Dernière mise à jour: November 1, 2026

🗺️ Parcours sur quatre ans · Année 2, Automne · 🧮 Calculateur intégré

À propos de ce cours

Ce cours gratuit compte 10 unités et 6 travaux pratiques. Ce sont les vrais totaux, pas un programme plus long raccourci.

Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur une page de cours qu’un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.

> Ceci est le plan d’un cours gratuit en autonomie rédigé par Saving Planets. Ce n’est pas un cours universitaire : il ne donne aucun crédit académique et aucun établissement n’y participe.
>
> Son contenu suit un cours de thermodynamique pour ingénieurs d’un semestre de troisième année. Il s’inspire des thèmes et du niveau de MIT 16.050 Thermal Energy et des parties thermodynamiques de MIT Unified Engineering (tous deux gratuits sur MIT OpenCourseWare), ainsi que de cours comme Purdue ME 200 et Georgia Tech ME 3322, en s’appuyant sur les chapitres gratuits d’OpenStax University Physics Volume 2 consacrés à la chaleur et aux principes de la thermodynamique, et sur les données gratuites de propriétés des fluides du NIST, que nous citons lorsqu’ils sont utiles. Aucun de ces auteurs ou établissements n’approuve cette page.
>
> Ce que nous ajoutons : chaque module est relié à des applications réelles avec une source publique citée (rendement des centrales, centrales nucléaires et solaires à concentration, pompes à chaleur, cogénération et géothermie), chaque nombre de la page est recalculé par un script de vérification avant sa mise en ligne, et chaque TP dispose d’une simulation gratuite ou d’une version sûre à faire chez soi.
>
> Suivez-le dans l’ordre. Chaque unité comporte des objectifs, des notions clés, des équations, des exemples pas à pas, des exercices corrigés en détail, des erreurs fréquentes, des cartes mémoire et un quiz. Votre progression est enregistrée uniquement dans ce navigateur.

Comment ce cours aide à sauver la planète

Presque toute l’électricité produite à partir de combustibles, d’uranium, de soleil concentré ou de la chaleur de la Terre provient d’un cycle thermodynamique, et presque tout le chauffage et la climatisation en utilisent un aussi. Le premier principe dit que l’énergie se conserve ; le second dit quelle part peut devenir du travail utile. À eux deux, ils déterminent la quantité de combustible brûlée dans le monde.

De meilleurs cycles, la récupération de chaleur perdue et les pompes à chaleur figurent parmi les moyens les plus rapides de réduire les émissions. Chaque module se termine par une courte section sourcée. Les valeurs qui ne proviennent pas d'une source sont signalées comme valeurs d'exemple.

Pour les enseignants

Vous pouvez enseigner ce cours, ou laisser un élève le faire seul. Il est gratuit. Saving Planets ne donne ni note ni crédit scolaire.

- Cette page est le cours entier : 10 unités et 6 travaux pratiques (ENGR 320).
- Prévoyez 15 semaines, environ 6 à 9 heures par semaine, y compris les semaines de travaux pratiques.
- Suivez le calendrier de 15 semaines. Lisez l'unité, faites les exercices sur papier, puis ouvrez la réponse. La semaine d'un TP, faites le TP ou la version à la maison.
- Un contrôle est un nombre ou un résultat de code sur la page qu'un script recalcule avant publication. Le nombre affiché et le nombre recalculé doivent correspondre.
- Utilisez Imprimer cette page, ou téléchargez le guide d'étude PDF. La feuille de formules est vers la fin.
- Demandez : en quoi cette unité aide-t-elle les gens et la planète ? Chaque unité a un encadré vert avec un fait sourcé.
- Copiez le modèle de guide enseignant et écrivez le nom de votre classe, le temps dont vous disposez et les questions que vous poserez. Ouvrir le modèle de guide enseignant

Avant de commencer

Prérequis

- Analyse II et III : intégrales, dérivées partielles et logarithmes népériens.
- Physique I et Chimie générale I : énergie, travail, gaz parfaits et chaleur.
- Les équations différentielles sont utiles mais pas obligatoires.
- Être à l'aise avec les tableurs pour les tables et l'interpolation.

Comment étudier

- Commencez chaque problème en dessinant le système ou le volume de contrôle et en précisant s'il est fermé ou ouvert, permanent ou non.
- Listez les états connus et cherchez les propriétés avant d'écrire tout bilan.
- Écrivez d'abord le bilan d'énergie en mots (énergie entrante − énergie sortante = variation de l'énergie stockée), puis éliminez les termes que vous pouvez justifier.

- Gardez des unités cohérentes : kJ, kPa, m³, kg et kelvin ; n'utilisez jamais de °C dans un rapport de températures.
- Tracez chaque transformation sur un diagramme T–s ou p–v ; les cycles deviennent bien plus faciles à suivre.
- Faites chaque exercice sur papier avant d'ouvrir la réponse, et refaites les quiz quelques jours plus tard.

Ce qu'il vous faut

- Un ordinateur ou une tablette pour les simulations gratuites PhET Gas Properties, Energy Forms and Changes et States of Matter.
- Un thermomètre de cuisine (ou une sonde numérique bon marché), un verre doseur et une balance de cuisine.
- Une bouilloire électrique de puissance connue, des glaçons, une tasse isotherme ou un gobelet en mousse.
- Le chronomètre d'un téléphone.
- Un tableur pour les TP sur les cycles.

Programme suggéré sur 15 semaines

Environ 6 à 9 heures par semaine : lecture, exercices et, les semaines de TP, le TP.

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
1	Systèmes, propriétés, énergie et rendement	Systèmes, propriétés, température, unités d'énergie, consommation spécifique de chaleur	OpenStax UP2 1.1, 3.1; EIA
2	Corps purs, changement de phase et tables de propriétés	Phases, saturation, titre ; TP A	UP2 1.5, 2.1; NIST WebBook
3	Corps purs, changement de phase et tables de propriétés	Tables de la vapeur, interpolation, gaz parfait	NIST WebBook
4	Transfert d'énergie par travail et chaleur	Travail de frontière, d'arbre et électrique ; modes de transfert de chaleur ; TP D	UP2 3.2, 1.6
5	Le premier principe pour les systèmes fermés	Premier principe pour les systèmes fermés, chaleurs massiques, chaleur latente ; TP B et C	UP2 3.3, 3.5
6	Le premier principe pour les volumes de contrôle : dispositifs en écoulement permanent	Masse et énergie pour les volumes de contrôle ; tuyères, turbines, compresseurs	MIT 16.050

Semaine	Unité	Thèmes	Lecture
7	Le premier principe pour les volumes de contrôle : dispositifs en écoulement permanent	Détendeurs, mélange, échangeurs de chaleur ; entraînement pour le partiel	MIT 16.050
8	Le second principe : moteurs thermiques, réfrigérateurs et limites de Carnot	Second principe, moteurs, pompes à chaleur, Carnot ; TP E	UP2 4.2–4.5
9	Entropie et rendement isentropique	Entropie, inégalité de Clausius, production d'entropie	UP2 4.6–4.7
10	Entropie et rendement isentropique	Transformations et rendements isentropiques	UP2 3.6; NASA Glenn
11	Exergie : quelle part de l'énergie est utile	Exergie, irréversibilité, rendement exergétique	MIT 16.050
12	Cycles moteurs à gaz : Otto, Diesel et Brayton	Cycles Otto et Diesel	NASA Glenn
13	Cycles moteurs à gaz : Otto, Diesel et Brayton	Cycle de Brayton, régénération, cycles combinés	NASA Glenn; MIT Unified
14	Cycles à vapeur et cycles frigorifiques	Cycle de Rankine et ses améliorations	NIST WebBook
15	Cycles à vapeur et cycles frigorifiques	Réfrigération et pompes à chaleur ; TP F ; entraînement pour l'examen final	UP2 4.3

Votre progression

Cochez les unités et les TP à mesure que vous les terminez, et faites les quiz. La progression et les scores sont enregistrés uniquement dans ce navigateur et ne nous sont jamais envoyés.

Unités

Systèmes, propriétés, énergie et rendement

Systèmes fermés, volumes de contrôle et milieu extérieur, propriétés et états, transformations à l’équilibre et quasi statiques, échelles de température et principe zéro, pression, formes d’énergie, unités d’énergie, et rendement comme rapport de la production utile à l’apport nécessaire.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Choisir un système ou un volume de contrôle et sa frontière.
- Distinguer propriétés intensives et extensives, et grandeurs d’état et de chemin.
- Convertir entre kJ, kWh et Btu, et entre °C et K.
- Calculer un rendement, et le rendement d’une centrale à partir de sa consommation spécifique de chaleur.

Notions clés

- Un système est la région étudiée ; un système fermé échange de l’énergie mais pas de masse avec le milieu extérieur, tandis qu’un volume de contrôle (système ouvert) laisse la masse traverser sa frontière.
- Des propriétés comme la pression p, la température T et le volume massique v = V/m décrivent l’état. Les propriétés intensives (p, T, v) ne dépendent pas de la taille ; les extensives (V, m, E) si. Deux propriétés intensives indépendantes fixent l’état d’une substance simple compressible.
- Le principe zéro : deux corps chacun en équilibre thermique avec un troisième sont en équilibre entre eux ; c’est pourquoi les thermomètres fonctionnent. La température absolue T(K) = T(°C) + 273.15 doit être utilisée dans tout rapport et dans toute loi des gaz.
- L’énergie est stockée sous forme d’énergie interne U, d’énergie cinétique ½mV² et d’énergie potentielle mgz, et elle ne traverse une frontière que sous forme de chaleur Q ou de travail W.
- Rendement = production utile ÷ apport nécessaire. Pour les centrales, l’EIA américaine utilise la consommation spécifique de chaleur : Btu de combustible par kWh d’électricité, avec 1 kWh = 3412 Btu.

Équations clés

$$v = \frac{V}{m}, \quad \rho = \frac{1}{v}$$

`v=V/m,\ \ ρ=1v`

Volume massique et masse volumique

$$T(\mathrm{K}) = T(^\circ\mathrm{C}) + 273.15$$

T(K)=T(^ C)+273.15

Température absolue

$$E = U + \tfrac{1}{2}mV^2 + mgz$$

E=U+12mV^2+mgz

Énergie stockée totale

$$\eta = \frac{3412\ \mathrm{Btu/kWh}}{\text{heat rate}}$$

=3412\ Btu/kWheat rate

Rendement d’une centrale à partir de sa consommation spécifique de chaleur (EIA)

Exemples résolus pas à pas

Exemple 1.1 L’EIA donne comme exemples des consommations spécifiques de 10500 Btu/kWh et 7500 Btu/kWh. Trouvez chaque rendement.

1. η = 3412/10,500.
2. η = 3412/7500.

Réponse : 32.5 % et 45.5 % (l’EIA les arrondit à 33 % et 45 %).

Exemple 1.2 Un réservoir contient 2 kg de gaz dans 0.5 m³. Trouvez v et ρ.

1. v = 0.5/2.
2. ρ = 1/v.

Réponse : v = 0.25 m³/kg, ρ = 4 kg/m³.

Exemple 1.3 Une voiture de 1000 kg à 30 m/s freine jusqu’à l’arrêt. Quelle énergie cinétique devient énergie interne des freins, en kJ et en kWh ?

1. KE = ½ × 1000 × 30² = 450,000 J.
2. 450 kJ ÷ 3600 kJ/kWh.

Réponse : 450 kJ = 0.125 kWh.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Convertissez 25 °C en kelvins.

   298.15 K.

2. La température est-elle intensive ou extensive ?

   Intensive.

3. Une centrale a une consommation spécifique de chaleur de 9000 Btu/kWh. Trouvez son rendement.

   3412/9000 = 37.9%.

4. Convertissez 1 MWh en GJ.

   3600 MJ = 3.6 GJ.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La chaleur et la température, c’est la même chose.
En réalité : La température est une propriété ; la chaleur est de l’énergie en transit.

Idée reçue : Un système « contient de la chaleur ».
En réalité : Il contient de l’énergie interne ; la chaleur n’existe qu’en traversant une frontière.

Idée reçue : Les rapports peuvent utiliser des °C.
En réalité : Les lois des gaz et les rendements exigent des kelvins.

Cartes mémoire

Système

Région étudiée.

Volume de contrôle

La masse peut le traverser.

Volume massique

v = V/m.

Principe zéro

Fondement des thermomètres.

Consommation spécifique de chaleur

1 kWh

Btu par kWh.

3600 kJ = 3412 Btu.

Quiz d’autocontrôle

1. Un volume de contrôle permet…

à la masse de traverser sa frontière

aucun transfert d’énergie

uniquement la chaleur

rien

à la masse de traverser sa frontière. Système ouvert.

2. Laquelle est intensive ?

volume

la masse

de la pression

l’énergie

de la pression. Indépendante de la taille.

3. Une consommation spécifique de 6824 Btu/kWh correspond à un rendement de…

25%

50%

68%

100%

50%. 3412/6824.

4. L’énergie traverse la frontière d’un système fermé sous forme de…

la masse

chaleur et travail

la température

de la pression

chaleur et travail. Seulement deux façons.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

L'Energy Information Administration des États-Unis mesure le rendement des centrales par la consommation spécifique de chaleur : l'énergie de combustible qu'une centrale utilise pour livrer un kilowattheure au réseau, en comptant l'électricité que la centrale consomme elle-même pour l'alimentation en combustible, les pompes de chaudière, le refroidissement et la dépollution. Diviser 3412 Btu (l'énergie d'un kWh) par la consommation spécifique donne le rendement ; les exemples de l'EIA sont une centrale à 10500 Btu à environ 33 % et une centrale à 7500 Btu à environ 45 %.

Cet écart est tout l'enjeu de ce cours. Pour la même électricité, la centrale à 7500 Btu brûle 7500/10500 = 71.4 % du combustible, soit environ 28.6 % de combustible et de CO_2 en moins. Les principes de la thermodynamique expliquent où va le reste de l'énergie et comment les ingénieurs en récupèrent une partie.

Sur Saving Planets : Solutions · Circuits

Sources : U.S. EIA: What is the efficiency of different types of power plants? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 1.1 Temperature and thermal equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-1-temperature-and-thermal-equilibrium): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 3.1 Thermodynamic systems (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-1-thermodynamic-systems): Section de manuel gratuite.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Notes du MIT sur l'énergie thermique.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): Page gratuite de la NASA.

J'ai terminé cette unité

Corps purs, changement de phase et tables de propriétés

Phases et changements de phase, température et pression de saturation, liquide comprimé, mélange saturé et vapeur surchauffée, titre, diagrammes T–v et p–v, tables de la vapeur et interpolation, l'équation des gaz parfaits et son domaine de validité, et le facteur de compressibilité.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Identifier la phase à partir de p et T grâce aux données de saturation.
- Utiliser le titre pour trouver v, u et h d'un mélange saturé.
- Interpoler dans les tables de propriétés.
- Utiliser la loi des gaz parfaits et savoir quand elle ne s'applique pas.

Notions clés

- Un corps pur a une composition chimique fixe. À une pression donnée, l'eau bout à une seule température de saturation (99.61 °C à 100 kPa) ; pendant l'ébullition, p et T restent fixes et le titre du mélange x = m_vapor/m_total croît de 0 à 1.
- Pour un mélange saturé, toute propriété massique vaut y = y_f + x(y_g − y_f) = y_f + x·y_fg, avec les valeurs du liquide saturé (f) et de la vapeur saturée (g) tirées des tables.
- Si T est inférieure à la température de saturation à cette pression, l'eau est un liquide comprimé (approximativement du liquide saturé à T) ; si elle est supérieure, c'est de la vapeur surchauffée, donnée dans des tables séparées.
- Interpolation linéaire : $y = y_1 + (x - x_1)(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$. Le WebBook gratuit du NIST fournit les mêmes données pour l'eau et de nombreux fluides frigorigènes.
- À basse pression et haute température par rapport au point critique, les gaz suivent pv = RT avec R = R_u/M ; pour l'air R = 0.287 kJ/(kg·K). Près de la saturation (vapeur dans une chaudière), utilisez plutôt les tables.

Équations clés

$$x = \frac{m_g}{m_f + m_g}$$

```
x=(m_g)/(m_f+m_g)
```

Titre

$$y = y_f + x\, y_{fg}$$

```
y=y_f+x y_fg
```

Propriété d’un mélange saturé

$$pv = RT, \;\; R = \frac{R_u}{M}$$

pv=RT,\ \ R=(R_u)/(M)

Loi des gaz parfaits

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(y_2 - y_1)$$

y=y_1+(x-x_1)/(x_2-x_1)(y_2-y_1)

Interpolation linéaire

Exemples résolus pas à pas

Exemple 2.1 À 100 kPa, h_f = 417.51 et h_fg = 2257.5 kJ/kg, v_f = 0.001043 et v_g = 1.6941 m³/kg (tables de la vapeur). Trouvez h et v pour un titre de 0.6.

1. h = 417.51 + 0.6 × 2257.5.
2. v = 0.001043 + 0.6 × (1.6941 − 0.001043).

Réponse : h = 1772.0 kJ/kg; v = 1.0169 m³/kg.

Exemple 2.2 Trouvez la masse d’air dans un réservoir de 0.5 m³ à 100 kPa et 300 K.

1. m = pV/(RT) = 100 × 0.5/(0.287 × 300).

Réponse : m = 0.581 kg.

Exemple 2.3 Trouvez la pression de 2 kg d’air dans 0.5 m³ à 400 K.

1. p = mRT/V = 2 × 0.287 × 400/0.5.

Réponse : p = 459.2 kPa.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. De l’eau à 100 kPa et 80 °C est…

   Liquide comprimé (80 °C < 99.61 °C).

2. De l’eau à 100 kPa et 150 °C est…

   Vapeur surchauffée.

3. Interpolez h à 25 °C si h = 83.9 à 20 °C et 125.7 à 30 °C (kJ/kg, liquide saturé).

   83.9 + 0.5 × 41.8 = 104.8 kJ/kg.

4. Trouvez R pour l’hélium (M = 4.003 kg/kmol).

   8.314/4.003 = 2.077 kJ/(kg·K).

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La température augmente pendant que l’eau bout.
En réalité : À pression constante, elle reste à T_sat jusqu’à ce que tout le liquide ait disparu.

Idée reçue : La vapeur dans une chaudière est un gaz parfait.
En réalité : Près de la saturation, elle ne l’est pas ; utilisez les tables de la vapeur.

Idée reçue : Le titre s’applique à la vapeur surchauffée.
En réalité : Seulement aux mélanges saturés, $0 \le x \le 1$.

Cartes mémoire

Saturation

Le liquide et la vapeur coexistent à T_sat(p).

Titre

x = m_g/m.

Propriété d’un mélange

y_f + x y_fg.

Liquide comprimé

T < T_sat.

Surchauffée

T > T_sat.

Gaz parfait

pv = RT.

Quiz d’autocontrôle

1. Le titre est…

la masse de vapeur sur la masse totale

la masse de liquide sur la masse totale

un rapport de températures

un rapport de pressions

la masse de vapeur sur la masse totale. x = m_g/m.

2. De l’eau à 100 kPa et 120 °C est…

du liquide comprimé

un mélange saturé

de la vapeur surchauffée

un solide

de la vapeur surchauffée. Au-dessus de T_sat.

3. R pour l’air vaut environ…

8.314

0.287

1.005

4.18

0.287. kJ/(kg·K).

4. Pendant l’ébullition à p constante, T…

augmente

diminue

reste constante

oscille

reste constante. Saturation.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le Department of Energy des États-Unis explique que les réacteurs nucléaires utilisent la chaleur de fission pour produire de la vapeur qui fait tourner une turbine. Tous les réacteurs commerciaux américains sont des réacteurs à eau légère : plus de 65 % sont des réacteurs à eau pressurisée, qui maintiennent l'eau du cœur sous haute pression pour qu'elle ne boue pas et produisent la vapeur dans un échangeur séparé, et environ un tiers sont des réacteurs à eau bouillante, qui produisent la vapeur directement dans la cuve.

Les deux conceptions sont des exercices de ce module : augmenter la pression élève la température de saturation, donc l'eau reste liquide, et le titre et l'enthalpie de la vapeur fixent le travail que reçoit la turbine. Le DOE recense plus de 400 réacteurs commerciaux dans le monde, dont 94 aux États-Unis, tous conçus à l'aide des tables de la vapeur.

Sur Saving Planets : Solutions · Chimie générale I

Sources : U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tables de la vapeur gratuites.
- OpenStax UP2, 1.5 Phase changes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-5-phase-changes): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 2.1 Molecular model of an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/2-1-molecular-model-of-an-ideal-gas): Section de manuel gratuite.
- PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter): Le changement de phase en interactif.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Transfert d’énergie par travail et chaleur

Conventions de signe, travail de frontière et son aire sur un diagramme p–V, transformations isobares, isothermes et polytropiques, travail d’arbre et électrique, et les trois modes de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le travail de frontière pour les transformations courantes.
- Montrer que le travail et la chaleur sont des grandeurs de chemin.
- Calculer le travail et la puissance d’arbre et électriques.
- Estimer les flux de chaleur par conduction et par convection.

Notions clés

- Convention de signe : la chaleur reçue par le système et le travail fourni par le système sont positifs (Q_in, W_out). Ce sont deux grandeurs de chemin : elles dépendent de la transformation, pas seulement des états extrêmes.
- Le travail de frontière W_b = ∫p dV est l’aire sous la courbe de la transformation sur un diagramme p–V. À pression constante, W_b = p(V_2 − V_1).
- Pour un gaz parfait à température constante, W_b = mRT ln(V_2/V_1). Pour une transformation polytropique pV^n = constante (n ≠ 1), W_b = (p_2V_2 − p_1V_1)/(1 − n).
- Travail d’arbre : puissance = couple × vitesse angulaire, $\dot{W}$ = 2πṅT. Travail électrique : W = VIΔt = PΔt.
- La chaleur se transmet par conduction ($\dot{Q}$ = kAΔT/L à travers une paroi), convection ($\dot{Q}$ = hAΔT vers un fluide en mouvement) et rayonnement ($\dot{Q}$ = εσA(T_s^4 − T_{surr}^4)). L’isolation abaisse k ; c’est pourquoi l’enveloppe des bâtiments compte.

Équations clés

$$W_b = \int_1^2 p\,dV$$

```
W_b=_1^2 p dV
```

Travail de frontière

$$W_b = mRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

```
W_b=mRT(V_2)/(V_1)
```

Gaz parfait isotherme

$$W_b = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n}$$

`W_b=(p_2V_2-p_1V_1)/(1-n)`

Transformation polytropique

$$\dot{Q} = \frac{kA\,\Delta T}{L}, \;\; \dot{Q} = hA\,\Delta T$$

`Q=(kA Δ T)/(L),\ \ Q=hA Δ T`

Conduction et convection

Exemples résolus pas à pas

Exemple 3.1 1 kg d'air se détend de façon isotherme à 300 K jusqu'à doubler de volume. Trouvez le travail.

1. W = 1 × 0.287 × 300 × ln 2.

Réponse : W = 59.7 kJ (fourni par le gaz).

Exemple 3.2 De l'air est comprimé de façon polytropique (n = 1.3) de 100 kPa et 0.2 m³ à 0.1 m³. Trouvez p_2 et le travail.

1. p_2 = 100 × 2^1.3 = 246.2 kPa.
2. W = (246.2 × 0.1 − 100 × 0.2)/(1 − 1.3).

Réponse : p_2 = 246.2 kPa ; W = −15.4 kJ (travail reçu par le gaz).

Exemple 3.3 Une paroi de 10 m² de surface, 0.1 m d'épaisseur et k = 0.04 W/(m·K) (isolant d'exemple) subit un écart de 20 K. Trouvez la perte de chaleur.

1. $\dot{Q}$ = 0.04 × 10 × 20/0.1.

Réponse : $\dot{Q}$ = 80 W.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un gaz se détend à 200 kPa constants de 0.5 à 0.8 m^3. Travail ?

   200 × 0.3 = 60 kJ.

2. Un arbre fournit 50 N·m à 3000 tr/min. Puissance ?

   2π × 50 × 50 = 15.7 kW.

3. Un radiateur de 1500 W fonctionne 10 minutes. Travail électrique ?

   1500 × 600 = 900 kJ.

4. Convection : h = 10 W/(m^2·K), A = 2 m^2, ΔT = 30 K. Flux de chaleur ?

   600 W.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le travail est une propriété de l'état.
En réalité : Il dépend du chemin.

Idée reçue : Un réservoir rigide peut fournir un travail de frontière.
En réalité : No; dV = 0.

Idée reçue : Doubler l'épaisseur d'isolant divise la température par deux.
En réalité : Cela divise par deux le flux de conduction pour le même ΔT.

Cartes mémoire

Convention de signe

Q reçue et W fourni positifs.

Travail de frontière

$\int p\,dV$.

Isotherme

$mRT \ln(V_2/V_1)$.

Polytropique

$(p_2V_2 - p_1V_1)/(1 - n)$.

Puissance sur l'arbre

$2\pi \dot{n} T$.

Conduction

$kA\Delta T/L$.

Quiz d'autocontrôle

1. Le travail de frontière est égal à…

$\int V\,dp$

$\int p\,dV$

pV

mRT

$\int p\,dV$. L’aire sous la courbe p–V.

2. Le travail isotherme d’un gaz parfait vaut…

$mRT \ln(V_2/V_1)$

$p\,\Delta V$

$mc_v\Delta T$

0

$mRT \ln(V_2/V_1)$. pV = const.

3. La chaleur et le travail sont…

des propriétés

des grandeurs de chemin

toujours égaux

intensifs

des grandeurs de chemin. Ils dépendent de la transformation.

4. Le flux de chaleur par conduction est proportionnel à…

1/k

L

$\Delta T/L$

T^4

$\Delta T/L$. $kA\Delta T/L$.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le Department of Energy des États-Unis explique que le solaire thermodynamique à concentration utilise des miroirs pour concentrer la lumière du soleil sur un récepteur, chauffant un fluide à haute température. Cette chaleur fait tourner une turbine ou alimente un moteur pour produire de l'électricité, et elle peut aussi servir l'industrie, du dessalement à l'agroalimentaire et à la chimie.

Le DOE note que les centrales de grande taille utilisent des tours solaires ou des rangées de miroirs linéaires, tandis que les systèmes parabole/moteur produisent chacun 5 à 25 kilowatts. Chacun d'eux est un problème de transfert de chaleur et de travail : absorber le rayonnement concentré, limiter les pertes par conduction et convection du récepteur, et transformer la chaleur en travail d'arbre.

Sur Saving Planets : Solutions · Physique II

Sources : U.S. DOE: Concentrating solar-thermal power basics (https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 3.2 Work, heat and internal energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-2-work-heat-and-internal-energy): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 1.6 Mechanisms of heat transfer (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-6-mechanisms-of-heat-transfer): Section de manuel gratuite.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Cours sur le travail et la chaleur.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): Le transfert d'énergie en interactif.

Regarder le cours magistral

Lecture 2: Work, heat, first law (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-2-work-heat-first-law/) (en anglais)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d'utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Le premier principe pour les systèmes fermés

Bilan d’énergie des systèmes fermés, énergie interne et enthalpie, chaleurs massiques des gaz parfaits, des liquides et des solides, chauffage à volume constant et à pression constante, chaleur latente, et bilans d’énergie des cycles.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Écrire et appliquer Q − W = ΔU + ΔKE + ΔPE.
- Utiliser c_v et c_p pour les gaz parfaits, et c pour les liquides et les solides.
- Inclure la chaleur latente dans les problèmes de changement de phase.
- Montrer que pour un cycle la chaleur nette est égale au travail net.

Notions clés

- Premier principe pour un système fermé : Q − W = ΔE = ΔU + ΔKE + ΔPE. En général ΔKE et ΔPE sont négligeables, donc Q − W = ΔU.
- Enthalpie h = u + pv. À pression constante, la chaleur apportée est égale à la variation d’enthalpie : Q = m(h_2 − h_1), car le travail de frontière y est déjà inclus.
- Pour les gaz parfaits, u et h ne dépendent que de T : Δu = c_vΔT, Δh = c_pΔT, avec c_p − c_v = R et k = c_p/c_v (1.4 pour l’air).
- Pour les liquides et les solides c_p ≈ c_v = c, donc Q = mcΔT. Fondre ou bouillir à T constante demande de la chaleur latente : Q = m h_if ou m h_fg.
- Sur un cycle complet, le système revient à son état initial, donc ΔU = 0 et Q_net = W_net. C’est le fondement de tout moteur et de tout réfrigérateur.

Équations clés

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

`Q-W=Δ U+Δ KE+Δ PE`

Premier principe, système fermé

$$h = u + pv$$

`h=u+pv`

Enthalpie

$$\Delta u = c_v \Delta T,\ \Delta h = c_p \Delta T,\ c_p - c_v = R$$

Δ u=c_vΔ T,\ Δ h=c_pΔ T,\ c_p-c_v=R

Chaleurs massiques des gaz parfaits

$$Q = mc\Delta T, \;\; Q = m\,h_{fg}$$

Q=mcΔ T,\ \ Q=m h_fg

Chaleur sensible et chaleur latente

Exemples résolus pas à pas

Exemple 4.1 2 kg d'air dans un réservoir rigide sont chauffés de 300 K à 400 K. Trouvez Q.

1. W = 0 (rigide).
2. Q = m c_v ΔT = 2 × 0.718 × 100.

Réponse : Q = 143.6 kJ.

Exemple 4.2 Le même air est chauffé à pression constante (100 kPa) de 300 à 400 K. Trouvez Q et le travail de frontière.

1. Q = m c_p ΔT = 2 × 1.005 × 100.
2. W = mRΔT = 2 × 0.287 × 100.

Réponse : Q = 201.0 kJ ; W = 57.4 kJ ; ΔU = 143.6 kJ dans les deux cas.

Exemple 4.3 Trouvez la chaleur nécessaire pour chauffer 1 kg d'eau de 20 °C à 100 °C, puis pour en vaporiser 0.1 kg.

1. Q_1 = 1 × 4.18 × 80.
2. Q_2 = 0.1 × 2257.

Réponse : Q_1 = 334.4 kJ; Q_2 = 225.7 kJ.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Faire fondre 0.2 kg de glace à 0 °C. Chaleur ?

   0.2 × 334 = 66.8 kJ.

2. Trouvez $c_p - c_v$ pour l'air.

   1.005 − 0.718 = 0.287 kJ/(kg·K) = R.

3. Un cycle reçoit 500 kJ de chaleur et en rejette 300 kJ. Travail net ?

   200 kJ.

4. Trouvez k pour l'air.

   1.005/0.718 = 1.40.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Apporter de la chaleur élève toujours la température.
En réalité : Pas pendant un changement de phase.

Idée reçue : $Q = mc_p\Delta T$ s'applique à un réservoir rigide.
En réalité : Utilisez c_v quand le volume est constant.

Idée reçue : L'enthalpie est une forme de chaleur.
En réalité : C'est une propriété, u + pv.

Cartes mémoire

Premier principe

$Q - W = \Delta U$.

Enthalpie

$h = u + pv$.

Δu d'un gaz parfait

$c_v\Delta T$.

Δh d'un gaz parfait

$c_p\Delta T$.

Chaleur latente

$Q = m\, h_{fg}$.

Cycle

$Q_{net} = W_{net}$.

Quiz d'autocontrôle

1. Pour un réservoir fermé rigide, Q est égale à...

ΔH

ΔU

W

0

ΔU. Pas de travail de frontière.

2. $c_p - c_v$ pour un gaz parfait vaut…

k

R

1

c_v

R. Relation de Mayer.

3. Sur un cycle, ΔU vaut…

positif

négatif

zéro

Q

zéro. Même état initial et final.

4. À pression constante, Q est égale à…

ΔU

ΔH

W

pV

ΔH. h = u + pv.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE indique que les pompes à chaleur progressent vite : en 2020, plus de 17 millions de logements américains en étaient équipés, et elles représentent désormais plus de la moitié des ventes d'équipements de chauffage résidentiel aux États-Unis. Elles fonctionnent comme un réfrigérateur, utilisant l'électricité pour déplacer la chaleur d'un espace froid vers un espace chaud au lieu de produire de la chaleur.

Le premier principe explique pourquoi c'est important : un radiateur électrique à résistance transforme chaque kWh d'électricité en exactement un kWh de chaleur, mais une pompe à chaleur fournit l'électricité plus la chaleur qu'elle prélève à l'extérieur. Selon le DOE, les pompes à chaleur air modernes peuvent réduire la consommation d'électricité de 50 % par rapport aux chaudières et aux convecteurs, et le passage à une pompe à chaleur peut éviter jusqu'à 7.6 tonnes d'émissions de carbone par an selon l'équipement remplacé.

Sur Saving Planets : Solutions · Analyse II

Sources : U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 3.3 First law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-3-first-law-of-thermodynamics): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 3.5 Heat capacities of an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-5-heat-capacities-of-an-ideal-gas): Section de manuel gratuite.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): Page gratuite de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Notes sur le premier principe.

Regarder le cours magistral

Lecture 1: State of a system, 0th law, equation of state (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-1-state-of-a-system-0th-law-equation-of-state/) (en anglais)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d'utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Lien fourni uniquement pour l'étude gratuite ; Saving Planets n'est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Le premier principe pour les volumes de contrôle : dispositifs en écoulement permanent

Bilans de masse et d'énergie pour les volumes de contrôle, travail de transvasement et enthalpie, dispositifs en écoulement permanent (tuyères et diffuseurs, turbines et compresseurs, pompes, vannes de détente, chambres de mélange et échangeurs de chaleur), et introduction au remplissage en régime transitoire.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Écrire les bilans de masse et d'énergie en écoulement permanent.
- Expliquer pourquoi l'enthalpie apparaît pour les écoulements.
- Analyser tuyères, turbines, compresseurs, détendeurs et échangeurs de chaleur.
- Choisir quels termes négliger pour chaque dispositif.

Notions clés

- Bilan de masse : en écoulement permanent, Σṁ_in = Σṁ_out, avec ṁ = ρAV.
- Pousser un fluide à travers une frontière demande un travail de transvasement pv par unité de masse ; l'ajouter à u donne l'enthalpie h, ce qui explique pourquoi les bilans des systèmes ouverts utilisent h.
- Équation de l'énergie en écoulement permanent, une entrée et une sortie : $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}[(h_2 - h_1) + (V_2^2 - V_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)]$.
- Raccourcis par dispositif : les tuyères échangent de l'enthalpie contre de la vitesse ($\dot{Q} = \dot{W} = 0$) ; les turbines et compresseurs sont quasi adiabatiques avec $\dot{W} = \dot{m}(h_1 - h_2)$; les vannes de détente conservent $h_1 = h_2$; les échangeurs ont $\dot{W} = 0$ et la chaleur perdue par un fluide est égale à celle gagnée par l'autre.
- Attention aux unités : l'énergie cinétique en J/kg doit être divisée par 1000 pour s'ajouter à une enthalpie en kJ/kg.

Équations clés

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

```
m_in= m_out
```

Bilan de masse en régime permanent

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\left[\Delta h + \frac{\Delta V^2}{2} + g\Delta z\right]$$

Q- W= m[Δ h+(Δ V^2)/(2)+gΔ z]

Équation de l'énergie en écoulement permanent

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

W_turb= m(h_1-h_2)

Turbine adiabatique

$$h_1 = h_2$$

h_1=h_2

Vanne de détente

Exemples résolus pas à pas

Exemple 5.1 De l'air entre lentement dans une tuyère adiabatique à 400 K et en sort à 350 K. Trouvez la vitesse de sortie.

1. Δh = c_pΔT = 1.005 × 50 = 50.25 kJ/kg = 50,250 J/kg.
2. V_2 = √(2 × 50,250).

Réponse : V_2 = 317.0 m/s.

Exemple 5.2 De la vapeur traverse une turbine adiabatique à 5 kg/s de h_1 = 3116.1 à h_2 = 2403.0 kJ/kg. Trouvez la puissance.

1. Ẇ = 5 × (3116.1 − 2403.0).

Réponse : Ẇ = 3565.5 kW ≈ 3.57 MW.

Exemple 5.3 Un compresseur adiabatique fait passer 1.2 kg/s d'air de 300 K à 450 K. Trouvez la puissance absorbée.

1. Ẇ_in = ṁc_pΔT = 1.2 × 1.005 × 150.

Réponse : 180.9 kW.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. De l'eau à 0.5 kg/s est chauffée de 15 à 45 °C dans un échangeur. Flux de chaleur ?

   0.5 × 4.18 × 30 = 62.7 kW.

2. De la vapeur est laminée depuis h = 2800 kJ/kg. h en sortie ?

   2800 kJ/kg.

3. Convertissez une variation de vitesse de 0 à 100 m/s en kJ/kg.

   $100^2/2$ = 5000 J/kg = 5 kJ/kg.

4. Un tuyau a $\dot{m}$ = 2 kg/s en entrée. En sortie, en régime permanent ?

   2 kg/s.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : La puissance d'une turbine utilise u.
En réalité : Les écoulements utilisent h, qui inclut le travail de transvasement.

Idée reçue : Un détendeur abaisse l'enthalpie.
En réalité : h reste constante ; p et généralement T diminuent.

Idée reçue : L'énergie cinétique est toujours négligeable.
En réalité : Pas dans les tuyères et les diffuseurs.

Cartes mémoire

Masse en régime permanent

$\dot{m}$ entrant = $\dot{m}$ sortant.

Travail de transvasement

pv par kg.

SFEE

$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\Delta(h + V^2/2 + gz)$.

Turbine

$\dot{m}(h_1 - h_2)$.

Détendeur

$h_1 = h_2$.

Échangeur de chaleur

Chaleur perdue = chaleur gagnée.

Quiz d’autocontrôle

1. Pour une vanne de détente…

$h_1 = h_2$

$T_1 = T_2$

$p_1 = p_2$

$W > 0$

$h_1 = h_2$. Pas de travail, pas de chaleur, ΔKE faible.

2. L’enthalpie apparaît dans les systèmes ouverts à cause…

du travail de transvasement

le frottement

la gravité

du rayonnement

du travail de transvasement. $h = u + pv$.

3. Une tuyère convertit…

la vitesse en enthalpie

l’enthalpie en vitesse

le travail en chaleur

la masse en énergie

l’enthalpie en vitesse. Elle accélère l’écoulement.

4. La puissance d’une turbine adiabatique est…

$\dot{m}(h_1 - h_2)$

$\dot{m}(h_2 - h_1)$

$\dot{Q}$

0

$\dot{m}(h_1 - h_2)$. La chute d'enthalpie.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE décrit le cœur d'une centrale nucléaire comme une chaîne de dispositifs en écoulement permanent : la fission chauffe l'eau, un échangeur de chaleur (dans les réacteurs à eau pressurisée) produit de la vapeur dans une boucle séparée, la vapeur fait tourner une turbine reliée à un alternateur, et la vapeur restante est condensée puis pompée pour être réchauffée.

Chaque bloc est une équation de l'énergie en écoulement permanent. Les centrales géothermiques, qui selon le DOE font remonter un fluide chaud par des puits et convertissent sa chaleur en vapeur qui entraîne des turbines, utilisent les mêmes dispositifs avec la chaleur de la Terre comme source. Tirer quelques kJ de plus par kg de chaque étage de turbine, c'est ainsi que le rendement d'une centrale progresse.

Sur Saving Planets : Solutions · Aérodynamique I

Sources : U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 3.4 Thermodynamic processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-4-thermodynamic-processes): Section de manuel gratuite.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Cours sur les volumes de contrôle.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Données sur la vapeur.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Notes sur l'écoulement permanent.

Regarder le cours magistral

Lecture 2: Work, heat, first law (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-2-work-heat-first-law/) (en anglais)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licence : CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Conditions d’utilisation (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Lien fourni uniquement pour l’étude gratuite ; Saving Planets n’est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Le second principe : moteurs thermiques, réfrigérateurs et limites de Carnot

Réservoirs thermiques, moteurs thermiques et rendement thermique, réfrigérateurs, pompes à chaleur et COP, les énoncés de Kelvin–Planck et de Clausius, transformations réversibles et irréversibles, le cycle de Carnot, et les limites de Carnot sur le rendement et le COP.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer le rendement thermique et le COP.
- Énoncer les énoncés de Kelvin–Planck et de Clausius.
- Identifier les sources d'irréversibilité.
- Utiliser les limites de Carnot pour juger si un dispositif annoncé est possible.

Notions clés

- Un moteur thermique reçoit Q_H d'un réservoir chaud, rejette Q_L vers un réservoir froid et produit W = Q_H − Q_L. Rendement thermique η = W/Q_H = 1 − Q_L/Q_H.
- Kelvin–Planck : aucun cycle ne peut transformer en travail toute la chaleur d'un seul réservoir, donc η < 100 %. Clausius : la chaleur ne passe pas d'elle-même du froid au chaud ; un réfrigérateur ou une pompe à chaleur a besoin d'un apport de travail.
- COP_R = Q_L/W pour un réfrigérateur ; COP_HP = Q_H/W = COP_R + 1 pour une pompe à chaleur. Le COP peut être bien supérieur à 1, c'est pourquoi les pompes à chaleur battent les radiateurs à résistance.
- Les irréversibilités (frottement, transfert de chaleur sous un ΔT fini, détente non freinée, mélange) dégradent les performances. Un cycle réversible entre deux réservoirs, le cycle de Carnot, est le meilleur possible.
- Les limites de Carnot utilisent les températures absolues : η_Carnot = 1 − T_L/T_H, COP_R,Carnot = T_L/(T_H − T_L), COP_HP,Carnot = T_H/(T_H − T_L).

Équations clés

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

`=(W)/(Q_H)=1-(Q_L)/(Q_H)`

Rendement thermique

$$COP_R = \frac{Q_L}{W},\ COP_{HP} = \frac{Q_H}{W}$$

`COP_R=(Q_L)/(W),\ COP_HP=(Q_H)/(W)`

Coefficients de performance

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

`_Carnot=1-(T_L)/(T_H)`

Rendement de Carnot

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

`COP_HP,Carnot=(T_H)/(T_H-T_L)`

Pompe à chaleur de Carnot

Exemples résolus pas à pas

Exemple 6.1 Un moteur reçoit 1000 kJ de chaleur et produit 350 kJ de travail. Trouvez η et Q_L.

1. η = 350/1000.
2. Q_L = 1000 − 350.

Réponse : η = 35%; Q_L = 650 kJ.

Exemple 6.2 Trouvez le rendement de Carnot entre 800 K et 300 K, et entre 1073 K et 293 K.

1. 1 − 300/800.
2. 1 − 293/1073.

Réponse : 62.5 % et 72.7 %.

Exemple 6.3 Une pompe à chaleur maintient une maison à 294 K quand il fait 273 K dehors. Trouvez le COP de Carnot, et la chaleur fournie par un appareil réel de COP = 3 (valeur d'exemple) consommant 3 kWh.

1. COP = 294/(294 − 273).
2. Q_H = 3 × 3.

Réponse : COP_Carnot = 14.0 ; l'appareil réel fournit 9 kWh de chaleur.

Exercices

Faites chacun d’abord sur papier, puis vérifiez.

1. Un réfrigérateur a COP_R = 2.5 et extrait 500 kJ. Travail ?

   200 kJ.

2. Trouvez COP_HP si COP_R = 2.5.

   3.5.

3. Un réfrigérateur fonctionne entre 275 K et 298 K. COP_R de Carnot ?

   275/23 = 11.96.

4. Un inventeur annonce un rendement de 70 % entre 600 K et 300 K. Est-ce possible ?

   Non : la limite de Carnot est 50 %.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Un COP supérieur à 1 viole la conservation de l’énergie.
En réalité : La pompe à chaleur déplace la chaleur ; elle ne la crée pas.

Idée reçue : Le rendement de Carnot peut utiliser des °C.
En réalité : Il faut utiliser des kelvins.

Idée reçue : Une meilleure ingénierie peut atteindre 100 % de rendement.
En réalité : Kelvin–Planck l’interdit.

Cartes mémoire

Rendement

W/Q_H.

COP_R

Q_L/W.

COP_HP

Q_H/W.

Kelvin–Planck

Pas de moteur à 100 %.

Clausius

Carnot

Pas de passage du froid au chaud sans travail. 1 − T_L/T_H.

Quiz d’autocontrôle

1. Le rendement de Carnot entre 600 K et 300 K est…

25%

50%

75%

100%

50%. 1 − 0.5.

2. COP_HP − COP_R est égal à…

0

1

η

T_H

1. Q_H = Q_L + W.

3. Quel énoncé interdit un moteur au rendement de 100 % ?

Clausius

Kelvin–Planck

Principe zéro

Premier principe

Kelvin–Planck. L’énoncé à un seul réservoir.

4. Laquelle est une irréversibilité ?

le frottement

une compression quasi statique

une détente isentropique

aucune

le frottement. Dissipation.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE décrit les pompes à chaleur comme déplaçant la chaleur au lieu de la produire, ce qui les rend nettement plus efficaces que le chauffage traditionnel. Les pompes à chaleur air modernes peuvent réduire la consommation d'électricité de 50 % par rapport aux chaudières et aux convecteurs, et les pompes à chaleur géothermiques, qui exploitent la température stable du sol peu profond, peuvent réduire la consommation d'énergie de 30 % à 60 %.

Le COP de Carnot explique ces deux affirmations : plus l'écart de température T_H − T_L est petit, plus le COP est élevé. Le sol reste plus doux que l'air d'hiver, donc une pompe à chaleur géothermique élève la chaleur sur un écart plus faible. Le bureau géothermie du DOE estime possible jusqu'à 28 millions de pompes à chaleur géothermiques d'ici 2050.

Sur Saving Planets : Solutions · Océans

Sources : U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 4.2 Heat engines (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-2-heat-engines): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 4.5 The Carnot cycle (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-5-the-carnot-cycle): Section de manuel gratuite.
- NASA Glenn: Carnot cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/carnot.html): Page gratuite de la NASA.

Regarder le cours magistral

The Second Law of Thermodynamics and Carnot's Engine (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-23) (en anglais)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Conditions d’utilisation (https://oyc.yale.edu/terms). Lien fourni uniquement pour l’étude gratuite ; Saving Planets n’est ni affilié à cette université ni soutenu par elle.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Entropie et rendement isentropique

L’inégalité de Clausius, l’entropie comme propriété, le principe d’augmentation de l’entropie et la production d’entropie, les relations T ds, la variation d’entropie des liquides, des solides et des gaz parfaits, les transformations isentropiques, les diagrammes T–s, et les rendements isentropiques des turbines, compresseurs et tuyères.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer les variations d’entropie des liquides, des solides et des gaz parfaits.
- Trouver la production d’entropie et décider si une transformation est possible.
- Utiliser les relations isentropiques des gaz parfaits.
- Appliquer les rendements isentropiques aux dispositifs réels.

Notions clés

- L’entropie S est une propriété définie par dS = δQ_rev/T. Pour toute transformation, $S_2 - S_1 \geq \int \delta Q/T$; la différence est l’entropie produite, S_gen ≥ 0 (nulle seulement si la transformation est réversible).
- Principe d’augmentation de l’entropie : l’entropie d’un système isolé (système plus milieu extérieur) ne diminue jamais. Une transformation avec S_gen < 0 est impossible.
- Relations T ds : T ds = du + p dv = dh − v dp. Pour les liquides et les solides $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$; pour les gaz parfaits $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)$.
- Une transformation isentropique (adiabatique réversible) d’un gaz parfait à chaleurs massiques constantes vérifie $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{((k-1)/k)}$. Sur un diagramme T–s c’est une droite verticale, et l’aire sous une transformation réversible est la chaleur échangée.
- Les dispositifs réels sont comparés aux dispositifs isentropiques : $\eta_T = (h_1 - h_2a)/(h_1 - h_2s)$ pour les turbines et $\eta_C = (h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$ pour les compresseurs.

Équations clés

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}, \;\; S_{gen} \geq 0$$

dS= Q_revT,\ \ S_gen0

L’entropie et le second principe

$$\Delta s = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Δ s=c(T_2)/(T_1)

Liquides et solides

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

`Δ s=c_p(T_2)/(T_1)-R(p_2)/(p_1)`

Gaz parfait

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}$$

`(T_2)/(T_1)=((p_2)/(p_1))^(k-1)/k`

Gaz parfait isentropique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 7.1 Trouvez la variation d'entropie de 2 kg d'eau chauffés de 293 K à 353 K.

1. ΔS = 2 × 4.18 × ln(353/293).

Réponse : ΔS = 1.557 kJ/K.

Exemple 7.2 De l'air passe de 300 K et 100 kPa à 500 K et 400 kPa. Trouvez Δs.

1. Δs = 1.005 ln(500/300) − 0.287 ln(400/100).

Réponse : Δs = 0.1155 kJ/(kg·K).

Exemple 7.3 De l'air à 300 K est comprimé avec un rapport de pression de 8. Trouvez la température de sortie isentropique et la température réelle si η_C = 0.85.

1. T_2s = 300 × 8^(0.4/1.4) = 543.4 K.
2. T_2a = 300 + (543.4 − 300)/0.85.

Réponse : T_2s = 543.4 K; T_2a = 586.4 K.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. 1000 kJ de chaleur passent d'un réservoir à 800 K à un réservoir à 300 K. S_gen ?

1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.

2. T_2 isentropique pour un rapport de pression de 10 à partir de 300 K ?

   579.2 K.

3. S_gen peut-elle être négative ?

   Non ; cette transformation est impossible.

4. Que représente l'aire sous une courbe T–s réversible ?

   La chaleur échangée.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L'entropie ne peut jamais diminuer.
En réalité : L'entropie d'un système peut baisser s'il cède de la chaleur ; celle d'un système isolé, non.

Idée reçue : Adiabatique signifie isentropique.
En réalité : Seulement si c'est aussi réversible.

Idée reçue : Le rendement isentropique peut dépasser 1.
En réalité : Pas pour les turbines ni les compresseurs.

Cartes mémoire

Entropie

$dS = \delta Q_{rev}/T$.

S_gen

≥ 0.

Δs d'un liquide

$c \ln(T_2/T_1)$.

Δs d'un gaz parfait

$c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)$.

T isentropique

$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{((k-1)/k)}$.

η_T

$(h_1 - h_{2a})/(h_1 - h_{2s})$.

Quiz d'autocontrôle

1. S_gen pour une transformation réversible vaut…

positif

zéro

négatif

infinie

zéro. Aucune irréversibilité.

2. Une transformation isentropique sur un diagramme T–s est…

horizontale

verticale

diagonale

circulaire

verticale. s constante.

3. Δs d'un liquide chauffé vaut…

$c \ln(T_2/T_1)$

$c\Delta T$

$R \ln(p_2/p_1)$

0

$c \ln(T_2/T_1)$. Incompressible.

4. Le rendement isentropique d'un compresseur est…

$(h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$

$(h_2a - h_1)/(h_2s - h_1)$

h_2/h_1

1

$(h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$. Le travail idéal sur le travail réel.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

La page de NASA Glenn sur le cycle de Brayton décrit une turbine à gaz sur un diagramme T–s : idéalement, le compresseur élève la pression et la température de façon isentropique, selon une droite verticale, mais en réalité la ligne de compression penche vers la droite car l'entropie augmente dans l'écoulement. La combustion a lieu à pression constante, et la turbine, sur le même arbre, entraîne le compresseur.

La NASA note que l'aire enclose sur le diagramme T–s est proportionnelle au travail utile. Chaque parcelle d'entropie produite dans un compresseur ou une turbine réduit cette aire ; des rendements isentropiques plus élevés signifient donc plus d'électricité ou de poussée pour le même combustible, et moins de CO_2.

Sur Saving Planets : Aérodynamique I · Analyse III

Sources : NASA Glenn: Turbine engine thermodynamic cycle (Brayton cycle) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html)

Ressources d'apprentissage gratuites

- OpenStax UP2, 4.6 Entropy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-6-entropy): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 4.7 Entropy on a microscopic scale (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-7-entropy-on-a-microscopic-scale): Section de manuel gratuite.
- NASA Glenn: Entropy (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/entropy.html): Page gratuite de la NASA.
- OpenStax UP2, 3.6 Adiabatic processes for an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-6-adiabatic-processes-for-an-ideal-gas): Section de manuel gratuite.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Exergie : quelle part de l’énergie est utile

État mort et milieu extérieur, exergie (disponibilité) de la chaleur et des écoulements, travail réversible et irréversibilité, destruction d’exergie I = T_0S_gen, rendement exergétique, et pourquoi il importe d’adapter la qualité de l’énergie à son usage.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Calculer l’exergie de la chaleur fournie par un réservoir.
- Relier l’exergie détruite à l’entropie produite.
- Calculer le rendement exergétique.
- Expliquer pourquoi la cogénération et les pompes à chaleur utilisent bien l’exergie.

Notions clés

- L’exergie est le travail utile maximal que l’on peut obtenir pendant qu’un système atteint l’équilibre avec le milieu extérieur (l’état mort, T_0 et p_0). L’énergie se conserve ; l’exergie est détruite par les irréversibilités.
- La chaleur Q fournie par un réservoir à T a pour exergie X = Q(1 − T_0/T) : la chaleur à haute température a de la valeur, la chaleur proche de la température ambiante ne vaut presque rien pour produire du travail.
- Exergie d’un écoulement par unité de masse : ψ = (h − h_0) − T_0(s − s_0) + V^2/2 + gz.
- Exergie détruite (irréversibilité) I = T_0S_gen (Gouy–Stodola). Chaque irréversibilité coûte du travail utile.
- Rendement exergétique η_II = η_th/η_rev pour les moteurs, ou COP/COP_rev pour les pompes à chaleur. Brûler du combustible à 2000 K simplement pour chauffer de l’eau à 60 °C gaspille l’essentiel de l’exergie ; utiliser pour cela la chaleur perdue d’une centrale ne la gaspille pas.

Équations clés

$$X_Q = Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

```
X_Q=Q(1-(T_0)/(T))
```

Exergie de la chaleur

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

```
=(h-h_0)-T_0(s-s_0)+(V^2)/(2)+gz
```

Exergie d’écoulement

$$I = T_0 S_{gen}$$

`I=T_0S_gen`

Exergie détruite

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{rev}}$$

`_II=_th_rev`

Rendement exergétique

Exemples résolus pas à pas

Exemple 8.1 Trouvez l'exergie de 100 kJ de chaleur issus d'une source à 600 K avec T_0 = 300 K.

1. X = 100 × (1 − 300/600).

Réponse : 50 kJ.

Exemple 8.2 1000 kJ passent de 800 K à 300 K (T_0 = 300 K). Trouvez l'exergie détruite.

1. S_gen = 1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.
2. I = 300 × 2.083.

Réponse : I = 625 kJ, soit toute l'exergie que la chaleur avait à 800 K.

Exemple 8.3 Un moteur de rendement η = 35 % fonctionne entre 800 K et 300 K. Trouvez η_II.

1. η_rev = 62.5 %.
2. η_II = 0.35/0.625.

Réponse : η_II = 56%.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Exergie de 100 kJ à 330 K avec T_0 = 300 K ?

   100 × (1 − 300/330) = 9.09 kJ.

2. Une pompe à chaleur a un COP de 3 ; COP_rev = 14. η_II ?

   3/14 = 21.4%.

3. Pourquoi la chaleur à température ambiante ne vaut-elle presque rien pour produire du travail ?

   Son facteur d'exergie $1 - T_0/T$ est proche de zéro.

4. Qu'est-ce qui détruit l'exergie ?

   Toute irréversibilité : frottement, mélange, transfert de chaleur sous un ΔT fini.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : L'énergie et l'exergie sont la même chose.
En réalité : L'énergie se conserve ; l'exergie est détruite.

Idée reçue : Un rendement énergétique élevé signifie un bon procédé.
En réalité : Une chaudière à gaz de rendement 95 % peut avoir un faible rendement exergétique.

Idée reçue : L'exergie ne dépend que du système.
En réalité : Elle dépend aussi du milieu extérieur (T_0, p_0).

Cartes mémoire

Exergie

Travail utile maximal.

Exergie de la chaleur

$Q(1 - T_0/T)$.

État mort

T_0, p_0.

Irréversibilité

$I = T_0 S_{gen}$.

η_II

η/η_{rev}.

Qualité de l'énergie

Une T élevée a de la valeur.

Quiz d'autocontrôle

1. L'exergie détruite est égale à…

$T_0 S_{gen}$

Q

W

ΔU

$T_0 S_{gen}$. Gouy–Stodola.

2. L'exergie de la chaleur à $T = T_0$ vaut…

Q

zéro

infinie

Q/2

zéro. $1 - T_0/T = 0$.

3. η_{II} compare la performance réelle avec…

la limite réversible

zéro

100%

le premier principe

la limite réversible. Rendement exergétique.

4. L'état mort est…

l'équilibre avec le milieu extérieur

le zéro absolu

le point critique

le vide

l'équilibre avec le milieu extérieur. T_0, p_0.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le DOE explique que la cogénération produit de l'électricité et du chauffage ou du refroidissement utiles à partir d'un seul combustible, sur le lieu d'utilisation ou à proximité, en récupérant la chaleur qui serait sinon perdue lors de la production d'électricité. Selon le DOE, la cogénération peut raisonnablement atteindre 65 % à 75 % de rendement, contre une moyenne nationale d'environ 50 % lorsque l'électricité et la chaleur sont produites séparément.

L'exergie explique ce gain : la partie à haute température de l'exergie du combustible produit l'électricité, et la chaleur de basse qualité qu'une centrale rejetterait couvre des besoins de chauffage qui n'ont jamais exigé que de l'énergie à faible exergie. Passer de 50 % à 75 % signifie les mêmes services avec deux tiers du combustible.

Sur Saving Planets : Solutions · Météo spatiale

Sources : U.S. DOE: Combined heat and power basics (https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-basics)

Ressources d'apprentissage gratuites

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Cours sur la disponibilité.
- OpenStax UP2, 4.1 Reversible and irreversible processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-1-reversible-and-irreversible-processes): Section de manuel gratuite.
- OpenStax UP2, 4.4 Statements of the second law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-4-statements-of-the-second-law-of-thermodynamics): Section de manuel gratuite.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Notes sur le second principe.

☐ **J'ai terminé cette unité**

Cycles moteurs à gaz : Otto, Diesel et Brayton

Hypothèses de l’air standard, pression moyenne effective, le cycle Otto (allumage commandé), le cycle Diesel (allumage par compression), le cycle de Brayton des turbines à gaz et des turboréacteurs, rapport de travail de compression, régénération, refroidissement intermédiaire et réchauffage, et cycles combinés.

Objectifs d’apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Analyser les cycles Otto et Diesel idéaux.
- Analyser le cycle de Brayton idéal, y compris le rapport de travail de compression.
- Expliquer comment le rapport volumétrique et le rapport de pression augmentent le rendement.
- Décrire la régénération et les cycles combinés.

Notions clés

- Hypothèses de l’air standard : le fluide de travail est de l’air, gaz parfait, en cycle fermé ; la combustion est remplacée par un apport de chaleur et l’échappement par un rejet de chaleur. L’air standard froid ajoute des chaleurs massiques constantes à température ambiante.
- Cycle Otto : compression isentropique, apport de chaleur à volume constant, détente isentropique, rejet de chaleur à volume constant. η_Otto = 1 − 1/r^(k−1), avec le rapport volumétrique r = V_max/V_min.
- Cycle Diesel : la chaleur est apportée à pression constante ; avec le rapport d’injection r_c, η_Diesel = 1 − (1/r^(k−1))·(r_c^k − 1)/(k(r_c − 1)). Les diesels fonctionnent à r plus élevé, donc ils sont plus efficaces en pratique.
- Cycle de Brayton (turbines à gaz) : compression isentropique, apport de chaleur à pression constante, détente isentropique, rejet de chaleur à pression constante. η_Brayton = 1 − 1/r_p^((k−1)/k). Une grande part du travail de la turbine entraîne le compresseur (le rapport de travail de compression).
- La régénération utilise les gaz d’échappement chauds pour préchauffer l’air comprimé ; le refroidissement intermédiaire et le réchauffage rapprochent le cycle de Carnot. Un cycle combiné envoie l’échappement de la turbine à gaz vers un cycle à vapeur (Rankine).

Équations clés

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

```
_Otto=1-1r^k-1
```

Cycle Otto

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)}$$

`_Diesel=1-1r^k-1(r_c^k-1)/(k(r_c-1))`

Cycle Diesel

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

`_Brayton=1-1r_p^(k-1)/k`

Cycle de Brayton

$$r_{bw} = \frac{w_{comp}}{w_{turb}}$$

`r_bw=_compw_turb`

Rapport de travail de compression

Exemples résolus pas à pas

Exemple 9.1 Trouvez le rendement à l'air standard froid des cycles Otto avec r = 8 et r = 10.

1. 1 − 8^(−0.4).
2. 1 − 10^(−0.4).

Réponse : 56.5 % et 60.2 %.

Exemple 9.2 Un cycle Diesel a r = 18 et r_c = 2. Trouvez η.

1. 1/r^0.4 = 0.3147.
2. (2^1.4 − 1)/(1.4 × 1) = 1.1703.
3. η = 1 − 0.3147 × 1.1703.

Réponse : η = 63.2%.

Exemple 9.3 Un cycle de Brayton idéal a r_p = 8, une entrée à 300 K et une entrée de turbine à 1300 K. Trouvez T_2, T_4, les travaux du compresseur et de la turbine, le rapport de travail de compression, le travail net et η.

1. T_2 = 300 × 8^0.2857 = 543.4 K; T_4 = 1300/1.8114 = 717.7 K.

2. $w_c = 1.005 \times 243.4 = 244.7$ kJ/kg; $w_t = 1.005 \times 582.3 = 585.3$ kJ/kg.
3. $r_{bw} = 244.7/585.3$; $w_{net} = 340.6$ kJ/kg ; $\eta = 1 - 8^{(-0.2857)}$.

Réponse : $r_{bw} = 0.418$, $w_{net} = 340.6$ kJ/kg, $\eta = 44.8$ %.

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Rendement de Brayton à $r_p = 12$?

   $1 - 12^{(-0.2857)} = 50.8\%$.

2. Pourquoi les moteurs Diesel sont-ils plus efficaces que les moteurs à essence en pratique ?

   Ils fonctionnent à des rapports volumétriques bien plus élevés.

3. Porter r de 8 à 10 dans un cycle Otto ajoute combien de points ?

   $60.2 - 56.5 = 3.7$ points.

4. Que fait la régénération ?

   Elle utilise la chaleur d'échappement pour préchauffer l'air du compresseur, ce qui réduit le combustible nécessaire.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Une compression plus forte signifie toujours des moteurs réels plus efficaces.
En réalité : Le cliquetis limite les moteurs à allumage commandé.

Idée reçue : Le travail de compression est négligeable dans les turbines à gaz.
En réalité : Souvent 40–80 % du travail de la turbine.

Idée reçue : Le rendement à l'air standard est le rendement réel.
En réalité : Les moteurs réels font bien moins à cause du frottement, des pertes de chaleur et des gaz réels.

Cartes mémoire

Air standard	Otto
Air, gaz parfait, cycle fermé.	$1 - 1/r^{(k-1)}$.

Diesel

Apport de chaleur à p constante.

Brayton

1 − 1/r_p^((k−1)/k).

Travail de compression

w_c/w_t.

Régénération

L’échappement préchauffe l’air.

Quiz d’autocontrôle

1. Le rendement Otto dépend…

du rapport volumétrique

du seul type de combustible

la vitesse scalaire

du rapport d’injection

du rapport volumétrique. 1 − 1/r^(k−1).

2. Dans le cycle de Brayton, la chaleur est apportée à … constante

volume

de la pression

la température

entropie

de la pression. Chambre de combustion.

3. Le rapport de travail de compression est…

w_c/w_t

w_t/w_c

η

r_p

w_c/w_t. Compresseur sur turbine.

4. Un cycle combiné associe Brayton à…

Otto

Rankine

Diesel

Carnot

Rankine. Cycle vapeur en aval.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

NASA Glenn explique que le cycle de Brayton est utilisé dans tous les moteurs à turbine à gaz, turboréacteurs, turbosoufflantes ou turbopropulseurs, et qu'ils ont tous un compresseur, une chambre de combustion et une turbine qui entraîne le compresseur. Le programme EngineSim de la NASA utilise l'analyse du cycle de Brayton pour prédire la poussée et le débit de carburant d'un moteur.

Les turbines à gaz terrestres suivent le même cycle. Les exemples de consommation spécifique de l'EIA montrent pourquoi la conception du cycle compte : 7500 Btu/kWh correspond à environ 45 % de rendement, contre environ 33 % à 10500 Btu/kWh. Augmenter le rapport de pression et la température d'entrée de turbine, et récupérer la chaleur d'échappement, permettent aux centrales de se rapprocher du meilleur chiffre.

Sur Saving Planets : Aérodynamique I · Introduction à l'ingénierie aérospatiale

Sources : NASA Glenn: Turbine engine thermodynamic cycle (Brayton cycle) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html) · U.S. EIA: What is the efficiency of different types of power plants? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NASA Glenn: Brayton cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html): Page gratuite de la NASA.
- NASA Glenn: Otto cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/otto.html): Page gratuite de la NASA.

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Cours sur les cycles.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Notes sur les cycles de propulsion.

- [ ] **J’ai terminé cette unité**

Cycles à vapeur et cycles frigorifiques

Le cycle de Rankine idéal et ses quatre dispositifs, le travail de la pompe, l'amélioration du rendement (pression et température de chaudière plus élevées, pression de condenseur plus basse, resurchauffe, régénération), le cycle frigorifique à compression de vapeur et les pompes à chaleur, les fluides frigorigènes, et la cogénération.

Objectifs d'apprentissage

À la fin de cette unité, vous saurez :

- Analyser un cycle de Rankine idéal avec les tables de la vapeur.
- Expliquer comment la pression, la surchauffe et la resurchauffe modifient le rendement.
- Analyser un cycle frigorifique idéal à compression de vapeur.
- Relier le COP du cycle aux performances d'une pompe à chaleur.

Notions clés

- Cycle de Rankine idéal : pompe (compression isentropique du liquide), chaudière (chauffage à pression constante jusqu'à la vapeur surchauffée), turbine (détente isentropique), condenseur (condensation à pression constante).
- Le travail de la pompe est faible car le liquide a un faible v : w_p ≈ v(p_2 − p_1). Travail net = w_turb − w_pump ; η = w_net/q_in.
- Le rendement augmente avec une température moyenne d'apport de chaleur plus élevée (pression de chaudière plus haute, plus de surchauffe, resurchauffe) et une pression de condenseur plus basse. La régénération par réchauffeurs d'eau d'alimentation préchauffe l'eau avec de la vapeur soutirée à la turbine.
- Réfrigération à compression de vapeur : compresseur (jusqu'à la vapeur surchauffée), condenseur (rejette Q_H), détendeur (laminage, h_3 = h_4), évaporateur (absorbe Q_L). COP_R = (h_1 − h_4)/(h_2 − h_1).
- Une pompe à chaleur est le même cycle utilisé pour chauffer, avec COP_HP = (h_2 − h_3)/(h_2 − h_1). Les fluides frigorigènes sont choisis pour leurs propriétés de saturation, leur sécurité et leur faible potentiel de réchauffement global.

Équations clés

$$w_p = v(p_2 - p_1)$$

`w_p=v(p_2-p_1)`

Travail de la pompe

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{q_{in}}$$

=_t-w_pq_in

Rendement de Rankine

$$COP_R = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

COP_R=(h_1-h_4)/(h_2-h_1)

COP d'un réfrigérateur

$$h_3 = h_4$$

h_3=h_4

Détendeur

Exemples résolus pas à pas

Exemple 10.1 Un cycle de Rankine idéal fonctionne entre 3 MPa/350 °C et 75 kPa. Tables de la vapeur : h_1 = 384.44, v_1 = 0.001037 m³/kg, h_3 = 3116.1, h_4 = 2403.0 kJ/kg. Trouvez w_p, q_in, w_net et η.

1. w_p = 0.001037 × (3000 − 75) = 3.03 kJ/kg; h_2 = 387.47.
2. q_in = 3116.1 − 387.47 = 2728.6 kJ/kg.
3. w_net = (3116.1 − 2403.0) − 3.03 = 710.1 kJ/kg ; η = 710.1/2728.6.

Réponse : w_p = 3.03 kJ/kg, q_in = 2728.6 kJ/kg, w_net = 710.1 kJ/kg, η = 26.0 %.

Exemple 10.2 Un cycle à compression de vapeur a h_1 = 244.5, h_2 = 275.4 et h_3 = h_4 = 95.5 kJ/kg (valeurs d'exemple). Trouvez q_L, w_in et COP_R.

1. q_L = 244.5 − 95.5 = 149.0 kJ/kg.
2. w = 275.4 − 244.5 = 30.9 kJ/kg.
3. COP = 149.0/30.9.

Réponse : q_L = 149.0 kJ/kg, w = 30.9 kJ/kg, COP_R = 4.82.

Exemple 10.3 Pour ce cycle utilisé en pompe à chaleur, trouvez COP_HP.

1. q_H = 275.4 − 95.5 = 179.9 kJ/kg.
2. COP_HP = 179.9/30.9.

Réponse : COP_HP = 5.82 (= COP_R + 1).

Exercices

Faites chacun d'abord sur papier, puis vérifiez.

1. Dans l'exemple de Rankine, quelle est la chaleur rejetée ?

   2403.0 − 384.44 = 2018.6 kJ/kg.

2. Quelle fraction du travail de la turbine la pompe utilise-t-elle ?

   3.03/713.1 = 0.425%.

3. Trouvez le débit de vapeur pour 100 MW nets dans l'exemple.

   100,000/710.1 = 140.8 kg/s.

4. Pourquoi abaisser la pression du condenseur aide-t-il ?

   Cela abaisse la température de rejet de chaleur.

Idées reçues fréquentes

Idée reçue : Le travail de la pompe dans un cycle de Rankine est important.
En réalité : Il est minime car le liquide est presque incompressible.

Idée reçue : Le détendeur fournit du travail.
En réalité : C'est un organe de laminage : h constante, pas de travail.

Idée reçue : Plus de surchauffe aide toujours, sans limite.
En réalité : Les matériaux de la turbine limitent la température.

Cartes mémoire

Rankine

Pompe, chaudière, turbine, condenseur.

Travail de la pompe

$v(p_2 - p_1)$.

Resurchauffe

Élève la T moyenne d'apport de chaleur, échappement plus sec.

Compression de vapeur

Compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur.

COP_R

$(h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$.

Détendeur

$h_3 = h_4$.

Quiz d’autocontrôle

1. Dans un cycle de Rankine, la chaleur est apportée dans…

la pompe

la chaudière

la turbine

le condenseur

la chaudière. Pression constante.

2. Le travail de la pompe vaut environ…

v Δp

c_pΔT

h_fg

exactement zéro

v Δp. Liquide incompressible.

3. En réfrigération, Q_L est absorbée dans…

le condenseur

l’évaporateur

le compresseur

le détendeur

l’évaporateur. Côté froid.

4. COP_HP moins COP_R vaut…

0

1

η

2

1. q_H = q_L + w.

Refaire ce quiz

Comment cela aide à sauver la planète

Le bureau géothermie du DOE explique que les centrales géothermiques font remonter un fluide chaud par des puits et convertissent sa chaleur en vapeur qui entraîne des turbines, un cycle de la famille de Rankine dont la chaudière est la Terre. Les centrales géothermiques peuvent fonctionner pratiquement 24 heures par jour quelle que soit la météo, et l'analyse du DOE voit un potentiel de 90 gigawatts d'électricité géothermique aux États-Unis d'ici 2050 si les coûts de la géothermie stimulée baissent.

Les centrales nucléaires utilisent le même cycle de Rankine, et l'article du DOE sur les pompes à chaleur décrit le cycle à compression de vapeur à l'envers : faire entrer la chaleur dans les logements en hiver et la faire sortir en été. De meilleurs cycles de Rankine et frigorifiques sont la source d'une grande partie de l'électricité propre et du chauffage efficace de demain.

Sur Saving Planets : Solutions · Observation de la Terre

Sources : U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics) · U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

Ressources d'apprentissage gratuites

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tables de la vapeur et des fluides frigorigènes.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): Section de manuel gratuite.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Cours sur les cycles à vapeur.

- NASA Glenn: Second law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo2.html): Page gratuite de la NASA.

☐ **J’ai terminé cette unité**

Exercices

Ces exercices sont dans chaque unité. Faites-les sur papier, puis ouvrez la réponse.

1. Systèmes, propriétés, énergie et rendement
   4 exercices
2. Corps purs, changement de phase et tables de propriétés
   4 exercices
3. Transfert d’énergie par travail et chaleur
   4 exercices
4. Le premier principe pour les systèmes fermés
   4 exercices
5. Le premier principe pour les volumes de contrôle : dispositifs en écoulement permanent
   4 exercices
6. Le second principe : moteurs thermiques, réfrigérateurs et limites de Carnot
   4 exercices
7. Entropie et rendement isentropique
   4 exercices
8. Exergie : quelle part de l’énergie est utile
   4 exercices
9. Cycles moteurs à gaz : Otto, Diesel et Brayton
   4 exercices
10. Cycles à vapeur et cycles frigorifiques
    4 exercices

Le laboratoire (Thermodynamics lab)

Le labo est la partie pratique du cours. Ici, il est gratuit et sert uniquement à s’entraîner, sans crédits.

Chaque TP peut se faire dans une simulation gratuite ou avec des objets de cuisine. L’eau chaude et la vapeur brûlent : utilisez des gants de cuisine, posez la bouilloire sur un plan stable, versez loin de vous et tenez enfants et animaux à l’écart. Ne chauffez jamais un récipient fermé.

Référence de sécurité : NFPA: Burn awareness information (https://www.nfpa.org/education-and-research/home-fire-safety/burns)

TP A : la loi des gaz parfaits dans PhET Gas Properties

SEMAINE 2

Objectif : Montrer que la pression est proportionnelle à la température absolue à volume et quantité fixés, et que pV/T reste constant.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \ (V,\ m \text{ fixed})$$

```
(p_1)/(T_1)=(p_2)/(T_2)\ \ (V,\ m\ fixed)
```

Loi des gaz parfaits à volume constant

Mode opératoire

1. Ouvrez PhET Gas Properties, onglet Ideal ; injectez du gaz et maintenez le volume constant.
2. Chauffez le gaz par paliers et notez T et p.
3. Tracez p en fonction de T en kelvins ; prolongez la droite jusqu'à p = 0.
4. Recommencez à pression constante et notez le volume.

Tableau de données

T (K)	p (kPa), en partant de 100 kPa à 300 K
300	100
400	133.3
600	200

Valeurs de gaz parfait ; les nombres du simulateur fluctuent un peu car il compte les collisions des particules.

Exemple de calcul

1. p_2 = 100 × 400/300 = 133.3 kPa.
2. La droite passant par les données coupe p = 0 à T = 0 K.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- Gas Properties fonctionne dans un navigateur.

PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties) · PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter)

Lien avec la planète : Le DOE indique que les concepteurs de réacteurs pressurisent l'eau pour qu'elle ne boue pas ; les mêmes relations d'état fixent la conception de chaque chaudière et de chaque réservoir. U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP B : bilan d’énergie et rendement d’une bouilloire

SEMAINE 5

Objectif : Appliquer le premier principe au chauffage de l’eau et trouver quelle part de l’énergie électrique d’une bouilloire atteint l’eau.

$$\eta = \frac{mc\Delta T}{P\,t}$$

```
=(mcΔ T)/(P t)
```

Rendement de la bouilloire

Mode opératoire

1. Pesez 1.00 kg (1 L) d’eau du robinet et mesurez sa température.
2. Lisez la puissance de la bouilloire sur son étiquette.
3. Chronométrez le temps pour atteindre l’ébullition (la bouilloire s’arrête).
4. Calculez la chaleur absorbée et l’énergie électrique consommée.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Chaleur de l’eau, 1 kg 20→100 °C (kJ)	334.4
Énergie électrique, 1500 W × 250 s (kJ)	375.0
Rendement	89.2%

Valeurs d’exemple ; le temps de votre bouilloire dépend de sa puissance, de la température initiale de l’eau et de votre altitude.

Exemple de calcul

1. Q = 1 × 4.18 × 80 = 334.4 kJ.
2. η = 334.4/375 = 89.2%.

> **Sécurité**
>
> - La vapeur et l’eau bouillante brûlent : gardez le couvercle fermé, versez loin de vous et tenez enfants et animaux à l’écart.
> - Ne touchez pas le corps de la bouilloire tant qu’il est chaud.

Alternative à la maison ou virtuelle

- C’est un TP à la maison.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Lien avec la planète : Le DOE note que le chauffage par résistance transforme 1 kWh en 1 kWh de chaleur, alors que les pompes à chaleur réduisent la consommation d'électricité d'environ 50 %. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP C : fusion de la glace et chaleur latente

SEMAINE 5

Objectif : Utiliser un bilan thermique pour prédire la température finale quand de la glace fond dans de l'eau tiède, et comparer avec la mesure.

$$m_w c(T_w - T_f) = m_i h_{if} + m_i c T_f$$

`m_wc(T_w-T_f)=m_i h_if+m_ic T_f`

Chaleur perdue par l'eau = chaleur gagnée par la glace

Mode opératoire

1. Mettez 300 g d'eau à 40 °C dans une tasse isotherme.
2. Ajoutez 50 g de glace à 0 °C (essuyez-la).
3. Remuez doucement jusqu'à ce que toute la glace ait fondu et notez la température la plus basse.
4. Comparez avec la température finale prédite.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
Eau	0.300 kg à 40 °C
Ice	0.050 kg à 0 °C
T finale prédite	22.9 °C

Valeurs d'exemple ; la chaleur reçue de la tasse et de l'air rend la valeur mesurée un peu plus élevée.

Exemple de calcul

1. 0.3 × 4.18 × (40 − T) = 0.05 × 334 + 0.05 × 4.18 × T.
2. T = 33.46/1.463 = 22.9 °C.

> **Sécurité**
>
> - Utilisez de l'eau chaude du robinet, pas de l'eau bouillante.

Alternative à la maison ou virtuelle

- C'est un TP à la maison.

PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter) · PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Lien avec la planète : La chaleur latente est le principe du stockage thermique ; le DOE note que la géothermie peut aussi servir au stockage d'énergie thermique. U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP D : isolation et vitesse de refroidissement

SEMAINE 4

Objectif : Comparer la vitesse de refroidissement de l'eau chaude dans une tasse ordinaire et dans une tasse isotherme, et trouver la constante de refroidissement de chacune.

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-kt}$$

`(T-T_∞)/(T_0-T_∞)=e^-kt`

Loi de refroidissement de Newton

Mode opératoire

1. Remplissez deux tasses, l'une ordinaire et l'autre isotherme (ou enveloppée d'une serviette), d'eau à environ 80 °C.
2. Notez la température toutes les 2 minutes pendant 20 minutes ; notez la température de la pièce.
3. Calculez k = ln[(T_0 − T∞)/(T − T∞)]/t pour chacune.
4. Comparez les flux de pertes thermiques.

Tableau de données

Mug	T après 20 min (°C)	k (1/min)
Ordinaire	60	0.0203
Isotherme	70	0.00912

Valeurs d'exemple avec une pièce à 20 °C.

Exemple de calcul

1. Ordinaire : k = ln(60/40)/20 = 0.0203 par minute.
2. Isotherme : k = ln(60/50)/20 = 0.00912 par minute, moins de la moitié.

> **Sécurité**
>
> - L'eau chaude brûle : utilisez des gants de cuisine et gardez les tasses sur une surface stable, loin des bords.

Alternative à la maison ou virtuelle

- C'est un TP à la maison.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Lien avec la planète : Le DOE conseille d'isoler le logement avant d'installer une pompe à chaleur, car l'isolation réduit la chaleur qu'une maison doit remplacer. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP E : limites de Carnot d’une pompe à chaleur

SEMAINE 8

Objectif : Construire un tableur du COP de Carnot d’une pompe à chaleur en fonction de la température extérieure et le comparer au COP nominal d’un appareil réel.

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

```
COP_HP,Carnot=(T_H)/(T_H-T_L)
```

Pompe à chaleur de Carnot

Mode opératoire

1. Fixez la température intérieure T_H = 294 K.
2. Listez les températures extérieures de 253 K à 288 K.
3. Calculez le COP de Carnot pour chacune.
4. Cherchez le rendement nominal d’une pompe à chaleur sur son étiquette ou sa fiche ENERGY STAR et comparez.

Tableau de données

T_L (K)	COP_Carnot
263	9.48
273	14.0
283	26.7

Limites idéales ; les pompes à chaleur réelles en atteignent une fraction.

Exemple de calcul

1. COP = 294/(294 − 263) = 9.48.
2. Un air extérieur plus froid signifie une limite plus basse.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps)

Lien avec la planète : Le DOE indique que les pompes à chaleur géothermiques, qui exploitent la température stable du sol, peuvent réduire la consommation d'énergie de 30 % à 60 %. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **J'ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

TP F : tableur du cycle de Rankine

SEMAINE 15

Objectif : Calculer un cycle de Rankine idéal à partir des tables de la vapeur et voir comment les termes de la turbine, de la pompe et de la chaudière fixent le rendement.

$$\eta = \frac{(h_3 - h_4) - v_1(p_2 - p_1)}{h_3 - h_2}$$

```
=((h_3-h_4)-v_1(p_2-p_1))/(h_3-h_2)
```

Rendement de Rankine idéal

Mode opératoire

1. Cherchez les quatre états dans le WebBook du NIST (ou utilisez les valeurs fournies).
2. Calculez le travail de la pompe, la chaleur reçue, le travail de la turbine, le travail net et η.
3. Modifiez la pression du condenseur ou la température de la chaudière avec de nouvelles valeurs des tables et recalculez.
4. Trouvez le débit de vapeur pour une centrale de 100 MW.

Tableau de données

Grandeur	Valeur
w_pump (kJ/kg)	3.03
q_in (kJ/kg)	2728.6
w_net (kJ/kg)	710.1
η	26.0%

Valeurs des tables de la vapeur pour 3 MPa/350 °C et 75 kPa.

Exemple de calcul

1. η = 710.1/2728.6 = 26.0%.
2. Débit de vapeur pour 100 MW = 100000/710.1 = 140.8 kg/s.

> **Sécurité**
>
> - Ordinateur uniquement.

Alternative à la maison ou virtuelle

- N’importe quel tableur convient.

NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)

Lien avec la planète : Le DOE indique que les centrales nucléaires et géothermiques transforment toutes deux la chaleur en vapeur qui fait tourner des turbines, le cycle de ce TP. U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

☐ **J’ai terminé ce TP (réel ou virtuel)**

Séries d’entraînement aux examens

Chronométrez-vous : environ 10 minutes par problème. Comparez ensuite avec les solutions complètes.

Série d’exercices de mi-parcours (unités 1–5)

1. Une centrale a une consommation spécifique de chaleur de 8530 Btu/kWh. Trouvez son rendement.

    1. 3412/8530.

    Réponse : 40.0%.

2. Trouvez la masse d’air dans un réservoir de 2 m^3 à 200 kPa et 350 K.

    1. m = 200 × 2/(0.287 × 350).

    Réponse : 3.98 kg.

3. Trouvez h à 100 kPa pour un titre de 0.9 (h_f = 417.51, h_fg = 2257.5 kJ/kg).

    1. 417.51 + 0.9 × 2257.5.

    Réponse : 2449.3 kJ/kg.

4. 3 kg d’eau sont chauffés de 15 °C à 65 °C. Trouvez Q.

    1. 3 × 4.18 × 50.

    Réponse : 627 kJ.

5. De la vapeur à 10 kg/s perd 800 kJ/kg dans une turbine adiabatique. Trouvez la puissance.

    1. 10 × 800.

    Réponse : 8000 kW.

Série d’entraînement finale (toutes les unités)

1. Trouvez le rendement de Carnot entre 900 K et 300 K.

    1. 1 − 300/900.

    Réponse : 66.7%.

2. Une pompe à chaleur fournit 12 kW avec un COP de 4. Trouvez la puissance électrique et la chaleur prélevée à l’extérieur.

    1. W = 12/4; Q_L = 12 − 3.

    Réponse : 3 kW et 9 kW.

3. Trouvez Δs de 1 kg d’air de 300 K, 100 kPa à 600 K, 100 kPa.

    1. 1.005 ln 2.

    Réponse : 0.697 kJ/(kg·K).

4. Trouvez l’exergie de 500 kJ de chaleur à 1000 K avec T_0 = 300 K.

    1. 500 × 0.7.

    Réponse : 350 kJ.

5. Trouvez le rendement Otto pour r = 9.

    1. 1 − 9^(−0.4).

    Réponse : 58.5%.

6. Un cycle frigorifique a q_L = 150 kJ/kg et w = 37.5 kJ/kg. Trouvez COP_R et COP_HP.

    1. 150/37.5.

    Réponse : 4.0 et 5.0.

Fiche de formules

$$\eta = 3412/\text{heat rate},\ v = V/m$$

$$pv = RT,\ y = y_f + x\,y_{fg}$$

$$W_b = \int p\,dV,\ W = mRT\ln(V_2/V_1)$$

$$Q - W = \Delta U,\ h = u + pv$$

$$\Delta u = c_v \Delta T,\ \Delta h = c_p \Delta T,\ Q = mc\Delta T$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta V^2/2 + g\Delta z)$$

$$\eta = W/Q_H,\ COP_R = Q_L/W,\ COP_{HP} = Q_H/W \qquad \eta_{Carnot} = 1 - T_L/T_H$$

$$\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1) \qquad T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k}$$

$$X_Q = Q(1 - T_0/T),\ I = T_0 S_{gen} \qquad \eta_{Otto} = 1 - r^{1-k},\ \eta_{Brayton} = 1 - r_p^{(1-k)/k}$$

$$w_p = v\Delta p,\ COP_R = (h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$$

Constantes

Constante	Valeur
Constante universelle des gaz	R_u = 8.314 kJ/(kmol·K)
Air (gaz parfait, température ambiante, valeurs de manuel)	R = 0.287 kJ/(kg·K), c_p = 1.005, c_v = 0.718 kJ/(kg·K), k = 1.4
Eau liquide (valeur de manuel)	c = 4.18 kJ/(kg·K)
Chaleurs latentes (valeurs de manuel)	fusion de la glace 334 kJ/kg ; vaporisation à 100 °C 2257 kJ/kg
Unités d’énergie	1 kWh = 3600 kJ; 1 Btu = 1.055 kJ; 1 kWh = 3412 Btu
Température absolue	T(K) = T(°C) + 273.15

Source : NIST: CODATA value of the molar gas constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?r)

Textes, données et simulations gratuits

Utilisez ces cours, données de propriétés et simulations gratuits en parallèle du cours.

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Notes de cours et problèmes gratuits du MIT.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Notes gratuites de thermodynamique du MIT.
- OpenStax University Physics Volume 2, Chapter 3: The first law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-introduction): Chapitre de manuel gratuit.
- OpenStax University Physics Volume 2, Chapter 4: The second law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-introduction): Chapitre de manuel gratuit.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tables gratuites de propriétés de la vapeur et des fluides frigorigènes.
- PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties): Pression, volume et température en interactif.

Glossaire

Adiabatique
Pas de transfert de chaleur.

Rapport de travail de compression
Travail du compresseur sur travail de la turbine.

COP
Coefficient de performance d'un réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur.

Cycle de Carnot
Cycle réversible entre deux réservoirs ; le meilleur possible.

Volume de contrôle
Région de l'espace que la masse peut traverser.

État mort
Équilibre avec le milieu extérieur.

Enthalpie
$h = u + pv$.

Entropie
Propriété avec $dS = \delta Q_{rev}/T$; mesure l'irréversibilité.

Exergie
Travail utile maximal que l'on peut obtenir.

Moteur thermique
Dispositif qui transforme de la chaleur en travail au cours d'un cycle.

Pompe à chaleur
Dispositif qui déplace la chaleur du froid vers le chaud à l'aide de travail.

Consommation spécifique de chaleur
Btu de combustible par kWh produit.

Isentropique
Entropie constante ; réversible et adiabatique.

Chaleur latente
Énergie de changement de phase à température constante.

Titre
Fraction massique de vapeur d'un mélange saturé.

Cycle de Rankine
Cycle moteur à vapeur : pompe, chaudière, turbine, condenseur.

Transformation réversible
Transformation idéalisée sans production d'entropie.

Saturation
État où le liquide et la vapeur coexistent.

Capacité thermique massique
Énergie pour élever 1 kg de 1 K.

Laminage
Chute de pression à enthalpie constante.

Grille d’autoévaluation

Aucune note ni aucun crédit ne sont attribués. Utilisez cette grille pour juger honnêtement où vous en êtes dans chaque unité.

Niveau	À quoi cela ressemble
4 · Maîtrise	Dessine les systèmes et les diagrammes, cherche correctement les états, écrit des bilans complets de masse, d’énergie et d’entropie, vérifie par rapport aux limites de Carnot et mène les TP en sécurité.
3 · Compétent	Résout les exercices d’entraînement avec quelques erreurs ponctuelles de tables ou d’unités.
2 · En progression	Suit les exemples corrigés mais confond systèmes ouverts et fermés, ou utilise des °C dans des rapports.
1 · Débutant	Applique des formules sans schéma du système ; doit revoir le module.

Pondération suggérée si vous voulez une note

Partie	Poids
Exercices	20%
Travaux pratiques	25%
Série d’entraînement de mi-parcours	25%
Série d’entraînement finale	30%

Visez le niveau 3 ou mieux dans chaque unité avant de passer au cours suivant.

Cours associés

- Aérodynamique I AERO 310
- Mécanique des fluides ENGR 330
- Performances des avions AERO 320
- Tous les cours