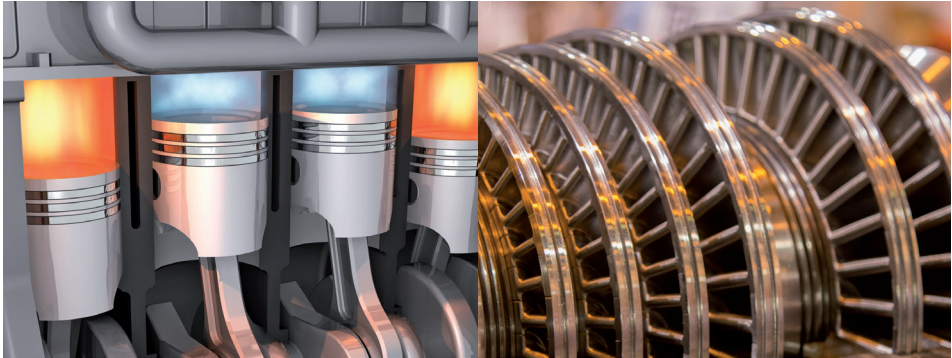


Jacques Woillez

# Conversion chaleur-énergie mécanique

## Principes et applications industrielles



**L**avoisier  
hermes

Jacques Woillez

**Conversion  
chaleur-énergie  
mécanique**  
**Principes et applications  
industrielles**

**L***avoisier*  
*hermes*

editions.lavoisier.fr

Pour plus d'informations sur nos publications :



[newsletters.lavoisier.fr/9782746248236](https://newsletters.lavoisier.fr/9782746248236)

*Direction éditoriale* : Emmanuel Leclerc

*Édition* : Céline Poiteaux

*Fabrication* : Estelle Perez

*Couverture* : Isabelle Godenèche

*Composition* : Nord Compo, Villeneuve-d'Ascq

*Image de couverture* :

© 2018, Lavoisier, Paris

ISBN : 978-2-7462-4823-6

# Préface

Ingénieur des techniques avancées et titulaire d'un DEA de mécanique des fluides, Jacques Woillez a une très longue expérience de la R&D dans l'industrie et de l'ingénierie des procédés fluides et thermiques.

Son ouvrage précédent, *Systèmes diphasiques-Éléments fondamentaux et applications industrielles* (Éditions Lavoisier), a reçu le prix Roberval 2015 dans la catégorie « Enseignement supérieur », concours international francophone qui récompense des œuvres littéraires, audiovisuelles ou multimédia consacrées à l'explication de la technologie.

C'est dire si Jacques Woillez réunit bien l'ensemble des compétences qui sont requises pour écrire un nouveau livre destiné à rendre accessible aux ingénieurs des bureaux d'étude la conception de systèmes énergétiques de conversion de la chaleur en énergie mécanique.

Rappelons que plus de 90 % de l'énergie primaire consommée dans le monde, notamment pour la génération d'électricité, provient encore de la combustion des énergies fossiles, et que, si on fait abstraction du train, les transports reposent quasi-uniquement sur les machines thermiques.

Les systèmes énergétiques qui sont étudiés dans ce livre ont donc un impact direct sur notre vie quotidienne à tous. Même si certains de ces systèmes existent depuis de nombreuses décennies, de nouveaux développements sont aujourd'hui nécessaires pour faire face aux défis du monde actuel, en particulier pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et combattre le changement climatique.

La difficulté à laquelle sont confrontés les ingénieurs qui travaillent sur ces technologies est que leur champ d'intervention relève à la fois de la mécanique des fluides, de la thermique et de la thermodynamique, qui sont considérées sur le plan scientifique et technologique comme trois disciplines distinctes. Il en résulte qu'ils n'ont à leur disposition que très peu d'ouvrages abordant de manière homogène l'ensemble des questions qui les intéressent.

Ils peuvent souvent consulter d'excellentes références dans chacune de ces disciplines, mais c'est à eux de faire le lien entre elles et de jongler entre des finesses d'approches variées et des notations spécifiques, ce qui leur complique fortement la tâche et peut induire des erreurs.

Dans cet ouvrage, Jacques Woillez aborde les différentes questions soulevées par la conversion de la chaleur en énergie mécanique de manière cohérente et équilibrée, tout en prenant en compte les contraintes économiques et environnementales.

Partant d'une description détaillée des principales technologies mises en œuvre, il montre comment elles peuvent être calculées et dimensionnées sous les trois aspects mécanique des fluides, thermique et thermodynamique, et oriente ses lecteurs vers des logiciels mettant en œuvre les principes d'ingénierie qu'il expose.

Comprendre comment les technologies peuvent être modélisées et dimensionnées est la première étape de la mise au point de solutions innovantes adaptées aux défis du monde moderne. C'est le mérite de l'auteur de cet ouvrage d'y contribuer avec pragmatisme, modestie et compétence. Nul doute que les praticiens et les étudiants, ainsi que beaucoup d'autres également, pourront grâce à lui alimenter en connaissance de cause leurs réflexions sur ces sujets passionnants.

Je formule le vœu que ce nouvel ouvrage rencontre un aussi grand succès que le précédent et qu'il accompagne de nombreux professionnels dans leur démarche d'ingénierie quotidienne.

**Renaud Gicquel**  
Professeur  
Mines ParisTech

# Avant-propos

La conversion de la chaleur en mouvement est un vieux rêve des ingénieurs depuis la haute antiquité. Pendant longtemps, la production d'énergie mécanisée a consisté en un simple transfert d'une énergie cinétique existante (le vent, les cours d'eau) en une autre forme d'énergie cinétique (le moulin aérial ou hydraulique). Ces ressources aisément disponibles ont longtemps suffi à répondre aux besoins qui n'étaient pas déjà pourvus par une main d'œuvre très bon marché. Quant à convertir cette énergie insaisissable qu'est la chaleur en énergie cinétique, c'était une autre histoire, et seuls quelques précurseurs s'en sont préoccupés.



Aéolipile, Héron d'Alexandrie, 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C.  
(image domaine public, source Knight's American Mechanical Dictionary, 1876)

C'est donc très récemment au regard de l'histoire qu'a été exploitée l'idée que la chaleur pouvait être transformée avantageusement en énergie mécanique. Face à l'expansion exponentielle des utilisations industrielles qui ont suivi l'avènement de

la voiture de Joseph Cugnot (1771) et la machine de Watt (1763), le coût de l’approvisionnement en combustible est très vite devenu un enjeu central de compétitivité, au niveau local pour les entreprises comme au niveau international pour les états. Cette problématique de raréfaction des combustibles a déclenché d’innombrables opérations de recherches et développements dans le but principal d’améliorer le rendement de conversion, c’est-à-dire l’obtention d’un maximum d’énergie mécanique utile pour une quantité minimale de combustible acheté. Beaucoup plus récemment, la constatation d’un réchauffement climatique mondial provoqué par une émission excessive des gaz à effets de serre – notamment le dioxyde de carbone produit par la combustion – est venue renforcer la nécessité d’obtenir les meilleurs rendements énergétiques possibles pour les machines de manière à réduire ces émissions. Cet ouvrage a donc été initié avec l’idée de répondre aux questions essentielles : comment fonctionnent exactement les processus de conversion chaleur-travail (ou de manière équivalente, chaleur-électricité) et que peut-on attendre exactement de ces processus en termes de rendement énergétique et d’efficacité.

Ce travail, dira-t-on, a déjà été mené par de nombreux auteurs ? Pourquoi un ouvrage de plus sur le sujet ? Il est exact que, sans doute, tout a été dit ou presque sur la question ! Toutefois, à y regarder de plus près, les informations nécessaires à une compréhension globale du problème sont abondantes mais éparpillées. On trouve en effet de nombreux livres ou publications spécialisées qui sont édités par des thermodynamiciens pour ce qui est des processus thermodynamiques, ou par des constructeurs pour ce qui est de leur mise en œuvre par les machines assurant la conversion (fours, brûleurs, échangeurs de chaleur, turbines et moteurs), ou encore par des spécialistes exploitants qui apportent surtout de précieuses informations pour la conduite quotidienne et l’entretien des installations. Nous avons tenté ici de rassembler les données et informations essentielles qui vont concerner l’ingénieur concepteur et constructeur de centrales de production d’énergie. Ce spécialiste de l’ingénierie a en vue la réalisation d’un système cohérent, composé d’un assemblage de technologies disponibles sur le marché, efficace du point de vue énergétique, respectueux de la réglementation environnementale, et réaliste du point de vue économique. Cet ingénieur devra pouvoir, au cours de son projet, dialoguer en profondeur avec les constructeurs et comprendre rapidement ce qu’il est possible de garantir aux futurs utilisateurs des installations en termes de production et de rendement.

De cet objectif découle la progression introduite dans ce livre. Dans un premier temps (chapitre 1) nous rappelons les lois fondamentales de la thermodynamique et de la mécanique des fluides qui justifient les calculs et les résultats d’efficacité thermique des cycles thermodynamiques de conversion chaleur-travail. Cette présentation est suivie (chapitre 2) par une caractérisation des sources de chaleur disponibles, car le choix de la source de chaleur n’est pas anodin pour la rentabilité thermique et économique de l’installation. L’apport de l’énergie solaire à concentration, qui constitue de plus en plus de nos jours une source de chaleur abondante et performante, est étudié de manière à mettre clairement en évidence ses atouts et ses faiblesses. Nous abordons ensuite en détail les bases de la thermique et le fonctionnement des échangeurs de chaleur (chapitre 3) que l’on retrouve de manière systématique dans tous les systèmes de production d’énergie, afin de montrer que là aussi les hypothèses

et les choix constructifs peuvent avoir un poids déterminant dans l'obtention des performances finales. Ce n'est qu'après cette synthèse d'informations de base que le fonctionnement thermodynamique et les techniques de mise en œuvre des machines de conversion chaleur-travail sont abordés, à savoir : les turbines à combustion (chapitre 4), les turbines à vapeur (chapitre 5) et les moteurs à combustion (chapitre 6). Pour chacun de ces composants, nous analysons par quels facteurs et quels paramètres les rendements énergétiques sont déterminés, et quelles sont les limites théoriques et pratiques qu'on peut attendre de leur utilisation. Nous terminons avec l'étude des associations de composants, ce que l'on nomme les cycles ou systèmes combinés (chapitre 7), pour montrer que ce sont finalement ces dispositions qui permettent la conception des ensembles les plus performants, en particulier dans la perspective d'un recours à l'énergie solaire comme source d'appoint des centrales conventionnelles.

Dans un effort d'aboutir à un ouvrage de synthèse, nous avons introduit de nombreuses simplifications ou raccourcis qui faciliteront, nous l'espérons, la compréhension globale du lecteur. Toutefois nous avons pris soin de conserver la rigueur de la formulation en introduisant dans de nombreux cas la possibilité pour le lecteur d'effectuer de manière analytique (sur tableur par exemple) des calculs d'ordres de grandeur réalistes en vue de la conception des systèmes, dans le cadre d'un avant-projet de centrale par exemple. À ce titre l'ouvrage intéressera les étudiants et les jeunes professionnels désireux d'avoir une introduction globale à la problématique énergétique, qui leur permettra d'aborder ensuite des ouvrages spécialisés sur tel ou tel autre aspect de la question.

Réaliser un ouvrage de synthèse de 250 pages pour un sujet si large était une gageure qui n'aurait pu aboutir sans l'aide de plusieurs personnes. J'aimerais remercier ici tout particulièrement le Pr. Renaud Gicquel, qui a bien voulu préfacier ce livre, pour son soutien à ce projet ainsi que pour les méthodes de calcul thermodynamique présentées ici et qui ont été largement inspirées par ses propres ouvrages. Je remercie grandement Eric Woillez, physicien normalien, pour son aide vigilante dans la formulation rigoureuse des concepts et théories qui permettront, je l'espère, à cet ouvrage d'être utile autant aux étudiants qu'aux professionnels. Je décernerai une mention spéciale à ma collègue Loreline Hubert, ingénieur de l'Insa de Lyon et chef de projets énergétiques à la Setec, pour son soutien moral sans faille malgré les turbulences du quotidien professionnel, et pour son aide précieuse pour la rédaction. Il faut également associer à cet ouvrage les dizaines de commanditaires, constructeurs et donneurs d'ordre qui m'ont apporté, dans le cadre de mes activités professionnelles à la Setec et ailleurs, de nombreux éclaircissements sur les réalités des mises en œuvre industrielles des installations énergétiques, et sur les priorités concrètes à respecter dans les projets d'installations. Qu'ils en soient tous remerciés ici.

**Jacques Woillez**





# Table des matières

Préface .....	III
Avant-propos.....	V
Sigles et abréviations.....	XIX

## Chapitre 1 Notions de base

1. Premier principe de la thermodynamique .....	1
<hr/>	
1.1. Définition de la pression .....	1
1.2. Équation d'état d'un fluide parfait .....	2
1.3. Premier principe, définition de l'enthalpie .....	4
2. Principaux fluides rencontrés dans les systèmes de conversion chaleur-travail .....	6
<hr/>	
2.1. Eau et vapeur d'eau .....	6
2.1.1. Propriétés physiques à l'état liquide.....	6
2.1.2. Pression de vapeur saturante de l'eau.....	7
2.1.3. Capacité calorifique et chaleur latente de l'eau.....	9

2.1.4. Enthalpie de la vapeur.....	11
2.1.5. Oxygène et gaz carbonique dissous .....	12
2.2. Air.....	13
2.2.1. Caractérisation de l'air sec.....	13
2.2.2. Caractéristiques de l'air humide .....	14
2.2.3. Enthalpie de l'air humide.....	16
2.3. Autres fluides caloporteurs.....	19
2.3.1. Huiles thermiques .....	19
2.3.2. Fluides organiques.....	19
2.3.3. Sels fondus .....	20
3. Deuxième principe de la thermodynamique	21
<hr/>	
3.1. Définition .....	21
3.2. Entropie de la vapeur.....	22
3.3. Entropie de l'air.....	22
4. Principales transformations thermodynamiques	23
<hr/>	
4.1. Diagrammes d'état.....	23
4.2. Compressions et détente.....	27
4.2.1. Compression et détente isothermes.....	27
4.2.2. Compression et détente adiabatiques .....	27
4.2.3. Puissance mécanique d'un compresseur ou d'un ventilateur .....	28
4.2.4. Puissance mécanique d'une pompe.....	30
4.2.5. Détente isentropique dans les turbines .....	30
4.2.6. Laminage.....	31
4.3. Réchauffages et refroidissements.....	33
4.3.1. Chauffage ou refroidissement sans changement de phase.....	33
4.3.2. Chauffage ou refroidissement avec évaporation ou condensation de l'eau .....	34

4.3.3. Chauffage ou refroidissement de l'air humide.....	34
4.3.4. Désurchauffe de la vapeur .....	36
4.3.5. Production d'eau froide par pulvérisation dans l'air .....	37
4.3.6. Réchauffage d'eau par injection directe de vapeur .....	38
<b>5. Cycles thermodynamiques</b> .....	<b>38</b>
5.1. Représentation .....	38
5.2. Cycle et théorème de Carnot.....	39
5.3. Autres cycles parfaits.....	42
5.4. Irreversibilités.....	43
5.5. Notion d'exergie.....	45
<b>6. Principales équations du mouvement des fluides</b> .....	<b>46</b>
6.1. Champ de vitesse d'un fluide en mouvement .....	46
6.2. Conservation de la masse .....	47
6.3. Théorème des quantités de mouvement .....	49
6.4. Équation de Bernoulli .....	53
6.4.1. Fluides parfaits.....	53
6.4.2. Fluides réels.....	56
6.4.3. Pertes de charge .....	57
6.4.4. Notions sur la turbulence .....	62
6.5. Fluides compressibles.....	70
6.5.1. Équations du mouvement.....	70
6.5.2. Régime critique et blocage du débit .....	71
6.5.3. Limite de comportement incompressible.....	73
<b>7. Fonctionnement des machines axiales</b> .....	<b>74</b>
7.1. Principe général de fonctionnement.....	74
7.2. Théorème des quantités de mouvement appliqué aux machines axiales.....	76

7.3. Degré de réaction des turbines .....	77
7.4. Pertes d'énergie utile.....	80
7.4.1. Couche limite .....	81
7.4.2. Écoulements à l'entrefer.....	82
7.4.3. Angles d'attaque inadaptés.....	82

## Chapitre 2

### Sources de chaleur

1. Combustion .....	86
<hr/>	
1.1. Réactions de combustion .....	86
1.1.1. Réaction générale.....	86
1.1.2. Pouvoirs calorifiques.....	87
1.1.3. Rendement de combustion.....	88
1.1.4. Excès d'air .....	88
1.2. Caractéristiques des combustibles.....	90
1.3. Fours et brûleurs.....	92
1.3.1. Principe et technologies des fours .....	92
1.3.2. Principes et technologies des chambres de combustion.....	95
1.4. Aspects environnementaux.....	95
1.4.1. Polluants surveillés .....	97
1.4.2. Formation et réduction des oxydes d'azote.....	98
1.4.3. Captation des polluants acides.....	100
2. CHALEUR SOLAIRE .....	108
<hr/>	
2.1. Rayonnement et irradiances.....	109
2.2. Génération de chaleur solaire .....	113
2.2.1. Principe général .....	113

2.2.2. Rendement de conversion rayonnement/chaleur .....	113
2.2.3. Différents types de récepteurs solaires .....	114
<b>3. Autres sources de chaleur</b> .....	<b>116</b>
<hr/>	
3.1. Géothermie .....	117
3.2. Fission nucléaire .....	117
3.3. Chaleur fatale industrielle.....	118

## Chapitre 3

### Échangeurs de chaleur

<b>1. Transferts de chaleur</b> .....	<b>122</b>
<hr/>	
1.1. Équation de transfert.....	122
1.2. Coefficients de transfert.....	124
1.3. Température de paroi.....	128
<b>2. Calcul d'un échangeur</b> .....	<b>129</b>
<hr/>	
2.1. Notations, définitions et hypothèses .....	129
2.2. Classification des échangeurs.....	131
2.3. Récapitulatif des échangeurs rencontrés dans les systèmes énergétiques.....	134
2.4. Cas de calcul général.....	138
2.5. Échangeurs avec changement de phase.....	141
2.6. Calcul d'un générateur de vapeur .....	142
<b>3. Agencement des réseaux d'échangeurs : méthode du pincement thermique</b> .....	<b>145</b>
<hr/>	
3.1. Cas à 2 fluides : la régénération.....	145
3.2. Exemple à 4 fluides .....	148
3.3. Généralisation à un nombre quelconque de fluides.....	152
<b>4. Points de vigilance technologiques</b> .....	<b>154</b>
<hr/>	

## Chapitre 4

### Turbines à combustion

1. Fonctionnement général	158
1.1. Principales dispositions.....	158
1.2. Cycle de Brayton .....	160
1.3. Rendements théoriques .....	163
2. Efficacité énergétique des turbines a gaz	164
2.1. Cycle de Brayton réel.....	164
2.2. Cycle à régénération .....	169
2.3. Cycle avec refroidissement intermédiaire .....	173
2.4. Cycle à refroidissement intermédiaire et régénération.....	177
2.5. Consommation de carburant.....	179
2.6. Facteur d'air de combustion .....	181
2.7. Température extérieure .....	182
2.8. Méthodes de production renforcée .....	182
2.8.1. Réchauffage intermédiaire.....	183
2.8.2. Injection d'eau .....	184
2.9. Charge partielle.....	189
3. Éléments technologiques	190
3.1. Rendement en fonction de la taille de l'équipement .....	190
3.2. Dispositions générales .....	192
3.2.1. Gaines aérauliques .....	193
3.2.2. Lubrification.....	193
3.2.3. Auxiliaire de démarrage.....	194
3.3. Refroidissement des aubages.....	195
3.4. Vibrations .....	197

3.5. Compresseur de gaz .....	198
3.6. Cycle fermé .....	198
4. Conclusion sur les turbines à gaz .....	199

---

## Chapitre 5 Turbines à vapeur

1. Fonctionnement général .....	201
<hr/>	
1.1. Principales dispositions.....	201
1.2. Cycle de Rankine.....	203
1.3. Cycle de Hirn.....	205
2. Efficacité énergétique des turbines à vapeur .....	206
<hr/>	
2.1. Étude paramétrique du cycle de Hirn .....	206
2.2. Cycle à resurchauffe.....	209
2.3. Cycles à soutirages .....	212
2.4. Cycle à double circuit de pression.....	214
2.5. Bilan des dispositions possibles.....	220
2.6. Cas des chaudières solaires .....	223
3. Éléments technologiques .....	230
<hr/>	
3.1. Installation générale.....	230
3.2. Bloc turbine .....	234
3.3. Turbines à action – à réaction .....	236
3.4. Bâche alimentaire dégazante .....	237
3.5. Condenseur .....	238
3.6. Qualité d'eau .....	239
3.7. Pompes alimentaires .....	240



3.8. Turbines à contre-pression et cogénération.....	241
4. Turbines à fluides organiques	243
<hr/>	
4.1. Principe général .....	243
4.2. Cycle de Rankine pour fluide organique (ORC).....	244
4.3. Principales dispositions.....	245
4.4. Performances et avantages des turbines organiques.....	246
4.5. Variante : cycle de Kalina .....	247

## Chapitre 6

### Moteurs à combustion

1. Moteurs à combustion interne	251
<hr/>	
1.1. Principe de base.....	251
1.2. Cycles thermodynamiques.....	254
1.3. Suralimentation.....	258
1.4. Rendements énergétiques réels.....	260
1.5. Comparatif avec les turbines à combustion.....	267
2. Moteurs de Stirling	268
<hr/>	
2.1. Principe .....	269
2.2. Mise en œuvre .....	270
2.3. Performances .....	271

## Chapitre 7

### Systèmes et cycles combinés

1. Principe général	277
<hr/>	
2. Cycle combiné gaz-gaz	278
<hr/>	

3. Cycle combiné gaz-vapeur .....	279
3.1. Schéma de base .....	279
3.2. Schéma avec post-combustion .....	285
4. Cycles combinés moteur/TAV ou moteur/ORC .....	287
5. Cycles intégrés solaire/gaz .....	289
5.1. Intégration d'énergie solaire au cycle de Hirn .....	290
5.2. Intégration d'énergie solaire à une turbine à combustion .....	291
5.2.1. Disposition générale .....	291
5.2.2. Rendements énergétiques crêtes .....	293
5.2.3. Économies annuelles de combustible .....	296
Conclusion .....	303
Références bibliographiques .....	307
Index .....	311



# Sigles et abréviations

- A : Aire, surface ou section de passage ( $m^2$ )  
A<sub>c</sub> : Section de passage au col d'une tuyère ( $m^2$ )  
a : Vitesse du son ( $m.s^{-1}$ )  
C : Débit calorifique ( $J.s^{-1}.K^{-1}$ )  
C<sub>p</sub> : Capacité calorifique d'un corps à pression constante ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )  
C<sub>v</sub> : Capacité calorifique d'un corps à volume constant ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )  
C<sub>μ</sub> : Coefficient de frottement fluide (-)  
C<sub>x</sub> : Coefficient de traînée d'un obstacle placé dans un écoulement (-)  
c : Concentration molaire d'une espèce ou d'un produit dans un fluide ( $mol.m^{-3}$ )  
D : Diamètre, ou échelle géométrique caractéristique (m)  
D<sub>h</sub> : Diamètre hydraulique d'une conduite (m)  
e : Epaisseur (m) ou excès d'air (-) ou exergie (J)  
E : Energie interne d'un gaz (J ou  $J.kg^{-1}$  suivant contexte)  
E<sub>m</sub> : Energie mécanique (ou charge) d'un fluide (J ou  $J.kg^{-1}$  suivant contexte)  
f : Force (N)  
f<sub>η</sub> : Facteur de correction du rendement (-)  
f<sub>qv</sub> : Facteur de charge en débit d'une turbine à vapeur (-)  
F : Force (N)  
F<sub>p</sub> : Force résultante d'un gradient de pression (N)  
F<sub>g</sub> : Force de pesanteur (N)  
F<sub>μ</sub> : Force d'origine visqueuse (N)  
g : Accélération de la pesanteur ( $m.s^{-2}$ )  
H : Enthalpie spécifique ( $J.kg^{-1}$ )  
h : hauteur (m) ou humidité massique d'un combustible (%)  
h<sub>x</sub> : enthalpies molaires ( $J.mol^{-1}$ ), x étant le nom du corps concerné.  
h̄ : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )  
I : Taux de turbulence(-)  
k : Constante (-) ou énergie cinétique turbulente ( $J.kg^{-1}$ ) ou exposant polytropique (-)  
k<sub>c</sub> : Coefficient de perte de charge à l'aspiration d'un compresseur (-)  
k<sub>i</sub> : Coefficient de perte de charge au passage d'un refroidisseur intermédiaire (-)  
k<sub>r</sub> : Coefficient de remplissage d'un cylindre de moteur à combustion (-)

$k_s$  : Coefficient de perte de charge à la sortie d'une turbine à combustion(-)  
 $K$  : Coefficient de transfert de chaleur ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )  
 $L$  : Longueur (m)  
 $L_{div}$  : Longueur du divergent d'un Venturi (m)  
 $L_u$  : Longueur utile d'une plaque ou canal de séparateur (m)  
 $L_v$  : Chaleur latente d'évaporation ( $J.kg^{-1}$ )  
 $l$  : Echelle de longueur des tourbillons turbulents (m)  
 $l_\mu$  : Echelle de Kolmogorov des tourbillons visqueux (m)  
 $M$  : Masse molaire ( $kg.mol^{-1}$ )  
 $m$  : Masse (kg)  
 $N$  : Vitesse de rotation ( $s^{-1}$ )  
 $P$  : Pression ( $N.m^{-2}$ )  
 $p_h$  : Périmètre mouillé d'une section hydraulique (m)  
 $P_a$  : Pression partielle de l'air sec (Pa)  
 $P_{atm}$  : Pression atmosphérique (Pa)  
 $P_{sat}$  : Pression de vapeur saturante de l'eau (Pa)  
 $P_v$  : Pression partielle de la vapeur (Pa)  
 $Q$  : Chaleur (J ou  $J.kg^{-1}$  suivant contexte)  
 $Q_{in}$  : Chaleur fournie au gaz lors d'un cycle thermodynamique (J ou  $J.kg^{-1}$  suivant contexte)  
 $Q_{out}$  : Chaleur soutirée au gaz lors d'un cycle thermodynamique (J ou  $J.kg^{-1}$  suivant contexte)  
 $q$  : Débit massique ( $kg.s^{-1}$ )  
 $q_{as}$  : Débit d'air sec ( $kg.s^{-1}$ ).  
 $q_{as}$  : Débit d'air de combustion pour les conditions stoechiométriques ( $kg.s^{-1}$ ).  
 $q_c$  : Débit massique de carburant ( $kg.s^{-1}$ )  
 $q_v$  : Débit volumique ( $m^3.s^{-1}$ )  
 $R$  : Constante universelle des gaz parfaits ( $J.mol^{-1}K^{-1}$ ) ou rayon (m) ou rapport des débits calorifiques d'un échangeur de chaleur (-)  
 $R_t$  : Résistance thermique due à l'encrassement d'un échangeur de chaleur ( $m^2.K.W^{-1}$ )  
 $r_x$  : Constante d'un gaz parfait particulier  $x$  ;  $r_x = R/M_x$  ( $J.kg^{-1}K^{-1}$ )  
 $r_c$  : Taux de compression (-)  
 $r_t$  : Taux de détente d'une turbine (-)  
 $r_v$  : Rapport de compression volumique (-)  
 $S$  : Entropie ( $J.K^{-1}$  ou  $J.kg^{-1}.K^{-1}$  suivant contexte)  
 $s$  : distance curviligne (m)  
 $T$  : Température (K)  
 $T_f$  : Température de flamme (K)  
 $T_{sat}$  : Température de saturation de l'eau (K) ou température de saturation d'un gaz refroidi par pulvérisation d'eau (K).  
 $t$  : temps (s)  
 $u$  : composante de la vitesse suivant l'axe  $x$  ou vitesse d'entraînement d'une roue ( $m.s^{-1}$ )  
 $u'$  : fluctuation turbulente de la vitesse suivant l'axe  $x$  ( $m.s^{-1}$ )  
 $u'_m$  : moyenne quadratique de la vitesse turbulente suivant l'axe  $x$  ( $m.s^{-1}$ )  
 $v_*$  : échelle de vitesse turbulente ( $m.s^{-1}$ ).

$V$  : Vitesse ( $m.s^{-1}$ )

$v$  : composante de la vitesse suivant l'axe  $y$  ou vitesse du fluide mesurée dans le repère fixe au passage d'une roue mobile ( $m.s^{-1}$ )

$v_{\mu}$  : vitesse de dissipation visqueuse des tourbillons ( $m.s^{-1}$ )

$w$  : composante de la vitesse suivant l'axe  $z$  ou vitesse du fluide mesurée dans le repère mobile au passage d'une roue mobile ( $m.s^{-1}$ ) ou humidité des fumées (-)

$W$  : Travail d'un gaz ( $J$  ou  $J.kg^{-1}$  selon contexte)

$W_T$  : Travail technique d'un gaz ( $J$  ou  $J.kg^{-1}$  selon contexte)

$x$  : Distance sur un axe horizontal (m) ou titre de vapeur (-)

$y$  : Distance sur un axe horizontal (m)

$y_v$  : Humidité absolue de l'air humide ( $kg.kg_a^{-1}$ )

$z$  : Distance sur un axe vertical (m)

$Z$  : Compressibilité d'un gaz (-)

### Lettres grecques :

$\alpha$  : Fraction volumique (-) ou richesse d'un mélange de air/carburant (-)

$\beta$  : Fraction massique (-) ou taux d'élévation de pression dans un moteur à combustion (-)

$\gamma$  : Accélération ( $m.s^{-2}$ ) ou exposant de Laplace (-)

$\delta$  : Ecart infinitésimal

$\Delta P_t$  : Perte de charge d'un écoulement (Pa)

$\varepsilon$  : Taux de dissipation de l'énergie turbulente ( $W.kg^{-1}$ ) ou efficacité d'un échangeur de chaleur (-)

$\eta$  : Rendement (-)

$\eta_a$  : Rendement électrique d'un alternateur (-)

$\eta_c$  : Rendement isentropique d'un compresseur (-)

$\eta_C$  : Rendement de Carnot (-)

$\eta_e$  : Rendement énergétique de conversion chaleur-travail (-)

$\eta_{ex}$  : Rendement exergétique (-)

$\eta_p$  : Rendement hydraulique d'une pompe (-) ou rendement polytropique (-)

$\eta_s$  : Rendement isentropique (-)

$\eta_t$  : Rendement isentropique d'une turbine (-)

$\eta_{ther}$  : Rendement thermique d'un moteur à compression (-)

$\eta_m$  : Rendement mécanique (-)

$\theta$  : Température exprimée en  $^{\circ}C$

$\lambda$  : Coefficient de frottement de Moody (-) ou conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )

$\mu$  : Viscosité ( $Pa.s^{-1}$ )

$\mu_T$  : Viscosité turbulente ( $Pa.s^{-1}$ )

$\nu$  : viscosité cinématique ( $m^2.s^{-1}$ ) ou volume spécifique d'un gaz ( $m^3.kg^{-1}$ ).

$\nu_T$  : viscosité cinématique turbulente ( $m^2.s^{-1}$ )

$\xi$  : Coefficient de perte de charge (-)

$\Pi$  : Puissance (W)

$\Pi_T$  : Puissance mécanique (W)

$\rho$  : Masse volumique ( $kg.m^{-3}$ )

$\sigma$  : Degré de réaction d'une machine tournante (-)

$\tau$  : Durée ou temps caractéristique (s) ou Taux d'expansion volumique lors de la détente dans un moteur à combustion (-)  
 $v$  : Volume ( $m^3$ )  
 $\phi$  : Invariant de débit d'une pompe (-)  
 $\Phi$  : Flux de chaleur ( $W.m^{-2}$ )  
 $\Psi$  : Coefficient d'arrondissement d'un cycle thermodynamique (-)  
 $\omega$  : Vitesse de rotation ( $s^{-1}$ )

**Indices :**

$a$  : Relatif à l'air  
 $c$  : Relatif à l'état critique, ou relatif au compresseur ou relatif au fluide chaud d'un échangeur  
 $e$  : Energétique, ou relatif à l'entrée d'un échangeur de chaleur  
 $f$  : Relatif aux frottements, ou relatif au fluide froid d'un échangeur  
 $p$  : Relatif à la paroi, ou relatif à la pompe, ou relatif aux produits de réaction de combustion  
 $G$  : Relatif à la phase gazeuse  
 $i$  : Relatif à l'état générateur, ou « indiqué ».  
 $L$  : Relatif à la phase liquide  
 $r$  : Relatif aux réactifs d'un mélange combustible  
 $S$  : Relatif à une transformation isentropique, ou relatif à la sortie d'un échangeur de chaleur  
 $SS$  : Relatif à l'état sursaturé  
 $V$  : Relatif à la phase vapeur  
 $vol$  : Utilisé pour exprimer qu'un pourcentage est pris en volume (-)  
 $ther$  : Thermique

L'ouvrage aborde sous l'angle théorique et pratique la question de la transformation de la chaleur en mouvement mécanique avec l'objectif affiché d'évaluer quels sont les meilleurs rendements de conversion que l'on peut attendre des technologies utilisées aujourd'hui, et de comprendre les raisons de leurs limites. Il intègre dans cette démarche l'apport récent de l'énergie solaire thermique et montre comment cette source de chaleur inépuisable peut faire progresser cette recherche d'efficacité.

Ouvrage de synthèse, il accompagne le lecteur depuis les règles de base de la thermique, de la thermodynamique et de la mécanique des fluides jusqu'à l'explication du fonctionnement pratique des machines – turbines et moteurs – qui permettent la production d'énergie mécanique et électrique. Riche de nombreuses figures et illustrations qui rendent son abord aisé et didactique, ce livre s'adresse aux étudiants comme introduction aux problèmes de l'énergétique thermique ainsi qu'aux professionnels de l'ingénierie des centrales de production d'électricité désireux d'optimiser la conception et le fonctionnement de leurs installations.

Jacques Woillez est Ingénieur Civil du Génie Maritime, diplômé de l'École Nationale Supérieure des Techniques Avancées en 1978, et titulaire d'un Diplôme d'Études Approfondies en Mécanique des Fluides. Il a obtenu une qualification aux fonctions de maître de conférences dans les collèges mécanique et génie des procédés en 2000.

Après avoir exercé de nombreuses responsabilités dans le domaine de la conception et la mise en œuvre des systèmes et procédés pour fluides chez des constructeurs ou dans des cabinets d'ingénierie, il est actuellement directeur de projet à la division Énergies Thermiques et Nouvelles de Setec Énergie Environnement.

Il est l'auteur de plusieurs brevets et publications dans des revues universitaires ou actes de congrès sur des thématiques liées à la mécanique des fluides, à l'énergétique et au génie des procédés. Il est l'auteur de « Systèmes diphasiques, éléments fondamentaux et applications industrielles » (Lavoisier, 2014), **prix Roberval 2015** dans la catégorie enseignement supérieur.

