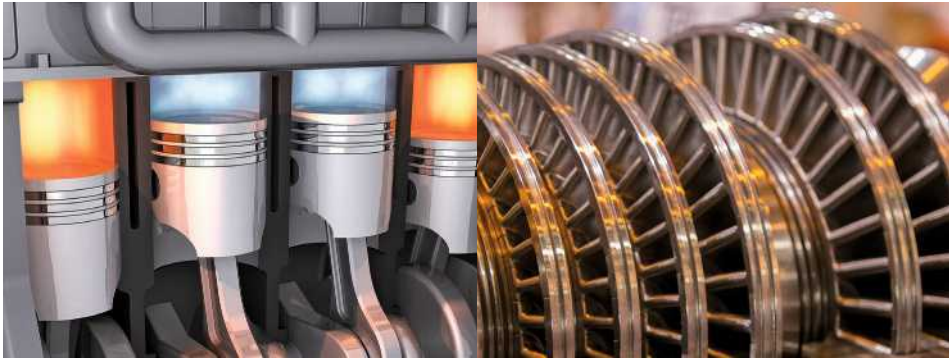


Jacques Woillez

Conversion chaleur-énergie mécanique

Principes et applications industrielles



Lavoisier
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

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 aéraulique 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^{er} 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
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 rencontres dans les systèmes de conversion chaleur-travail	6
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
3.1. Définition	21
3.2. Entropie de la vapeur.....	22
3.3. Entropie de l'air.....	22
4. Principales transformations thermodynamiques	23
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
5. Cycles thermodynamiques	38
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
6. Principales équations du mouvement des fluides	46
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
7. Fonctionnement des machines axiales	74
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
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
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
3. Autres sources de chaleur	116
3.1. Géothermie	117
3.2. Fission nucléaire	117
3.3. Chaleur fatale industrielle.....	118

Chapitre 3

Échangeurs de chaleur

1. Transferts de chaleur	122
1.1. Équation de transfert.....	122
1.2. Coefficients de transfert.....	124
1.3. Température de paroi.....	128
2. Calcul d'un échangeur	129
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
3. Agencement des réseaux d'échangeurs : méthode du pincement thermique	145
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
4. Points de vigilance technologiques	154

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