

1. Généralités

- 1.1. Principe de fonctionnement d'une machine thermique
- 1.2. Distinction moteur / récepteur
- 1.3. Inégalité de Clausius
- 1.4. Impossibilité d'un moteur cyclique monotherme

2. Etude générale des machines dithermes

- 2.1. Source froide et source chaude
- 2.2. Classification des MTD : diagramme de Raveau
- 2.3. Définition de l'efficacité d'une MTD
- 2.4. Efficacité (ou rendement) d'un moteur ditherme
- 2.5. Efficacité d'un réfrigérateur ditherme
- 2.6. Efficacité d'une pompe à chaleur ditherme
- 2.7. Machine ditherme réversible - Cycle de Carnot

3. Etude d'un exemple : moteur à essence

- 3.1. Principe de fonctionnement et cycle réel du moteur à essence 4 temps
- 3.2. Approximation du cycle réel – Cycle de Beau de Rochas
- 3.3. Expression du rendement
- 3.4. Un mot sur le cycle diesel

Intro :

On se propose dans ce chapitre d'appliquer le premier et le deuxième principe de la thermodynamique à l'étude des machines thermiques, dont le principe est de convertir du travail en transfert thermique ou inversement. Historiquement, l'étude concrète des machines thermiques est à l'origine du développement théorique de la thermodynamique.

Après avoir dégagé quelques généralités concernant les machines thermiques, on déterminera l'efficacité des trois types de machines dithermes que l'on peut réaliser : moteur, réfrigérateur et pompe à chaleur. On étudiera enfin un exemple concret : celui du moteur à essence.

1. Généralités

1.1. Principe de fonctionnement d'une machine thermique

Une machine est un système qui réalise une conversion d'énergie. Les premières machines étaient purement mécaniques : un levier, une poulie permettent de soulever un objet et de convertir l'énergie fournie par un homme ou un animal en énergie potentielle. Un moulin fournit du travail à partir de l'énergie cinétique du vent.

Une machine thermique permet de convertir de l'énergie mécanique en énergie thermique et inversement. Un moteur de voiture et un réfrigérateur sont des exemples concrets de machines thermiques. *Un fluide circule dans la machine et subit diverses transformations*, qui globalement réalisent cette conversion : le mélange air-carburant pour un moteur de voiture, le liquide réfrigérant dans le cas d'un réfrigérateur.

Pour permettre un fonctionnement en continu, une machine thermique *doit être cyclique* : **le fluide qui circule dans la machine revient dans son état initial après un cycle**. Il suffit d'étudier les transformations du fluide sur un seul cycle pour étudier la machine. Le fluide circulant sera donc notre système d'étude.

Le fonctionnement d'une MT peut généralement être schématisé par une succession de transformations d'un fluide, au cours desquelles celui-ci échange de l'énergie avec l'extérieur, sous forme de travail et de transfert thermique avec des thermostats. Dans toute la suite du chapitre, les échanges d'énergie sont toujours orientés *en convention récepteur* : de l'extérieur vers le système (le fluide). Le signe de chacun des échanges d'énergie permet d'en déduire le sens *réel*.

1.2. Distinction moteur / récepteur

On peut classer les MT en deux catégories, selon qu'elles fournissent ou reçoivent du travail globalement sur le cycle (réellement, pas conventionnellement). Un *moteur* fournit effectivement du travail à l'extérieur. Un *récepteur* reçoit effectivement du travail de l'extérieur.

- Quel est le signe du travail dans le cas d'un moteur ? dans le cas d'un récepteur ?
- Soit un cycle représenté sur un diagramme de Watt. Quel est le sens de parcours pour un moteur ?

1.3. Inégalité de Clausius

Une MT est dite *polytherme* si le fluide circulant échange de l'énergie par transfert thermique avec plusieurs sources de chaleur (transfo en plusieurs étapes). Elle est dite *monotherme* sinon. Elle est dite *ditherme* dans le cas d'échanges avec deux sources de chaleur.

- Par application du deuxième principe de la thermodynamique, établir l'inégalité de Clausius dans le cas d'une MT polytherme.

*Pour une MT polytherme recevant au cours d'un cycle
les transferts thermiques Q_i de la part de N thermostats de température T_i :*

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

l'égalité étant réalisée dans le cas particulier d'un cycle réversible.

1.4. Impossibilité d'un moteur cyclique monotherme

- Dédire de l'inégalité de Clausius qu'un moteur cyclique monotherme est irréalisable.

Un moteur cyclique monotherme est impossible. C'est une conséquence du deuxième principe.

Par exemple, on ne peut pas envisager de faire avancer un bateau uniquement en prélevant de l'énergie par transfert thermique à l'eau. Le premier principe ne l'interdit pas, le second l'interdit.

On peut montrer que cette affirmation est équivalente au deuxième principe. C'est historiquement une des formes de l'énoncé du second principe (proposé par Kelvin).

On notera cependant qu'un récepteur cyclique monotherme est réalisable. Par la suite, on étudiera les plus simples des MT pouvant être à la fois motrice et réceptrice : les MT dithermes.

2. Etude générale des machines dithermes

On va présenter les trois types d'utilisation d'une MTD : moteur, réfrigérateur et pompe à chaleur. Pour ces trois configurations, on définit *l'efficacité* de la machine qui caractérise l'efficacité avec laquelle la conversion d'énergie est réalisée. On établit ensuite dans chacun des cas le théorème de Carnot, qui détermine l'efficacité maximale d'une MTD, atteinte pour un cycle réversible.

2.1. Source froide et source chaude

Au cours d'un cycle, le système échange de l'énergie par transfert thermique avec deux thermostats. On appelle *source chaude* le thermostat de température la plus élevée (T_c), et *source froide* le thermostat de température la plus basse (T_f).

On notera Q_c le transfert thermique reçu par le système depuis la source chaude (orientation conventionnelle), et Q_f celui reçu depuis la source froide.

2.2. Classification des MTD : diagramme de Raveau

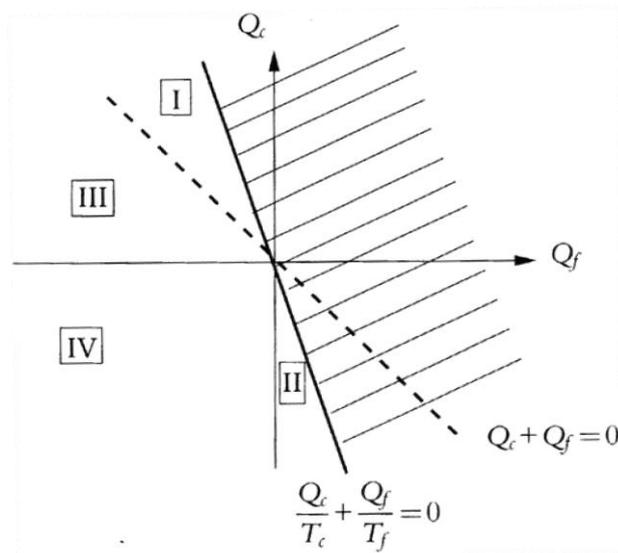
On recherche ici les différentes applications *possibles* et *utiles* d'une MTD. Le but étant de convertir du travail en transfert thermique ou inversement, il suffit d'étudier les valeurs possibles que peuvent prendre W , Q_c et Q_f compatibles avec les deux principes.

- A l'aide du premier principe appliqué à un cycle, montrer que pour une valeur donnée du travail on peut considérer Q_c comme une fonction de Q_f .

On peut représenter graphiquement les différentes MTD envisageables : c'est le *diagramme de Raveau* (Q_c , Q_f).

- En invoquant l'inégalité de Clausius, repérer la partie du diagramme (Q_c , Q_f) correspondant à un fonctionnement *possible* de la MTD.
- En invoquant le premier principe, distinguer les deux parties du diagramme correspondant respectivement à un fonctionnement *moteur* ou *récepteur*.
- Pour un fonctionnement *récepteur possible*, repérer la partie du diagramme correspondant aux récepteurs *utiles*, i.e. qui inversent le sens spontané des transferts thermiques entre sources chaude et froide.

Ces résultats sont regroupés dans le diagramme de Raveau ci-dessous.



Remarque : La zone III est inutile car il n'est pas nécessaire d'utiliser une MTD pour transférer de la chaleur de la source chaude vers la source froide : il suffit de les mettre en contact. La zone IV est inintéressante car une des deux sources est inutile : elles jouent le même rôle, puisqu'elles reçoivent effectivement toutes deux de la chaleur.

On a ainsi pu distinguer les trois applications *possibles* et *utiles* d'une MTD :

- **moteur** (zone I) : convertit le transfert thermique reçu depuis la source chaude en travail. On remarque que cette conversion n'est pas parfaite ! Une partie est perdue en transfert thermique à la source froide.
- **récepteurs** (zone II) : reçoit effectivement du travail pour inverser le sens spontané des échanges thermiques entre les deux sources de chaleur. On distingue deux types de récepteurs, selon l'objectif souhaité, le « point de vue de l'utilisateur » :
 - **réfrigérateur** : l'objectif est de refroidir la source froide. Concrètement, l'intérieur d'un frigo représente la source froide (à refroidir), et l'air ambiant représente la source chaude. Un climatiseur refroidit la pièce (source froide) tout en réchauffant l'air extérieur (source chaude).
 - **pompe à chaleur** : l'objectif est de réchauffer la source chaude. Concrètement, l'intérieur d'une pièce à chauffer représente la source chaude, et l'air extérieur (ou l'eau d'une rivière, d'un lac) représente la source froide.

On remarque donc qu'un réfrigérateur et une pompe à chaleur reposent sur le même principe de fonctionnement. Seul le point de vue de l'utilisateur change.

- Si on laisse la porte d'un réfrigérateur ouverte, la température de la pièce va-t-elle globalement augmenter ou diminuer ?

Remarque : Dans notre étude, nous supposons que les sources de chaleur sont des thermostats, i.e. des corps à température constante. Or dans le cas d'une MTD réceptrice, il apparaît clairement que l'on cherche à faire varier la température d'au moins une des deux sources !

Cependant, on se placera généralement *en régime permanent*, où par définition les températures des sources seront constantes. Ce n'est pas une simplification *ad hoc*. Si l'on considère une pompe à chaleur, la pièce n'est pas parfaitement hermétique, et de l'air froid extérieur pénètre petit à petit dans la pièce. Le régime permanent est atteint par exemple lorsque la chaleur fournie à la pièce (par la MT) compense exactement ces « fuites de chaleur ».

D'autre part, en régime non permanent, la température des sources varient généralement très peu sur un ou quelques cycles ; il est donc souvent possible de les assimiler à des thermostats sur quelques cycles.

2.3. Définition de l'efficacité d'une MTD

L'efficacité thermodynamique e d'une MT caractérise l'efficacité avec laquelle est réalisée la conversion d'énergie. L'efficacité e étant définie positive, on peut résumer cela en écrivant :

$$e \stackrel{\text{def}}{=} \left| \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie à convertir et coûteuse}} \right|$$

- Définir l'efficacité thermodynamique d'un moteur, sachant que le combustible sert à chauffer le fluide circulant dans le moteur.
- Définir l'efficacité d'un réfrigérateur, puis d'une pompe à chaleur.

2.4. Efficacité (ou rendement) d'un moteur ditherme

- En appliquant le premier et le deuxième principe sur un cycle, montrer que l'efficacité d'un moteur ditherme est inférieure à une valeur que l'on précisera en fonction de T_c et T_f .
- A quelle condition l'efficacité du moteur est-elle maximale ?

L'efficacité d'un moteur ditherme étant toujours inférieure à 1, on l'appelle aussi *rendement du moteur*, noté r .

Le rendement d'un moteur est toujours inférieur à une valeur limite fonction des températures des sources :

$$r \leq 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Le rendement maximal est obtenu pour le cas limite du moteur réversible.

Ce résultat constitue le **théorème de Carnot** relatif au moteur thermique. On notera que le rendement d'un cycle réversible est d'autant plus grand (et tend vers 1) que les températures des sources sont différentes.

2.5. Efficacité d'un réfrigérateur ditherme

- De la même façon qu'au paragraphe précédent, montrer que l'efficacité d'un réfrigérateur est inférieure à une valeur, fonction uniquement des températures des sources.

L'efficacité d'un réfrigérateur est inférieure à une valeur limite fonction des températures des sources :

$$e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

L'efficacité maximale est obtenue pour le cas limite d'un réfrigérateur réversible.

Ce résultat constitue le **théorème de Carnot** relatif au réfrigérateur. On notera que l'efficacité d'un réfrigérateur n'est pas nécessairement inférieure à 1. Elle est d'autant plus grande que (et tend vers l'infini) que les températures des sources sont proches l'une de l'autre.

2.6. Efficacité d'une pompe à chaleur ditherme

- De la même façon qu'au paragraphe précédent, montrer que l'efficacité d'une pompe à chaleur est inférieure à une valeur, fonction uniquement des températures des sources.

L'efficacité d'une pompe à chaleur est inférieure à une valeur limite fonction des températures des sources :

$$e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f}$$

L'efficacité maximale est obtenue pour le cas limite d'une pompe à chaleur réversible.

Ce résultat constitue le **théorème de Carnot** relatif à la pompe à chaleur. On notera que l'efficacité d'une pompe à chaleur n'est pas nécessairement inférieure à 1. Elle est d'autant plus grande (et tend vers l'infini) que les températures des sources sont proches l'une de l'autre.

Pour des sources de chaleur identiques, on voit qu'une pompe à chaleur est plus efficace qu'un réfrigérateur. On retrouve le fait qu'un frigo laissé ouvert va globalement réchauffer la pièce.

2.7. Machine ditherme réversible - Cycle de Carnot

Un cycle *ditherme réversible* est appelé cycle de Carnot. On vient de voir que l'efficacité est maximale pour ce type de MTD. Comment réaliser ce cycle réversible ?

Lors d'un cycle de Carnot, le fluide au sein du moteur doit subir (pas nécessairement dans cet ordre) :

- une transformation réversible au contact de la source chaude
 - une transformation réversible au contact de la source froide
 - éventuellement une ou plusieurs transformations réversibles où il échange du travail avec l'extérieur, de manière adiabatique
-
- Quelle doit être la température du système pour que ses évolutions au contact des sources de chaleur soient réversibles ?
 - Représenter ces évolutions sur un diagramme entropique (T,S). Combien faut-il de transformations avec échange de travail (sans échanges thermiques) pour boucler le cycle ?
 - Les évolutions pendant lesquelles le système échange du travail sont adiabatiques réversibles. Comment peut-on les qualifier ?
 - Compléter le cycle de Carnot sur le diagramme entropique. Dans quel sens est parcouru un cycle de Carnot moteur en coordonnées (T,S) ?
 - En supposant que le fluide est un gaz parfait, tracer le cycle de Carnot sur un diagramme de Watt.
 - Dans quel sens est parcouru un cycle de Carnot moteur en coordonnées (P,V) pour un gaz parfait ?

Cycle de Carnot

Un cycle ditherme réversible doit être constitué de deux isothermes reliées par deux isentropiques.

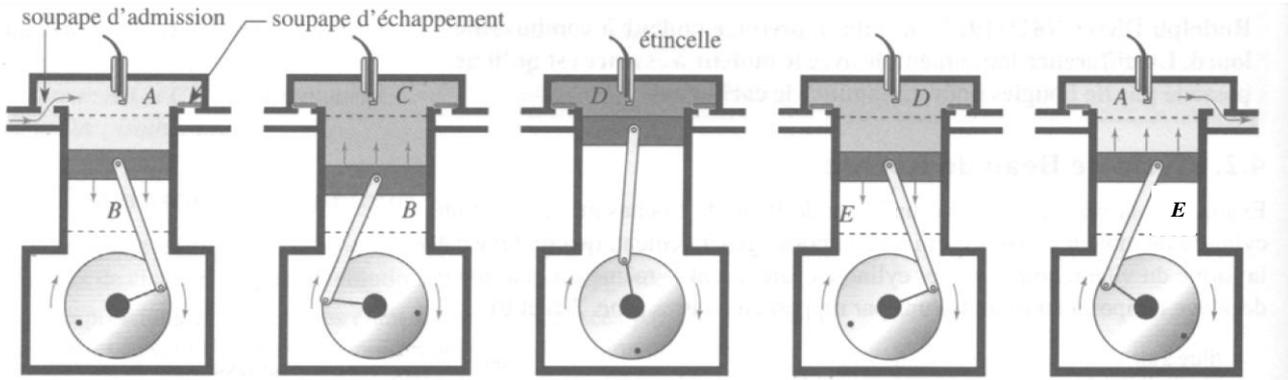
Remarque importante :

Le cycle de Carnot, d'efficacité maximale, constitue simplement **une limite théorique** du fonctionnement des MTD. Il n'est pas réalisable en pratique, comme toute transformation réversible. En pratique, il n'est pas intéressant d'essayer de tendre vers un cycle réversible, car cela implique un fonctionnement infiniment lent de la machine !

3. Etude d'un exemple : moteur à essence

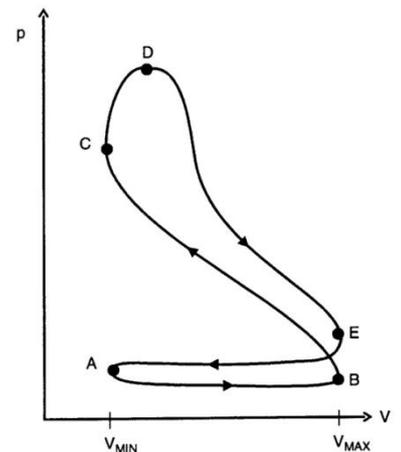
On présente le principe de fonctionnement d'un moteur à essence, puis en le modélisant de manière simplifiée on cherchera à calculer son rendement.

3.1. Principe de fonctionnement et cycle réel du moteur à essence 4 temps



On décrit ici le principe de fonctionnement d'un moteur à essence à quatre temps. Ce type de moteur est constitué généralement de quatre cylindres. Le cycle de chaque cylindre est décalé en temps afin que la machine soit motrice à tout instant.

L'évolution au cours d'un cycle du piston d'un des cylindres est représentée sur le schéma ci-dessus. Ci-contre est représenté le diagramme de Watt *réel* (mesuré) du cycle effectué par le gaz contenu dans le cylindre au cours d'un cycle.



On peut distinguer 4 temps au cours d'un cycle (cf. les 4 translations du piston) :

- 1^{er} temps : admission. La soupape d'admission s'ouvre et la soupape d'échappement est fermée. Le piston entraîné par la bielle descend et aspire le mélange carburé (air + carburant) à la pression atmosphérique : **étape AB**.
- 2^{ème} temps : compression et combustion. Les deux soupapes sont fermées. Le piston entraîné par la bielle remonte et comprime le mélange carburé : **étape BC**. En C, une étincelle électrique jaillit de la bougie (allumage). La combustion s'effectue très rapidement et chauffe le gaz. Le piston n'a pas le temps de beaucoup bouger, le volume reste presque constant et la pression augmente : **étape CD**.
- 3^{ème} temps : détente. Le piston est alors repoussé violemment vers le bas, et le gaz de combustion se détend : **étape DE**. C'est le véritable temps moteur du cycle (gaz fournit du travail au piston).
- 4^{ème} temps : échappement. La soupape d'admission restant fermée, la soupape d'échappement s'ouvre. Le piston entraîné par la bielle remonte et éjecte les gaz brûlés dans l'atmosphère, à pression atmosphérique : **étape EA**.

On notera qu'au cours du cycle le piston effectue 2 allers-retours, et l'arbre moteur effectue 2 tours.

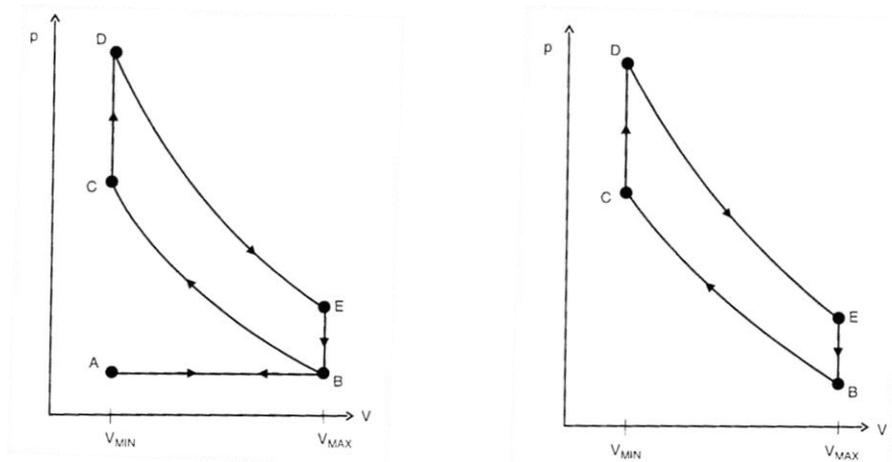
Il n'est pas simple d'étudier théoriquement le rendement de ce moteur. En effet, le gaz enfermé dans le cylindre change de nature au cours d'un cycle. Par ailleurs, le système défini par l'intérieur du cylindre et délimité par le piston est un système ouvert : du gaz est admis initialement, puis éjecté finalement. Enfin, les transformations subies par le gaz enfermé dans le cylindre ne correspondent pas exactement aux transformations simples envisagées jusqu'ici (adiabatique, isotherme, isobare, monobare, etc...).

3.2. Approximation du cycle réel – Cycle de Beau de Rochas

Pour déterminer simplement le rendement du moteur à essence, on va assimiler le cycle réel à un cycle plus simple, une approximation du cycle réel : *le cycle de Beau de Rochas*. Pour obtenir ce cycle simplifié, on fait les hypothèses suivantes :

- A tout instant, les gaz enfermés dans le cylindre sont assimilés *au même gaz parfait* diatomique. C'est une approximation raisonnable car ces gaz sont majoritairement constitués d'air.
- L'admission **AB** est supposée *isobare* et *isotherme*, seule la quantité de gaz parfait augmente et se traduit par une augmentation de volume.
- La compression **BC** et la détente **DE** sont supposées *adiabatiques*. C'est raisonnable car ces transformations s'effectuent très rapidement, et les échanges de chaleur n'ont pas le temps de se faire. On les suppose en outre *réversibles* : c'est une hypothèse plus discutable. Ces deux transformations sont donc isentropiques.
- La combustion **CD** est supposée *isochore*. C'est une approximation raisonnable car l'explosion est très rapide et le piston n'a pas le temps de bouger. Le gaz ne subit aucune évolution chimique. On assimile donc la chaleur dégagée pendant la combustion comme étant *fictivement fournie par une source de chaleur* jouant le rôle de *source chaude*.
- On décompose la phase d'échappement **EA** en deux transformations :
 - On suppose que l'ouverture de la soupape d'échappement ramène le gaz à la pression atmosphérique suffisamment rapidement pour que le piston n'ait pas le temps de bouger. On suppose aussi que la quantité de gaz éjectée est très faible et peut être négligée. La quantité de gaz reste constante. Le système est fermé et la détente est isochore : étape **EB** du cycle de Beau de Rochas. Lors de cette détente, le gaz fournit de la chaleur à l'atmosphère qui joue ici le rôle de *source froide*.
 - L'éjection des gaz est supposée *isotherme* et *isobare*, seule la quantité de gaz parfait diminue et se traduit par une diminution du volume : étape **BA** du cycle ci-dessous.

La figure ci-dessous à gauche présente le cycle correspondant aux approximations faites ci-dessus.



Dans le cadre de nos approximations, on remarque que les transformations **AB** et **BA** sont exactement inverses l'une de l'autre, et s'effectuent à travail et transfert thermique nuls. Ainsi modélisées, elles n'ont pas d'influence sur le bilan énergétique que l'on va effectuer pour calculer le rendement. On les néglige donc.

On remarque alors que le cycle résultant BCDE est parcouru par un système fermé. Dans le cadre de nos hypothèses (très simplificatrices !), c'est comme si une masse constante de gaz effectuait indéfiniment le cycle représenté sur la figure de droite ci-dessus : *c'est le cycle de Beau de Rochas*.

3.3. Expression du rendement

- Définir le rendement du moteur à essence, puis l'exprimer en fonction des températures.
- Exprimer alors le rendement en fonction du *taux de compression* $a = \frac{V_{max}}{V_{min}}$ et de γ .

On remarque que le rendement augmente avec le taux de compression. Ceci est conforme à la réalité, et c'est le principal intérêt du calcul simplifié que l'on a mené. Pour $a = 6$, on a trouvé un rendement de 51%. En réalité, le rendement est plutôt de l'ordre de 30%.

3.4. Un mot sur le cycle diesel

Une des différences principales (à propos du principe de fonctionnement) entre le moteur à essence et le moteur diesel concerne la phase de combustion. Dans le moteur à essence, celle-ci se fait très rapidement, donc à volume quasi-constant : combustion isochore. Pour le moteur diesel, la combustion ne nécessite pas d'étincelle. L'air est comprimé (sans carburant), puis le carburant est injecté progressivement de manière à rendre la combustion isobare.

Notions clefs

Savoirs :

- Définition machine thermique + orientation conventionnelle échanges d'énergie
- Distinction moteur / récepteur
- Inégalité de Clausius pour une machine ditherme
- Impossibilité du moteur monotherme
- Définition source froide / chaude
- 3 utilisations MTD : moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur
- Définition de l'efficacité pour ces trois types de MTD
- Les 3 formes du Th. de Carnot
- Les 4 évolutions du cycle de Carnot + diagramme (P,V) si GP

Savoirs faire :

- Redémontrer l'inégalité de Clausius pour une MTD (application 2^{ème} ppe)
- Identifier énergie utile et énergie à convertir/coûteuse pour une application donnée
- Redémontrer les expressions des efficacités maximales (cycle de Carnot)
- Calculer l'efficacité d'une MTD une fois les transfo du cycle données

Aucune connaissance spécifique au moteur à essence n'est exigible.