

Introduction aux machines thermiques

Sommaire

4.1 Cadre d'étude	2
4.1.1 Principe général	2
4.1.2 Principes de la thermodynamique	2
4.1.3 Cas de la machine monotherme	3
4.2 Approche générale des moteurs dithermes	3
4.2.1 Construction du moteur "parfait"	3
4.2.2 Rendement d'un moteur	5
4.2.3 Exemple du moteur à essence (4 temps)	6
4.3 Machines réceptrices	7
4.3.1 Principe de fonctionnement	7
4.3.2 Efficacité des machines	8
4.3.3 Exemple du réfrigérateur (TP-cours)	9

Questions de cours :

- Pour une machine cyclique ditherme, énoncer les deux premiers principes et en déduire l'inégalité de Clausius. Justifier ainsi l'impossibilité de construire un moteur thermique monotherme.
- Pour le système au choix du khôlleur (moteur, pompe à chaleur, machine frigorifique), expliciter le sens des échanges thermiques, définir le rendement / efficacité et montrer sa borne supérieure (Carnot). Donner un ordre de grandeur du rendement / efficacité réel(le).
- Représenter un cycle de Carnot moteur avec et sans changement d'état, et calculer le rendement associé.
- Expliquer les étapes de fonctionnement d'une machine réceptrice, ses différents éléments constitutifs et leur rôle (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur).

Capacités exigibles du BO :

- Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur ou un récepteur thermique ditherme.
- Analyser un dispositif concret et le modéliser par une machine cyclique ditherme.
- Définir un rendement ou une efficacité et la relier aux énergies échangées au cours d'un cycle.
- Justifier et utiliser le théorème de Carnot.
- Citer quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles.

Une machine thermique est un dispositif destiné à réaliser une conversion entre travail et chaleur. Le chapitre précédent a mis en lumière la différence fondamentale entre ces deux types d'énergie. Historiquement, les deux principes de la thermodynamique sont le fruit d'une volonté d'amélioration des performances de ces machines thermiques. Nous verrons que leur application à des cas concrets nous donne de précieux renseignements et aiguille sur les modifications à apporter pour les rendre plus efficaces.

I. Cadre d'étude

I.1 Principe général

Cherchant à réaliser des échanges énergétiques de diverses natures, on emploie un **fluide** (air, réfrigérant) qui circule dans des tuyaux et peut :

- être mis en contact avec des milieux de température plus ou moins élevée ou chauffés par l'intermédiaire d'une réaction chimique (modélisés par des **thermostats**) ;
- **recevoir du travail** par le biais d'un compresseur (pour augmenter la pression) ou au contraire en donner en entraînant une hélice ou une turbine.

Les changements d'états sont un très bon moyen de stocker de l'énergie pour la restituer ensuite, d'ailleurs.

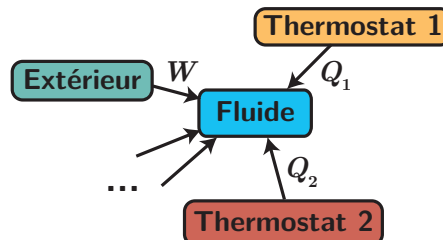
L'état physique des fluides est rarement purement liquide (car difficilement compressible), mais l'intérêt d'utiliser une phase liquide est dû à la plus grande capacité thermique qu'un gaz. En général, des machines thermiques exploiteront les deux états physiques.

Ces machines sont en général **cycliques** : après un régime transitoire, le fluide d'une machine revient exactement dans le même état : ceci est très bien vérifié pour un réfrigérateur (une fuite du réfrigérant entraînant une efficacité moindre, voire un arrêt définitif). Cependant de nombreux moteurs admettent de l'air "frais" : ce sont des systèmes ouverts, étudiés de manière approfondie en deuxième année.

I.2 Principes de la thermodynamique

On peut modéliser les différents échanges d'énergie au cours du cycle d'un fluide de la manière suivante :

- échanges d'énergie sous forme de chaleur Q_i avec des thermostats à la température T_i ;
- échanges de travail tout au long du cycle, noté W .



Selon le signe de W , on distingue deux types de machines :

- les machines **réceptrices** ($W > 0$) telles que les réfrigérateurs ou les pompes à chaleur permettant de réchauffer ou refroidir : elles sont branchées à une source d'énergie électrique qui permet de forcer des transferts thermiques non naturels ;
- les **moteurs** thermiques ($W < 0$) ayant pour but de fournir un travail mécanique à partir d'une source de chaleur par exemple.

I.3 Cas de la machine monotherme

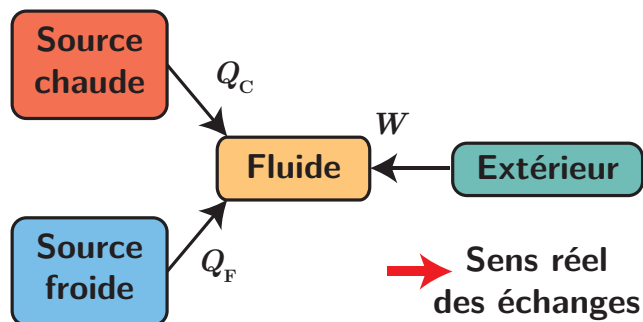
Le cas le plus simple serait de considérer un unique thermostat. Les deux principes donneraient alors pour un cycle $W + Q = 0$ et $\frac{Q}{T} \leq 0$ soit $W \geq 0$. **Une machine monotherme est forcément réceptrice**, par exemple un radiateur électrique convertit intégralement la puissance électrique en pertes par effet Joule. Mais le contraire est impossible, d'après le second principe.

Par la suite on va donc s'intéresser à des machines dithermes, c'est-à-dire dont le fluide peut être en contact avec deux thermostats de température différente, l'un appelé "source chaude" de température T_C et l'autre "source froide" de température T_F .

II. Approche générale des moteurs dithermes

II.1 Construction du moteur "parfait"

a) Échanges d'énergie



Moteur ditherme

b) Description

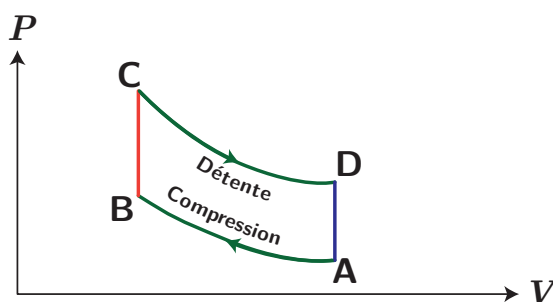
i) Première tentative : cycle de Beau de Rochas

Cherchons maintenant à construire le cycle d'un moteur optimisé, à partir d'un fluide simple qu'est un gaz parfait. Pour échanger du travail avec la machine, il paraît naturel d'employer des **transformations adiabatiques réversibles** (= **isentropiques**) : on échange uniquement du travail et on s'assure de ne pas avoir de pertes du fait d'une irréversibilité mécanique. On effectue donc :

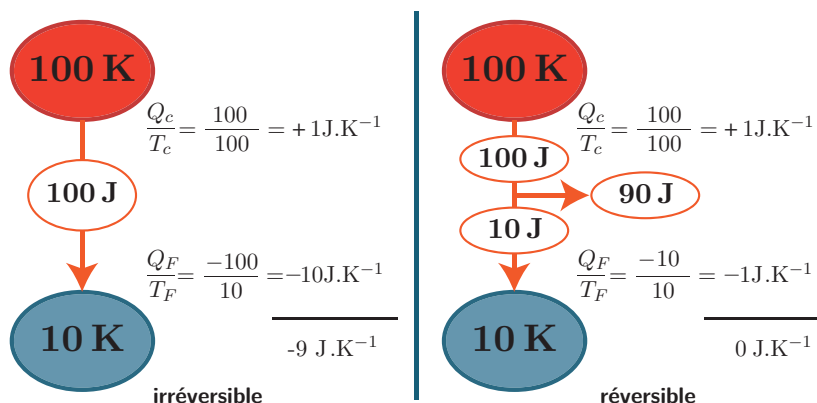
- une compression isentropique au cours de laquelle le fluide reçoit du travail (A-B).
- une détente isentropique au cours de laquelle il en cède (C-D).

Rappelons que le travail fourni par le moteur durant un cycle correspond à l'aire du cycle dans un diagramme en coordonnées P-V. Par conséquent, un cycle parcouru dans le sens horaire est moteur.

Évidemment pour que le travail global soit moteur, la détente doit se faire à plus haute température que la compression, d'où le positionnement des courbes dans le diagramme de Clapeyron. On peut refermer le cycle de plusieurs façons, la plus naturelle étant une évolution **isochore** : on aboutit au cycle dit de Beau de Rochas, où à chaque étape correspond un échange bien précis d'énergie. Il décrit assez bien les moteurs à essence.



Cependant le rendement n'est pas le meilleur car les évolutions isochores ne sont pas réversibles, vu qu'il y a à chaque fois **déséquilibre thermique entre le fluide et les thermostats**. On peut alors chercher à optimiser les pertes vers la source froide. Il faut donc faire en sorte que lors des échanges thermiques avec les thermostats, il n'y ait pas seulement un transfert thermique mais aussi un échange de travail :

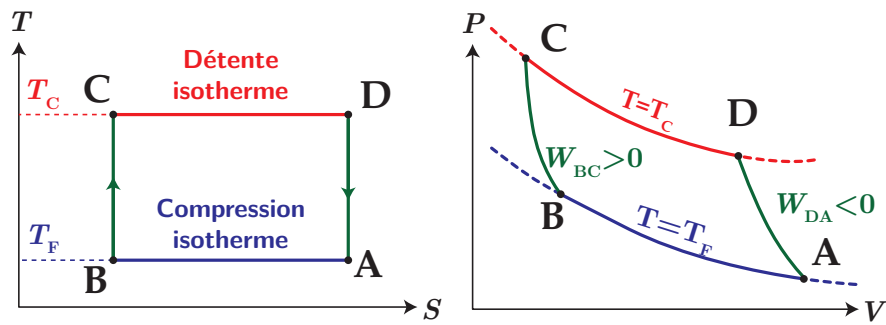


Il est par contre impossible de convertir entièrement l'énergie thermique Q_c en travail, car alors on aurait $Q_c/T_c + S_{\text{créée}} = 0$ avec $Q_c > 0$, donc $S_{\text{créée}} < 0$ lors du cycle.

On constate qu'en diminuant le transfert thermique reçu à la source froide il est possible d'avoir une évolution réversible.

ii) Deuxième tentative : cycle de Carnot

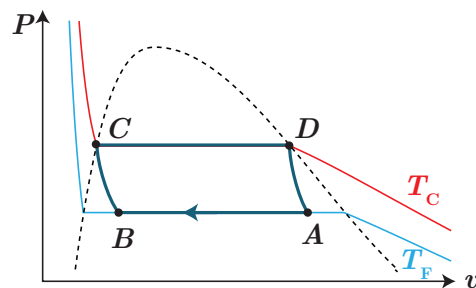
Ci-dessous l'allure du cycle dans les coordonnées T-S et P-V, où l'on constate que les étapes isothermes comportant des échanges de chaleur s'accompagnent maintenant de travail supplémentaire.



Il s'agit du **cycle de Carnot**, cycle idéal pour obtenir un moteur réversible. On montrera en exercice que c'est celui ayant le meilleur rendement.

iii) Exemple de cycle de Carnot avec changement d'état

Il se peut que l'on rencontre des cycles où se produit un changement d'état (souvent partiel). On a alors besoin du diagramme de Clapeyron liquide-vapeur rencontré au chapitre T1, où l'on a représenté les deux isothermes correspondant aux sources chaudes et froides, ainsi que les deux transformations isentropiques :



II.2 Rendement d'un moteur

Les deux premiers principes vont nous permettre de mettre en évidence le fait que le rendement d'un moteur est nécessairement limité :

Démonstration



Théorème de Carnot

Un moteur ditherme fonctionnant entre une source chaude de température T_F et une source froide de température T_C possède un rendement inférieur ou égal à celui d'une machine réversible

$$\eta_{\text{mot}} = \frac{-W}{Q_C} \leq \eta_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Ce rendement ne dépend que des températures des sources, on a donc intérêt à **augmenter le plus possible l'écart de température** entre les deux sources.

Exemple : Prenons le cas d'une turbine de centrale nucléaire : $T_C = 325^\circ\text{C}$ est la température de la vapeur d'eau tandis que la source froide est l'eau d'une rivière à $T_F = 25^\circ\text{C}$.



Il faut mettre les températures en kelvin lors d'une application numérique

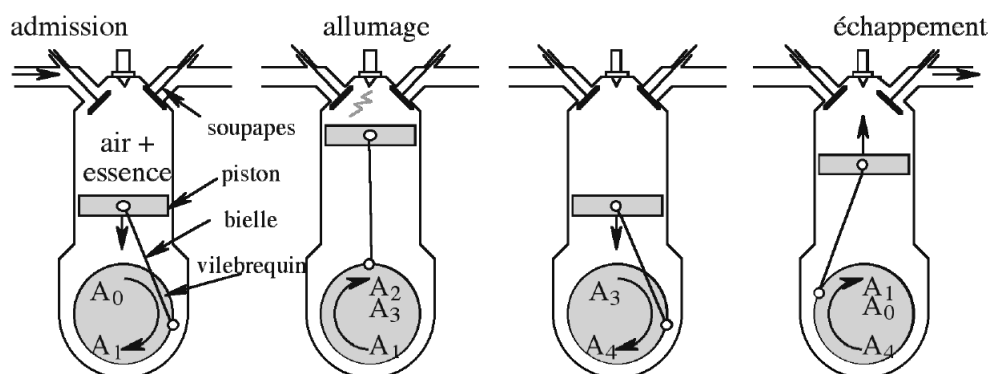
Ici on trouve $\eta_C = 0.5$. En pratique le rendement est plutôt de l'ordre de 30 à 40% en raison des irréversibilités et de diverses pertes.

II.3 Exemple du moteur à essence (4 temps)

Nous avons déjà tracé à peu de choses près le cycle décrivant au mieux le moteur à essence, encore appelé moteur à explosion (car nécessitant une bougie pour provoquer l'inflammation du mélange air-carburant) : c'est le cycle de Beau de Rochas.

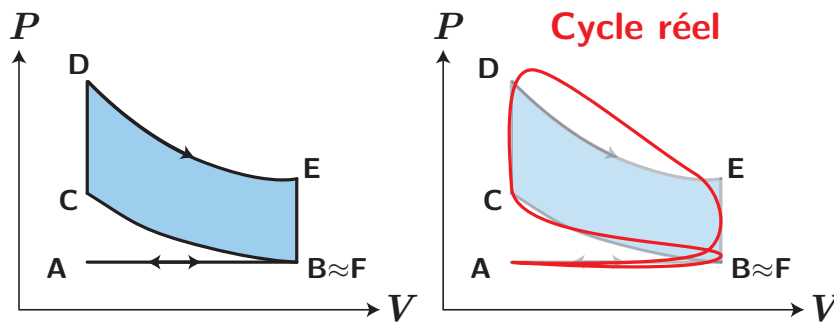
- La source chaude est modélisée par la réaction chimique interne de dégradation d'hydrocarbures (prévus pour supporter une forte compression sans s'enflammer de manière spontanée) majoritairement en CO_2 et en eau ;
- la source froide est modélisée par l'atmosphère extérieure.

D'un point de vue mécanique, la chambre est constituée d'un **piston** qui se translate suite à l'explosion du mélange, la différence de volume entre la position la plus basse et la plus haute constitue la **cylindrée** du moteur. Pour convertir ce mouvement en un mouvement de rotation, le piston est relié à une bielle.



D'un point de vue thermodynamique, on distingue plusieurs transformations (qui ne coïncident pas avec les 4 temps des mécaniciens, à savoir les 4 demi-tours du moteur dont une explosion) :

- premier temps** : admission du mélange air/essence (étape AB) ;
- deuxième temps** : compression, modélisée par une adiabatique réversible (étape BC) ;
- troisième temps** : combustion (isochore CD), suivi d'une détente adiabatique réversible (étape DE) ;
- quatrième temps** : éjection des gaz (ouverture d'une soupape EF) très rapide (donc supposée isochore), suivi d'un refoulement du gaz chaud (FA).



À noter qu'une partie du cycle se déroule avec un système ouvert, que l'on ne peut modéliser cette année. On peut déjà s'attendre à ce que le rendement du moteur soit inférieur à η_C , du fait des transformations isochores. Le calcul donne $\eta_{\text{mot}} = 1 - \left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}} \right)^{\gamma-1}$ avec γ le coefficient adiabatique du gaz parfait. L'intérêt de ces calculs théoriques est que **l'on peut prévoir quels paramètres modifier pour augmenter le rendement** : ici il est judicieux d'augmenter la cylindrée du moteur et diminuer le volume minimal.

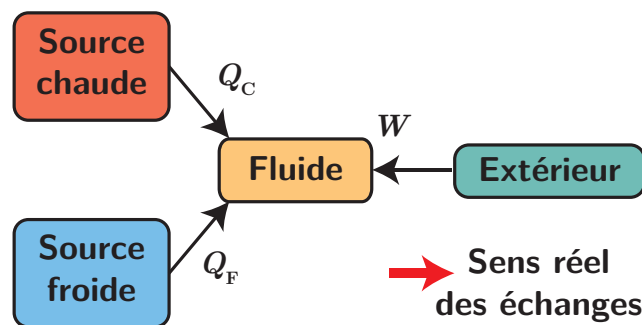
On ne peut pas trop réduire $V_{\min}$ car cela sous-entend que la pression du mélange {air + essence} augmente, et avec cela le risque d'avoir une inflammation brusque et non liée à la bougie !

III. Machines réceptrices

III.1 Principe de fonctionnement

a) Généralités

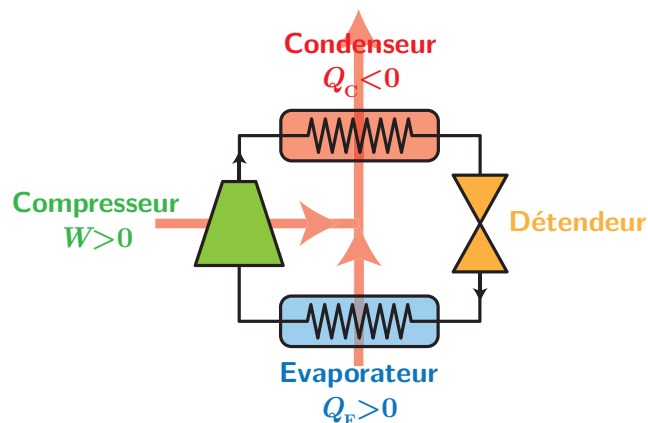
Les systèmes frigorifiques et les pompes à chaleur sont en général des systèmes à condensation, comportant un fluide caloporteur (typiquement le tétrafluoroéthane R-134a) subissant des changements d'états (vaporisation et liquéfaction). Si on reprend le premier principe, avec $W \geq 0$, trois cas se posent pour les transferts de chaleur, mais seul le cas où on prélève de la chaleur à la source froide pour en donner à la source chaude ($Q_c > 0$ et $Q_F < 0$) est utile (les autres cas étant réalisés naturellement).



Récepteur ditherme

b) Étapes de fonctionnement

Il y a 4 étapes fondamentales dans ce type de machine :



On a alors deux types de machines qui peuvent nous intéresser :

- les climatiseurs, réfrigérateurs, etc. où la zone à refroidir est en contact avec l'évaporateur ;
- les pompes à chaleur où la zone à réchauffer est en contact avec le condenseur.

III.2 Efficacité des machines

On définit alors une **efficacité**, l'analogue du rendement pour les machines réceptrices, quantité sans dimension **pouvant être plus grande que 1** (il vaut mieux, d'ailleurs), qui caractérise le rapport entre l'énergie utile prélevée ou apportée et l'énergie électrique apportée au compresseur. Détaillons pour chaque type de fonctionnement :

a) Machine frigorifique



Exercice

Déterminer l'efficacité maximale d'une machine frigorifique.

Dans le cas du réfrigérateur, avec $T_F = 5^\circ\text{C}$ et $T_C = 25^\circ\text{C}$, on a typiquement $e_{C,\text{frig}} = 14$, ce qui est évidemment surévalué du fait des irréversibilités. Néanmoins on peut espérer atteindre une **efficacité**

de l'ordre de quelques unités (jusqu'à 7-8), ce qui signifie concrètement qu'une puissance électrique de 1 kW permet d'extraire quelques kW d'énergie sous forme de chaleur !

b) Pompe à chaleur

On peut effectuer le même raisonnement que précédemment, et l'on aboutit à

$$e_{\text{PAC}} \leq e_{C,\text{PAC}} = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad (4.11)$$

En général, les pompes à chaleur vendues dans le commerce ont une **efficacité comprise entre 2 et 3** (mais cela dépend évidemment de la température de la source froide : par exemple il peut ne pas être approprié d'installer une pompe à chaleur dans le but de chauffer une habitation au Sud de la France).

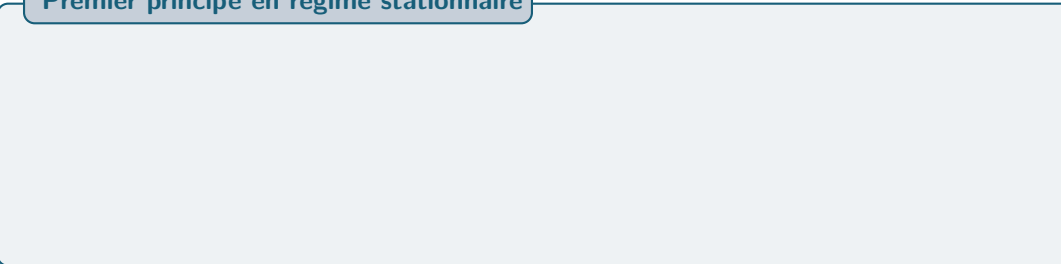
Il va de soi que l'on ne crée pas de l'énergie, on ne fait que la **déplacer d'une source à une autre**, mais avec un coût moindre qu'un chauffage électrique où toute l'énergie apportée est restituée sous forme de chaleur, équivalent donc à une efficacité $e_{\text{chauf}} = 1$!

III.3 Exemple du réfrigérateur (TP-cours)

a) Premier principe en régime stationnaire

Dans de nombreuses installations telles que les pompes à chaleurs ou réfrigérateurs, chaque élément (compresseur, détendeur, etc.) voit du fluide rentrer et sortir, en écoulement stationnaire. Ainsi, on n'a pas de système fermé. On peut alors montrer que le premier principe dans ce cadre vérifie une loi assez simple pour les grandeurs massiques (ou molaires) démontrée en 2e année :

Premier principe en régime stationnaire

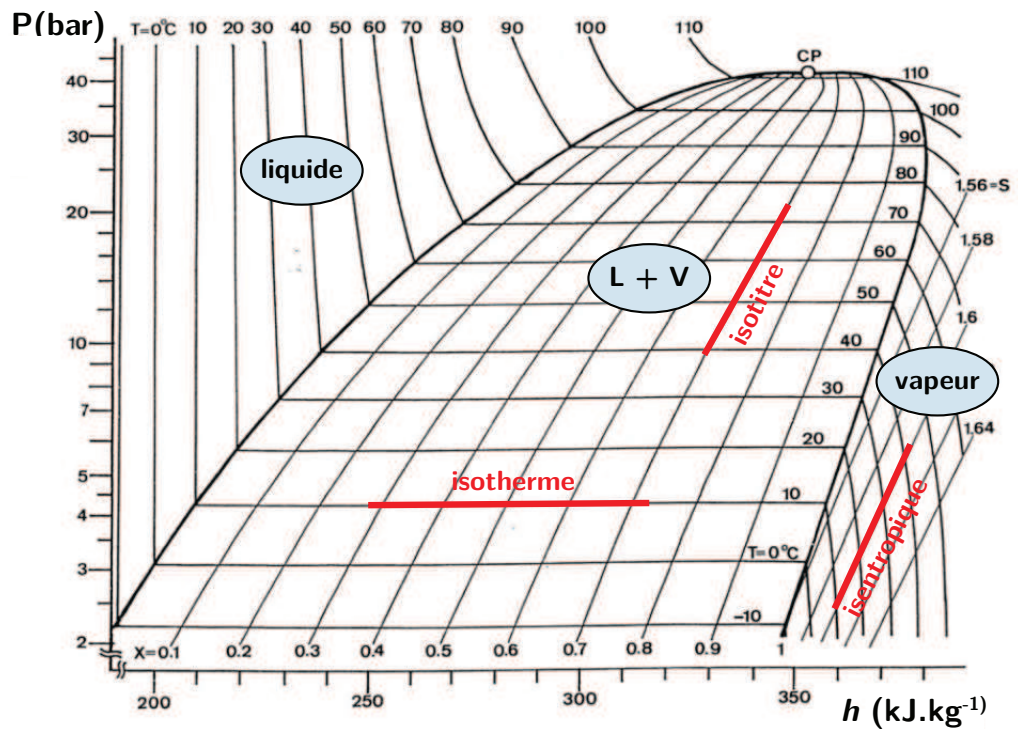


On va l'employer pour le réfrigérateur à partir d'un diagramme expérimental.

b) Diagramme de Mollier

L'étude des machines thermiques repose souvent sur l'utilisation de diagrammes réels de fluide plutôt que des calculs théoriques (faisables surtout pour les gaz, mais difficilement accessible pour les liquides). Ces graphiques répertorient de nombreuses données exploitables lors de transformations. On va regarder de plus près le cycle d'un réfrigérateur à l'aide des informations réelles sur le fluide employé, ici le R134-a.

- L'idée de ce diagramme est de représenter la **pression** du gaz en fonction de l'**enthalpie**, pour différentes températures.
- Comme il y a des changements d'états, la courbe en cloche délimite les différents états possibles, du liquide au mélange liquide-gaz jusqu'au gaz seul.
- Différentes courbes sont observables : les **isothermes**, pour lesquelles la température est constante, les **isotitres** où les proportions liquide-gaz sont identiques le long de la courbe, et les **isentropiques** où les transformations se font à entropie constante (c'est-à-dire des transformations adiabatiques réversibles)

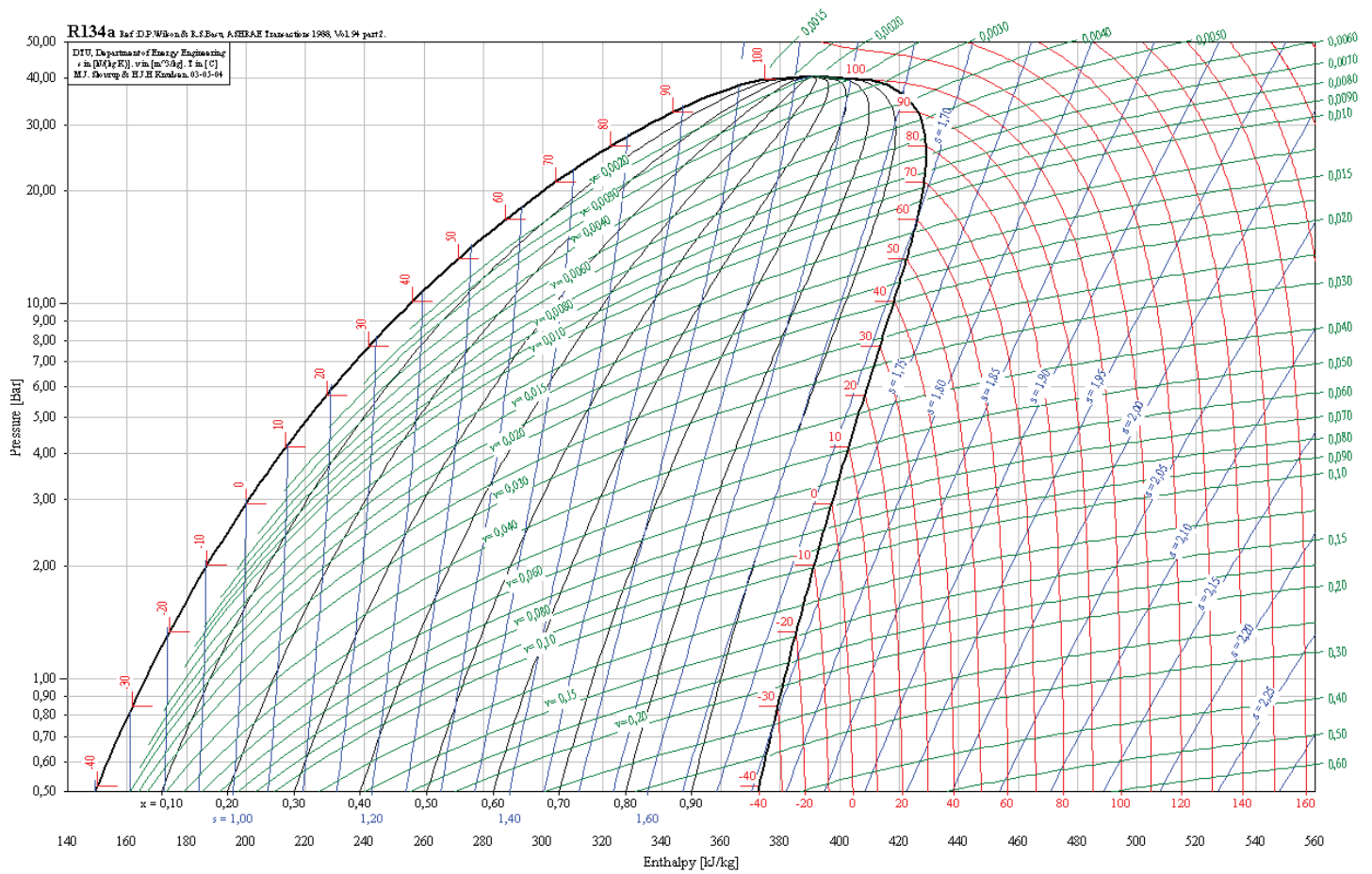


c) Cycle du réfrigérateur

On va reprendre les étapes précédentes, mais en indiquant avec précision comment modéliser les transformations d'un point de vue thermodynamique. Pour toute la suite on va considérer des grandeurs massiques (enthalpie massique, volume massique,...).



En réalité les transformations isobares ne le sont pas complètement, il y a une légère perte de pression, dite perte de charge du fait de la circulation du fluide dans de très longues canalisations (viscosité, coudes, etc.).



Exercices

4.1 Rendement du cycle de Carnot

On considère un cycle thermodynamique pour un gaz parfait de coefficient adiabatique γ , suivant les étapes suivantes, considérées comme réversibles :

- une compression isotherme AB à la température T_1 ;
- une compression adiabatique BC jusqu'à atteindre la température T_2 ;
- une détente isotherme CD à la température T_2 ;
- une détente adiabatique DA .

Les étapes isothermes impliquent un contact thermique avec des thermostats : la source chaude à la température T_2 et la source froide à la température $T_1 < T_2$.

1. Exprimer le rendement de cette machine thermique dont on donnera sa fonction en fonction des échanges thermiques avec la source chaude Q_2 et froide Q_1 .
2. Montrer que le taux de compression $\alpha = \frac{V_A}{V_B}$ est aussi égal à $\frac{V_D}{V_C}$.
3. À l'aide du premier principe, déterminer Q_1 et Q_2 en fonction de la quantité de matière gazeuse n , de T_1 ou T_2 et de α .
4. Montrer alors que le rendement de la machine est égal au rendement de Carnot $\eta_c = 1 - \frac{T_1}{T_2}$.
5. Retrouver ce résultat à l'aide des deux principes de la thermodynamique appliqués au cycle.

4.2 Rendement d'un cycle de Beau de Rochas

En se référant au cycle du cours, montrer que le rendement du cycle de Beau de Rochas s'écrit $\eta = 1 - \left(\frac{V_{\min}}{V_{\max}}\right)^{\gamma-1}$.

4.3 Pompe à chaleur avec un gaz parfait

On cherche à étudier une pompe à chaleur effectuant le cycle suivant, appelé cycle de Joule :

- L'air pris dans l'état A de température T_0 et pression P_0 est comprimé suivant une adiabatique réversible jusqu'au point B où il atteint la pression P_1 ;
- il est ensuite refroidi à pression constante et atteint la température finale de la source chaude T_1 correspondant à l'état C ;
- l'air est encore refroidi dans une turbine suivant une détente adiabatique réversible pour atteindre l'état D de pression P_0 ;
- il se réchauffe enfin à pression constante au contact de la source froide et retrouve son état initial.

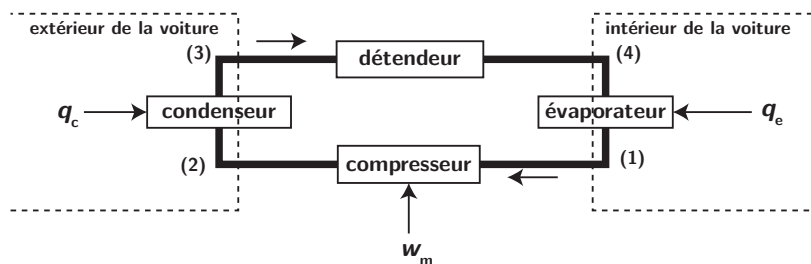
L'air est considéré comme un gaz parfait de rapport des capacités thermiques $\gamma = \frac{7}{5}$ indépendant de la température. On pose $\beta = 1 - \frac{1}{\gamma}$ et $a = \frac{P_1}{P_0}$. On prendra pour les applications numériques $T_0 = 283 \text{ K}$, $T_1 = 298 \text{ K}$, $a = 5$.

1. Représenter le cycle parcouru par le gaz dans un diagramme de Clapeyron.
2. Rappeler les conditions nécessaires pour assurer la validité des formules de Laplace. Donner la formule de Laplace relative à la pression et la température.

3. En déduire l'expression des températures T_B et T_D en fonction de T_0 , T_1 , a et β . Préciser leurs valeurs numériques.
4. Exprimer l'efficacité e de la pompe à chaleur en fonction des transferts thermiques.
5. En déduire l'expression de e en fonction de a et β . Donner sa valeur numérique.
6. Quelles doivent être les transformations du gaz si on fait fonctionner la pompe à chaleur suivant un cycle de Carnot réversible? Quelle est l'efficacité théorique associée?
7. Donner sa valeur numérique et comparer.
8. Déterminer l'expression de l'entropie créée pour une mole d'air au cours du cycle de Joule en fonction de R , β et $x = a\beta \frac{T_0}{T_1}$.
9. Étudier son signe en fonction de x . Était-ce prévisible?
10. Sachant qu'en régime permanent les fuites thermiques s'élèvent à $P_f = 20 \text{ kW}$, calculer la puissance du couple compresseur-turbine qui permet de maintenir la température de la maison constante.

4.4 Climatisation d'une voiture (ATS 2012)

La quasi-totalité des véhicules neufs sont aujourd'hui équipés d'une climatisation. Pour refroidir l'air intérieur du véhicule, un fluide frigorigène, l'hydrofluorocarbène HFC effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur :



Sur le diagramme enthalpique (P, h) fourni à la fin de l'exercice, sont représentées :

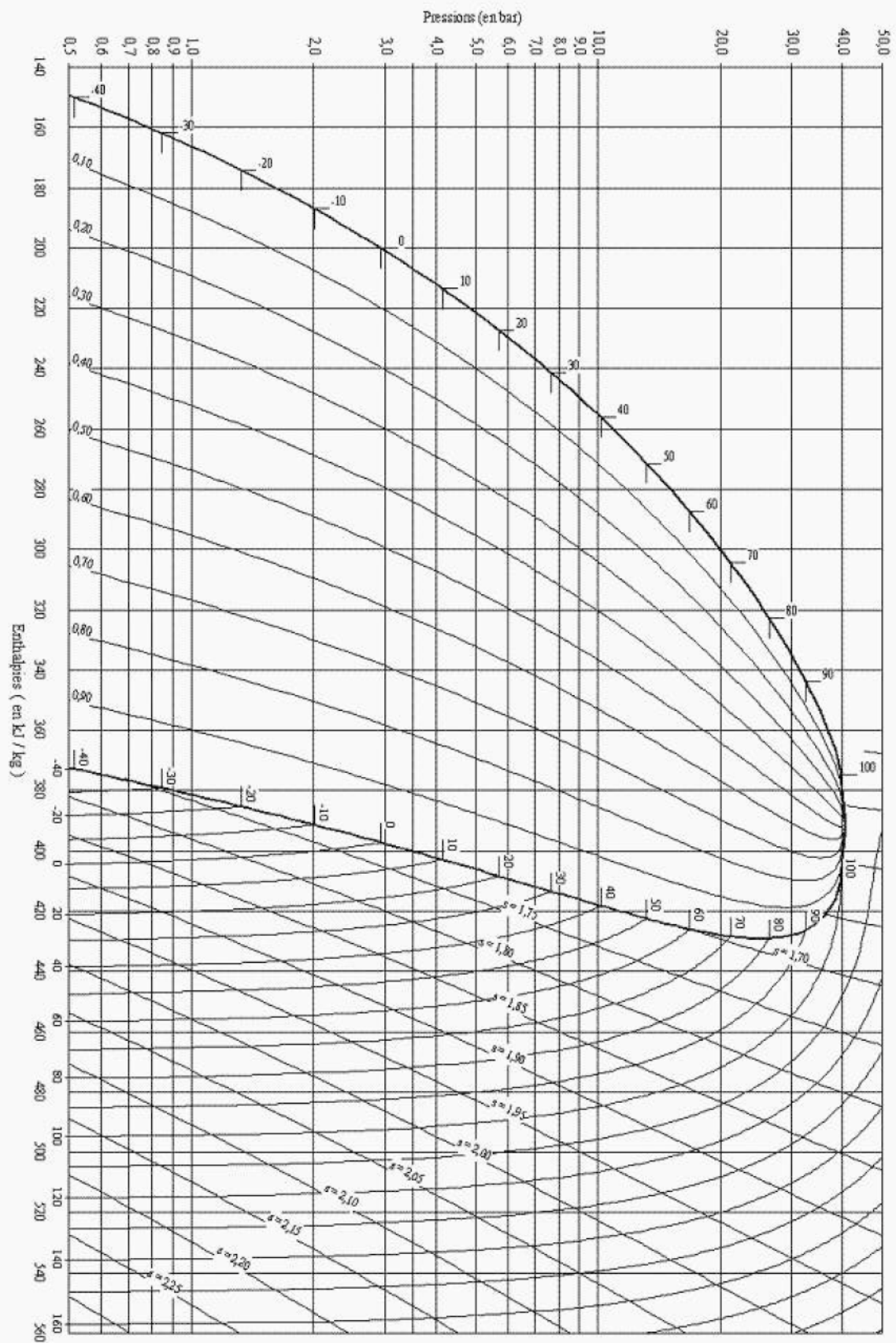
- la courbe de saturation de l'équilibre liquide-vapeur ;
- les isothermes pour des températures comprises entre -40°C et 160°C par pas de 10°C ;
- les isentropiques pour des entropies massiques comprises entre $1,70 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $2,25 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ par pas de $0,05 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$;
- les isotitres en vapeur sous la courbe de saturation pour des titres massiques en vapeur x_G variant de 0 à 1 par pas de 0,1.

1. Où sont sur le diagramme les domaines liquide, vapeur, équilibre liquide-vapeur du fluide?
2. Mettre en évidence chaque type de courbe présentée.

On étudie dans la suite l'évolution du fluide au cours d'un cycle en régime permanent :

- le transfert thermique reçu par le fluide dans l'évaporateur permet la vaporisation isobare complète du fluide venant de (4) et conduit à de la vapeur à température $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et pression $p_1 = 3 \text{ bar}$: point (1) ;
- le compresseur aspire la vapeur (1) et la comprime de façon isentropique avec un taux de compression $r = \frac{p_2}{p_1} = 6$;
- le fluide sortant du compresseur entre dans le condenseur, dans lequel il est refroidi de manière isobare jusqu'à la température $T_3 = 60^\circ\text{C}$: point (3) ;
- le fluide sortant du condenseur est détendu dans le détendeur supposé adiabatique jusqu'à la pression de l'évaporateur p_1 : point (4) ;

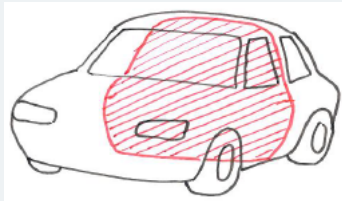
- le passage dans le détendeur le ramène au point (1).
- 3. Placer le point (1) sur le diagramme. Relever la valeur de l'enthalpie massique h_1 et de l'entropie massique s_1 du fluide.
- 4. Placer le point (2) sur le diagramme et relever la valeur de la température T_2 et celle de l'enthalpie massique h_2 en sortie du compresseur.
- 5. Déterminer la valeur du travail mécanique massique w_m reçu par le fluide lors de son passage dans le compresseur. Commenter son signe.
- 6. Placer le point (3) sur le diagramme et relever la valeur de l'enthalpie massique h_3 .
- 7. Montrer que la transformation dans le détendeur est isenthalpique.
- 8. Placer alors le point (4) sur le diagramme et tracer le cycle complet. Relever la valeur de la température T_4 et le titre massique en vapeur x_4 en sortie du détendeur.
- 9. En déduire le transfert thermique massique q_e échangé par le fluide lors de son passage à travers l'évaporateur. Commenter.
- 10. Définir l'efficacité (encore appelé coefficient de performance du climatiseur) et calculer sa valeur.
- 11. Comparer cette valeur à celle d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température de l'évaporateur et la température de liquéfaction du fluide sous la pression p_2 . Commenter le résultat obtenu.
- 12. Le débit massique du fluide est $D_m = 0,1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Calculer la puissance thermique évacuée de l'intérieur du véhicule et la puissance mécanique consommée par le climatiseur.



4.5 Résolution de problème : rendement d'une voiture

Problématique : Estimer le rendement énergétique d'une voiture se déplaçant sans dénivellation à la vitesse constante d'environ $v = 90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Document 1 : résistance de l'air



Pour une voiture, toutes conditions égales par ailleurs (vitesse, température et pression atmosphériques), l'aptitude à la pénétration dans l'air d'un véhicule ne dépend que de deux paramètres : la surface frontale, également appelée maître-couple S , et la traînée, caractérisée par le C_x . Cette dernière dépend de plusieurs phénomènes :

- la forme de l'avant de la carrosserie et du pare-brise, où l'air exerce une pression directe ;
- la forme de la surface de la carrosserie où l'air glisse ;
- les turbulences engendrées par les divers obstacles (encadrements de vitres, rétroviseurs, passages de roues,...) ;
- la pénétration de l'air à l'intérieur de la carrosserie pour alimenter le moteur en oxygène (une puissance de 100 chevaux nécessite pour le moteur une absorption de 60 litres d'air par seconde) ; mais aussi refroidir le ventilateur et ventiler l'habitacle.

Le coefficient de traînée est un nombre sans dimension qui renseigne sur la traînée globale d'un objet quelconque, et est compris entre 0,07 (forme ovoïde) et 1,4 (demi-sphère creuse). Grâce à des méthodes empiriques basées sur des maquettes à petite échelle, le C_x moyen des voitures de tourisme n'a cessé de progresser. Voisin de 0,45 dans les années 60, il est aujourd'hui inférieur à 0,30. C'est un facteur d'autant plus important qu'il influence la consommation moyenne de carburant, en 2014 d'environ 7 L/100km pour une voiture, du fait qu'il gouverne la force de traînée R : $C_x = \frac{2R}{\rho S v^2}$ avec ρ la masse volumique de l'air et v la vitesse du véhicule.

Document 2 : propriétés physico-chimiques de l'essence

Caractéristiques issues de Wikipédia :

- Masse volumique $0,70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;
- Masse molaire moyenne $120 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- Pression de vapeur saturante à 20°C : 1,3 kPa
- Température de fusion $< -60^\circ\text{C}$;
- Température d'ébullition, de 20°C à 200°C ;
- Température d'auto-inflammation : environ 250°C ;
- Pouvoir calorifique inférieur (PCI) ou enthalpie de combustion massique (correspondant à l'énergie thermique libérée par la combustion d'un kg d'essence de manière isobare) $\Delta_{\text{comb}}h = 44,4 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Solubilité dans l'eau : nulle.