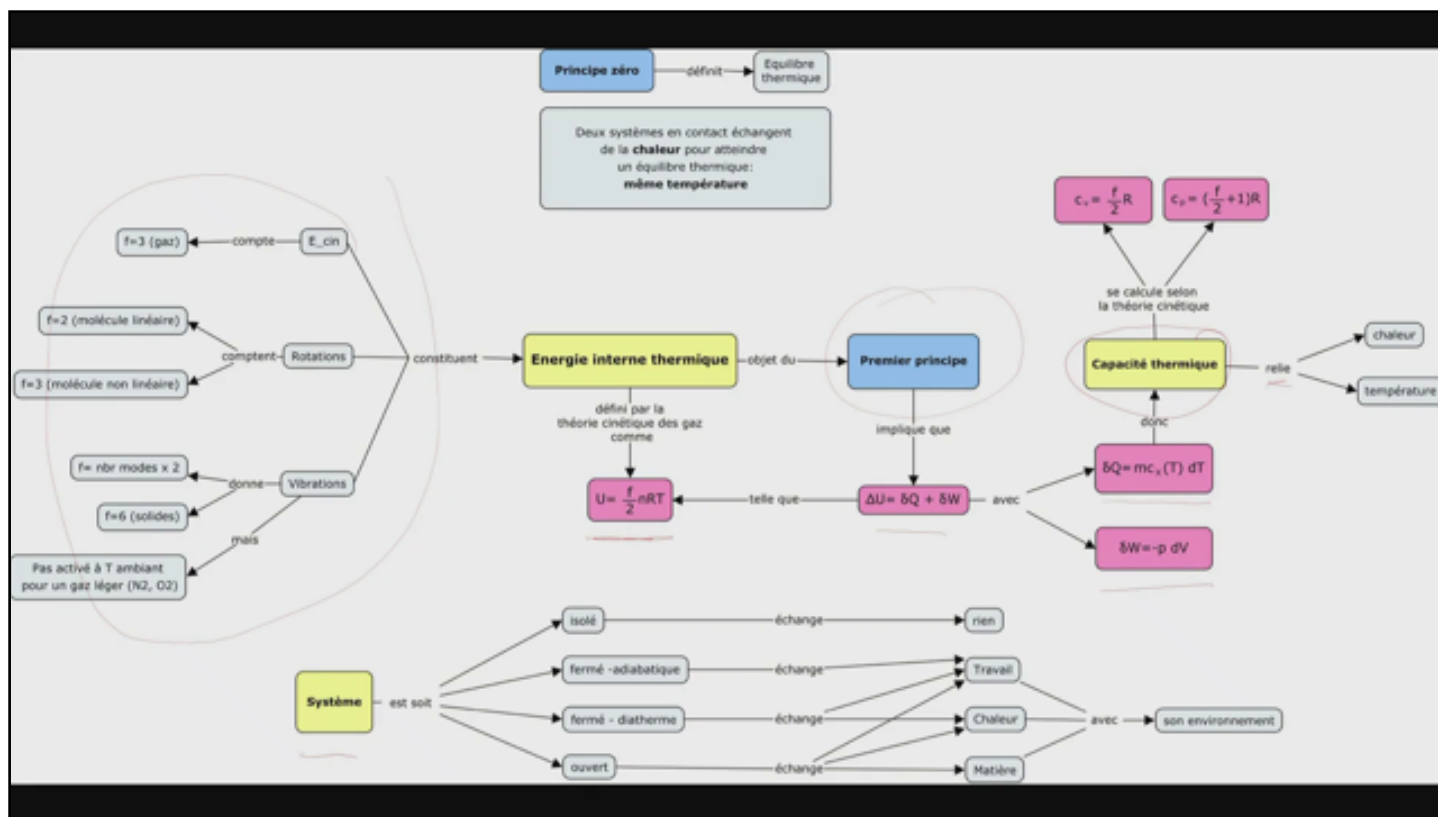




là où je voulais en venir maintenant je voulais faire un peu, j'ai dit aux assistants de venir à la fin de la leçon pour vous saluer une dernière fois j'en vois pas encore mais ils vont arriver bientôt en attendant je peux vous présenter quelques-uns des résumés que vous trouverez dans le cours, dans la session examen vous avez un certain nombre de résumés il y a beaucoup de choses là par exemple des choses sur l'électricité j'ai vu aujourd'hui ça vous concerne pas vous allez trouver dans les examens des questions où je parle d'entropie du deuxième principe c'est clair que ces questions à l'examen c'est un peu la limite de regarder les examens passés mais pourquoi on va commencer alors on va commencer par ce raisonnement là à mon avis ça doit être évident pour vous vous devriez être capable de le refaire en blanc sur une feuille de papier qu'est ce que vous savez sur les gaz parfaits c'est qu'est ce que les gaz parfaits on s'intéresse à la température et le nombre de particules ou le nombre de moles donc on a besoin de comprendre ces différents concepts on a cette loi pv=gal nrt quand on parle de moles on a nkbt quand on parle de particules le rapport entre r et k quand la constante de bolzmann r la constante des gaz c'est le nombre d'avogadre la moule est définie par le nombre d'avogadre la constante r elle est définie comme ça c'est une constante de la physique et puis le kb on peut le relier par rapport au nombre d'avogadre et puis la constante r je crois que dans la réalité de la physique ça a été plutôt l'inverse on a eu d'abord kb puis après on a fixé la valeur de r

notes

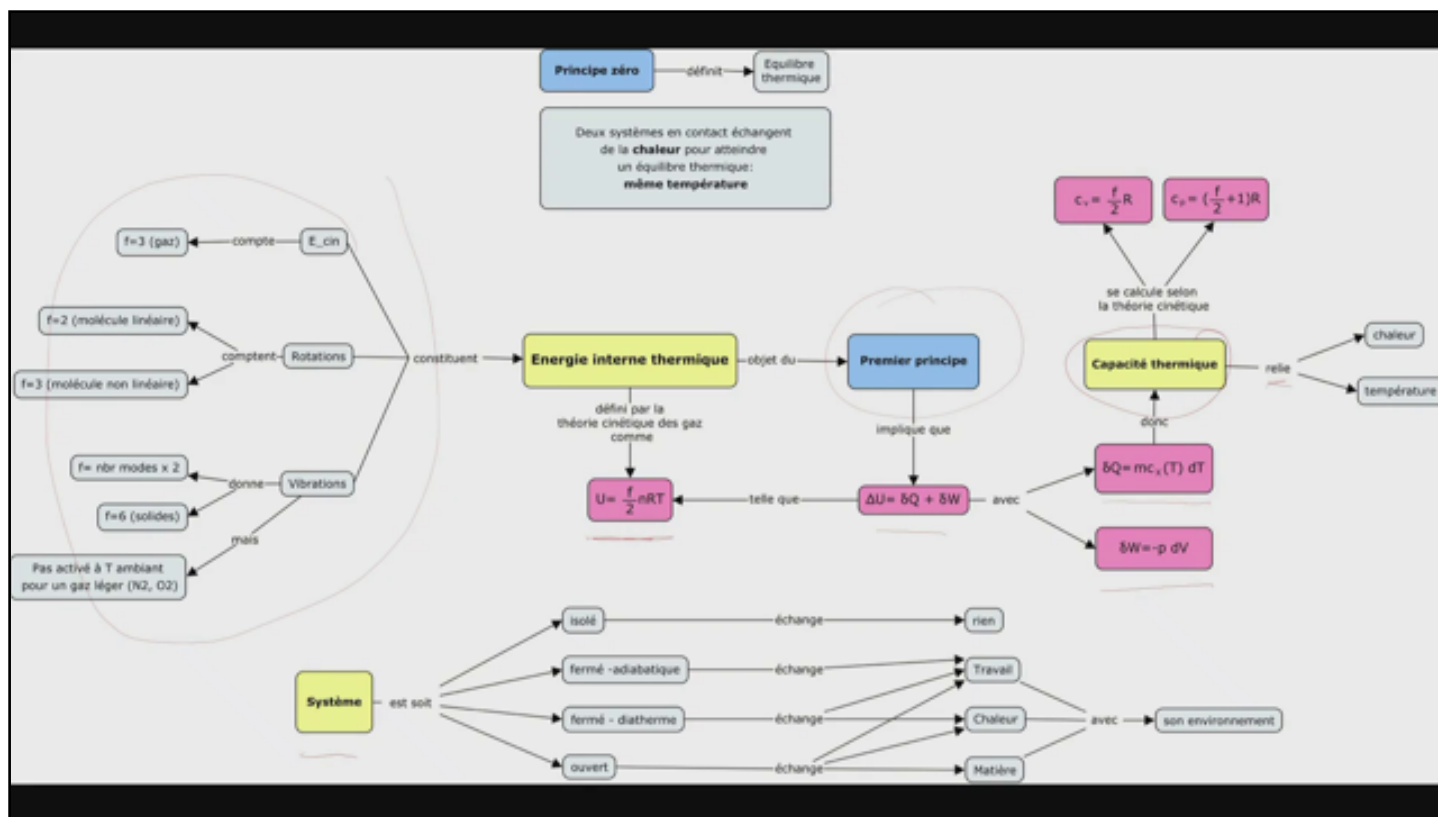
résumé



pour ça pour la température il y aura sûrement quelques questions sur les différentes manières de compter la température passer d'un système à l'autre pas forcément ce qu'on a vu je peux tout à fait définir un des systèmes de température qui existent sur terre vu qu'au 18ème siècle quasiment tous les scientifiques ont défini un système de température et vous faire passer de l'un de l'un à l'autre c'est tout à fait quelque chose que je pourrais faire et puis dans la température il y a bien sûr pour la mesurer c'est là où on a un petit peu parlé on a très peu parlé de la mesure de pression par contre on a pas mal parlé de température et puis on a vu un certain non je me suis un peu plus enlées à tous vu parce que peut-être que le résumé fait des choses que j'ai pas mentionné on a vu la dilatation des liquides comme mesure de température on a vu la résistance électrique je crois que l'effet cibèque je n'ai pas du tout parlé de l'effet cibèque dans le cours c'est une autre effet physique qu'on peut utiliser pour mesure de la température et puis on a parlé du rayonnement électromagnétique un petit peu et puis sur les pressions soyez au clair ces différentes unités le Pascal, l'unité SI l'atmosphère c'est assez pratique mais c'est un petit peu embêtant parce que c'est 101.325 alors on a défini le bar pour arrondir ça les ingénieurs ont voulu arrondir ça et puis il existe quelques unités un petit peu particulières tel que le millimètre d'eau pour définir les choses au niveau de l'énergie interne il y a un petit peu plus de calcul et de trucs à se souvenir je ne vais pas expliquer chacune des bulles

notes

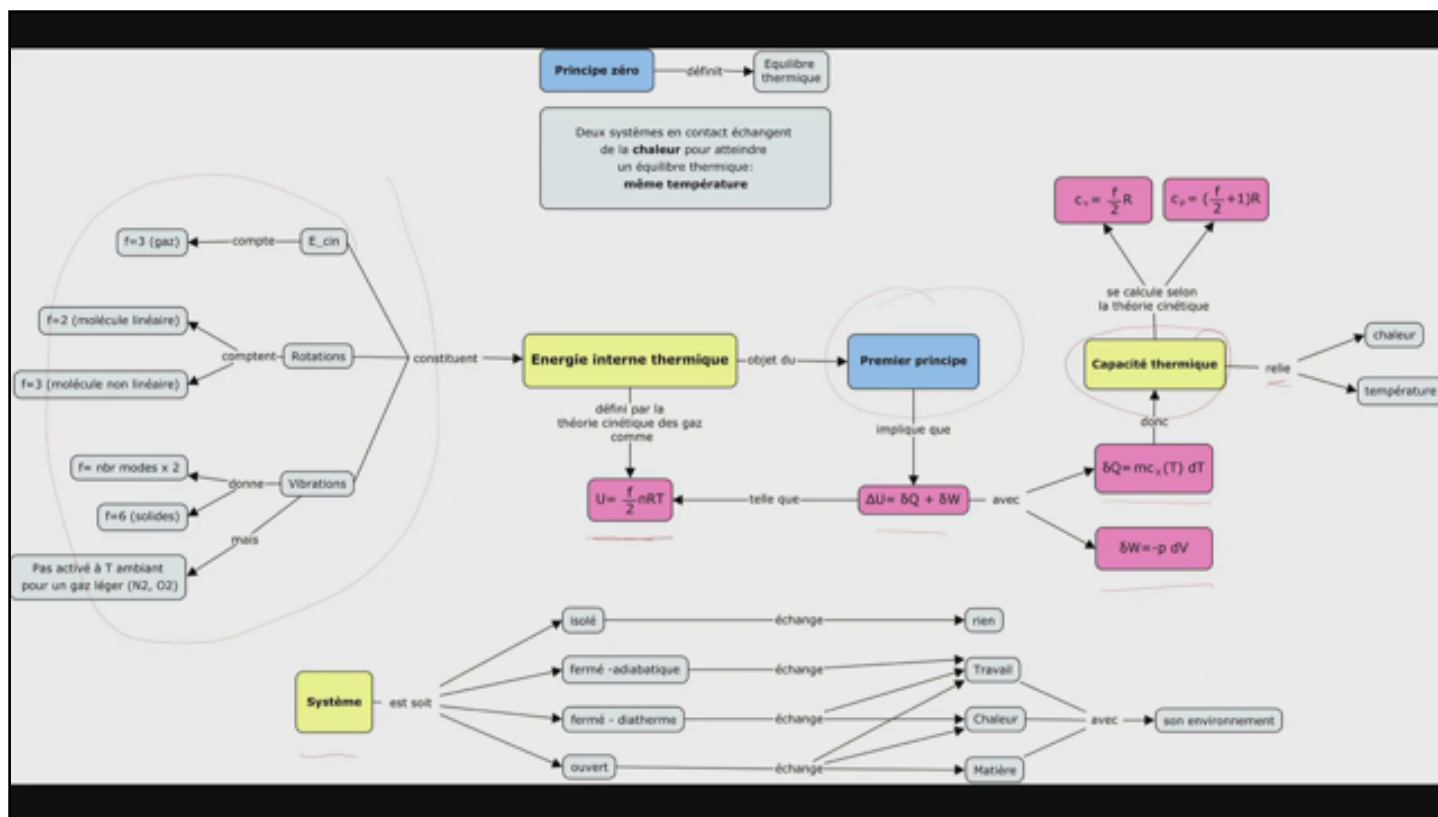
résumé



mais là vous avez une petite explication moi à mon avis la vôtre pour vous vaut mieux que la mienne mais si jamais vous avez là pour résumer c'est de comprendre qu'à s'il y a un lien là-dedans qui vous êtes pas compréhensible ça voudrait la peine de mettre au clair mais typiquement donc l'énergie interne souvent on précise thermique parce qu'il peut y avoir encore des aspects chimiques donc on n'a pas parlé pour y avoir des aspects liés aux électrons donc on n'a pas du tout parlé puis on a plus de l'énergie nucléaire aussi donc c'est pour ça qu'on peut rajouter le mot thermique mais dans l'autre cours quand on dit énergie interne c'est toujours l'énergie interne de type thermique dont on parle, celle qui est liée à la molécule donc elle est définie par la théorie cinétique des gaz c'est intéressant de savoir qu'on peut définir cette énergie interne comme  $f$  sur 2 vous le direz par  $nRT$  le  $f$  étant le nombre de degrés de liberté de la de la molécule souvenez-vous que quand on parle des vibrations les degrés de liberté valent double que l'énergie interne est liée à la variation d'énergie interne qui dépend des échanges de chaleur et de travail et que ça s'est géré par le premier principe et puis après que quand on parle juste des échanges de chaleur il y a toujours une relation avec la capacité capacité thermique et puis qu'on peut calculer le CVLCP à partir de degrés de liberté que ces valeurs sont théoriques dans la réalité elles diffèrent un peu dans le problème on explique si on est en train de parler des valeurs théoriques ou si on est en train de parler la valeur expérimentale qu'on doit donner je m'attends pas à ce que

notes

résumé

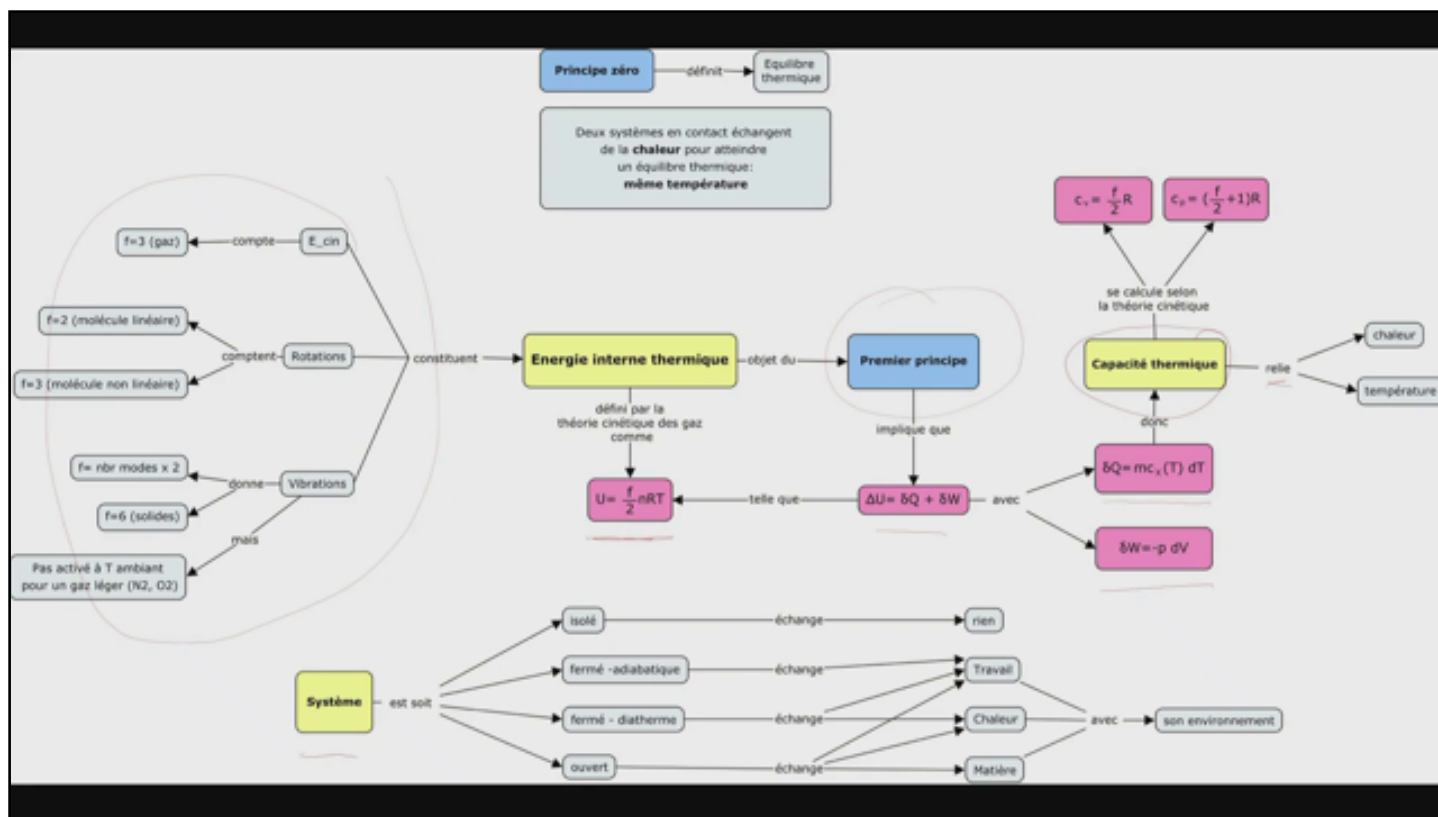


vous souveniez par coeur de valeur expérimentale qui est apparue dans les exercices et puis c'est clair que cette capacité thermique elle est quand même importante parce qu'elle permet de relier les aspects de température et de chaleur c'est important de distinguer ces deux concepts mais c'est clair qu'ils sont liés et puis il y a quelque chose qu'on a fait au tout début comprendre des systèmes du vocabulaire qu'est-ce qu'un système isolé qu'est-ce qu'un système fermé qu'est-ce qu'un système ouvert d'être un petit peu au clair parce que dans les définitions des problèmes on définit la situation avec ces mots-là donc c'est quand même important j'ai eu quelques questions là encore sur isotherme ou isotempérature donc typiquement isotherme ça veut dire qu'on peut contrôler tout le temps à tout moment le processus, le processus est réversible la température reste la même et le processus est réversible alors que isotempérature on sait juste que au début et à la fin on a une température mais on va pas pouvoir intégrer sur le processus parce qu'on sait pas exactement ce qui peut se passer entre les deux à un moment la pression peut monter plus que ce qu'on voulait et la température pourrait pas être tout le temps constante c'est tout un enjeu des inerties des systèmes est-ce que dans un système isotherme ça veut dire que instantanément l'équilibre de température peut se faire la réalité pas toujours est exactement la même et puis là il y a l'énergie interne tout le calcul du F vous êtes sûr qu'il y aura des questions sur le calcul de ces degrés de liberté j'aurais de la peine à faire un examen sans jamais parler de ces degrés de liberté voilà maintenant je vais arrêter le cours les assistants sont là je réponds encore

notes

résumé





volontiers des questions ici si vous voulez descendre et poser des questions je vous rappelle qu'on a rendez vous le 6 et puis ensuite on a rendez vous le 16 donc ça se passe le matin entre 10h et midi vous venez quand vous voulez moi je serai en tout cas en ligne les assistants seront en ligne on va s'organiser en distribuant on verra combien on est si on est suffisamment en distribuant au sous-groupe je vais essayer de voir si j'arrive à gérer zoom suffisamment bien pour avoir des sous-salles et puis l'idée c'est de répondre à vos questions si vous avez des questions on va pas faire autre chose que répondre à vos questions et puis après c'est le 16 juste quelques éléments

notes

résumé