

Avant-propos

Michel FEIDT

LEMTA, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

L'ouvrage que vous avez entre les mains fait partie du thème « Physique de l'énergie et efficacité énergétique » du département Ingénierie et systèmes.

Le thème, bien que récent, n'est pas nouveau. Il est tout particulièrement sous-tendu par l'outil thermodynamique, et ce quelle que soit l'échelle.

L'aspect retenu sera phénoménologique, et surtout décliné en vue de préciser le concept clé d'« efficacité », essentiel pour tout système ou procédé.

La déclinaison retenue pour le développement du thème se fait autour de quatre ouvrages successifs, corrélés entre eux de façon forte, mais aussi avec d'autres thèmes du département :

- *physique de l'énergie : fondamentaux ;*
- *thermodynamique des moteurs thermiques ;*
- *les machines thermiques à cycles inverses ;*
- *l'efficacité en pratique.*

En remerciant ISTE, les divers coordinateurs, les auteurs pour leurs contributions et actions efficaces malgré les conditions très particulières du moment. Nous restons dans l'attente des remarques, suggestions et questions de lecteurs.

Introduction

Michel FEIDT¹ et Antonio VALERO-CAPILLA²

¹ LEMTA, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

² CIRCE, Université de Saragosse, Saragosse, Espagne

Les fondamentaux indispensables à la physique de l'énergie et l'efficacité énergétique restent assez récents (deux siècles environ) sous l'impulsion de S. Carnot.

On propose dans cette introduction une revue sélective des travaux antérieurs dans des journaux francophones. L'objet de la présente introduction est de faire un point général sur un sujet relatif aux systèmes et procédés thermomécaniques et plus particulièrement les machines dites « thermiques » qui sont à l'origine de la révolution industrielle.

Parmi ces machines, on cite :

– les machines de Brayton-Joule, couramment dénommées « turbines à gaz » ou « à combustion » (Feidt 1996 ; Molière 2000) ;

– les moteurs à combustion interne, dont les moteurs à gazole (ou cycle de diesel) (Chesse *et al.* 1998 ; Xia *et al.* 2012) ;

– d'autres moteurs, moins répandus, à savoir :

- les moteurs de Braysson (Zhou *et al.* 2004) ;

- les moteurs à air et cycle de Miller standard (Lin et Hou 2008) ;

- un moteur à trois cycles thermodynamiques (Zhao et Chen 2007) ;

- les moteurs de Stirling aux nombreuses variantes dont l'intérêt est croissant (Popescu *et al.* 1996).

On note aussi d'autres systèmes alternatifs très étudiés dont principalement la pile à combustible (Loizeau 1995), mais aussi des configurations plus classiques comme les machines à vapeur des centrales thermiques (Radcenco *et al.* 2007 ; Erdem *et al.* 2009). Ces deux derniers articles constituent le volet technique et technologique, prolongement pratique actuel des études de Carnot plus fondamentales.

On ajoute aussi des articles traitant des machines à cycles inverses vu leur importance en pratique, mais dont les études restent moins nombreuses dans *International Journal of Thermal Sciences* (Wu *et al.* 2011). Ces machines seront examinées en détail dans le chapitre 2 du présent ouvrage sous une forme plus succincte.

Aux démarches précédentes, il y a lieu d'ajouter des approches plus innovantes ou plus conceptuelles et fondamentales, dont les deux articles proposés par M. Barrère (Barrère 1980, 1983). Nous avons eu la chance d'échanger avec ce dernier auteur, ce qui nous a confortés dans l'intérêt des travaux sur le thème de l'interdépendance des transferts thermiques et de la conversion des énergies dans les systèmes et procédés, dont l'aspect thermomécanique.

Cette thématique a été complétée depuis, par :

- des analyses de stabilité (Nie *et al.* 2008) ;
- des analyses exergetiques (Fratzcher 1997) ;
- des analyses entropiques des irréversibilités (Grazzini et Gori 1987 ; Lucia et Grazzini 1997).

Enfin, les aspects économiques sont aussi une préoccupation de longue date et déjà reliés au respect de l'environnement (Barrère 1983 ; Goffause 1994).

On insistera pour notre part sur les aspects plus fondamentaux liés à la puissance et aux rendements associés à cette même puissance optimisée. Le défi est de proposer un critère de qualité du moteur plus proche de la réalité fonctionnelle de celui-ci, comme il était proposé dans les références (Barrère 1980 ; Roche 1983 ; Arias 2018) en regard de la limite bien connue du rendement de Carnot.

Le chapitre 1 développe la base historique des modèles de Carnot, montrant, s'il en était nécessaire, que ces derniers modèles ont des racines plus profondes dans l'histoire de la thermodynamique. Le chapitre 3 aborde l'optimisation des moteurs thermomécaniques en insistant sur la méthodologie des études :

- différents choix pour la fonction objectif ;
- différents choix pour les contraintes ;

– études de sensibilité paramétrique : distinction entre variable et paramètre, dont la connexion aux conditions aux limites ne peut pas être ignorée. D'importantes conséquences en résultent, dont certaines seront rapportées.

On illustrera par quelques résultats, la démarche progressive (graduée) utilisée, conduisant à une optimisation séquentielle dont l'aboutissement fournit l'optimum-optimorum recherché, correspondant (dans le cas général irréversible) au rendement de Carnot qui constitue la limite réversible inatteignable.

Les chapitres 3 et 4 consistent en une discussion-synthèse de résultats, unifiant d'assez nombreux travaux de la littérature, dont ceux publiés dans R.G.T., devenu I.J.T.S (voir les compléments bibliographiques (Feidt 1987, 2018)). Des prolongements et perspectives existantes ou à venir seront enfin exposés.

En résumé, les chapitres 1 et 2 revisitent la thermostatique des cycles dithermes, en redonnant les définitions de base des performances des systèmes moteurs ou récepteurs (thermopompe, frigo pompe). Le focus est mis sur la représentation graphique en diagrammes (Q-T, Borel-Favrat, Raveau, diagramme ternaire). L'illustration générale porte sur des systèmes dithermes de type Carnot-Stirling-Ericsson.

L'approche graphique précédente est reprise de façon différente et analytique dans les chapitres 3 et 4. Ces chapitres rapportent de l'évolution des connaissances de la thermodynamique de l'équilibre vers la thermodynamique irréversible en illustrant le propos sur la machine de Carnot, son rendement et la puissance d'un moteur.

Les chapitres 1 et 2, par l'exemple de Carnot, montrent les liens consubstantiels entre production d'entropies et efficacité conduisant à :

- un compromis entre transfert et conversion d'énergie ;
- l'existence d'une période (fréquence) de cycle conduisant à un maximum de puissance du moteur (nouveau paradigme à notre connaissance).

Tout ceci est ensuite développé de façon plus complète et particulière dans le chapitre 3 dédié à la thermodynamique à vitesse finie (FTT en anglais).

Le chapitre 4 est une tentative de synthèse, conduisant à ce que nous appelons « thermodynamique optimale en dimensions physiques finies ».

Le chapitre 5 décrit, pour la première fois, la théorie de la « thermoéconomie circulaire » pour évaluer les coûts physiques du recyclage des déchets dans des processus

industriels de plus en plus complexes. Il est démontré que la thermoéconomie englobe les principes physiques de l'« économie circulaire » (rigoureusement « économie en spirale ») et de la « symbiose industrielle », en plus du calcul des coûts selon le deuxième principe et du diagnostic des systèmes énergétiques complexes.

Chaque fois que nous produisons, nous produisons des déchets. Au coût de production s'ajoute donc le coût de traitement des déchets. La thermoéconomie est la théorie physique qui permet d'analyser le processus de formation des coûts. Le coût est un concept économique, alors que l'irréversibilité est véritablement thermodynamique. Le message le plus profond de la thermoéconomie est donc que toute activité concevable doit détruire de l'exergie pour être menée à bien. Grâce à la thermodynamique, nous savons comment mesurer la destruction cumulative d'exergie nécessaire à la réalisation d'un processus.

Pour ce faire, on utilise le concept d'« entropie générée », S_g , qui, selon le théorème de Gouy-Stodola, est une mesure de l'irréversibilité, $I = T_0 S_g$. En d'autres termes, le coût physique de la production d'un produit peut être mesuré comme la somme des irréversibilités qui se sont produites tout au long de la formation d'un produit.

De ce point de vue, que dit la thermodynamique sur les déchets ? Curieusement, ce problème n'a pas été abordé dans la littérature. La réponse à la question est simple : s'il s'agit d'une conséquence physique de la production, il peut et doit être considéré et mesuré comme une autre irréversibilité. En d'autres termes, le coût de production des déchets est, ni plus ni moins, une autre irréversibilité, mais cette fois-ci externe au processus de production. En d'autres termes, produire quelque chose génère des irréversibilités internes et externes. Nous appelons ces dernières des déchets.

En conséquence, un déchet cesserait d'être un déchet si toute son exergie, c'est-à-dire sa capacité à faire ou à nuire à quelque chose, disparaissait. En d'autres termes, il atteindrait l'équilibre avec son environnement (si son environnement était un réservoir infini, ce qui n'est pas le cas en réalité).

Malheureusement, dans la vie réelle, nous nous comportons de manière vicieuse à l'égard de la planète. Nous externalisons nos déchets en espérant que personne ne les paiera. La manière responsable de produire devrait être d'internaliser les déchets, c'est-à-dire d'éteindre leur exergie, et ce processus n'est qu'un coût supplémentaire (irréversibilité) de la production.

C'est ainsi que, pour la première fois, le concept de thermoéconomie circulaire apparaît dans la littérature scientifique. Tant qu'il y a de l'exergie, il faut l'exploiter plutôt que de l'externaliser. Pour la récupérer, il faut fermer les boucles de production.

L'efficacité, rigoureusement basée sur le deuxième principe, ne peut plus être définie comme le simple quotient entre l'exergie du produit divisée par l'exergie des ressources consommées. Le gaspillage doit être pris en compte. Si l'extinction de l'exergie nécessite plus d'exergie de la part des ressources, il faudra en tenir compte dans la dette. Mais si cette exergie résiduelle est utilisée pour augmenter la production, nous aurons obtenu une augmentation globale de l'efficacité de la production. La réalité se situe entre ces deux situations, c'est pourquoi nous considérons un « point de pincement de l'exergie » comme une limite à notre capacité d'utiliser cette exergie jusqu'à ce qu'elle s'éteigne. Cette limite doit être raisonnable et raisonnée pour tirer profit de l'exergie résiduelle.

Outre ces réflexions, ce chapitre présente de nouvelles idées, telles que :

- un bref historique de la théorie du coût de l'exergie comme base de la thermoéconomie ;

- une reformulation de la théorie du coût exergetique (TCE) et de ses règles FPR concernant le coût des ressources, l'équilibre des coûts, l'allocation des coûts des co-produits et des combustibles non utilisés et l'internalisation des coûts des déchets, comme décrit dans (Torres et Valero 2021) ;

- une reformulation de la théorie structurelle en tant que théorie générale des coûts, et ses équations caractéristiques, montrant que la TCE est un cas particulier de la théorie structurelle, où ses équations caractéristiques sont la définition de l'efficacité du processus. Cette théorie peut être utilisée pour la répartition des coûts dans les cas de symbiose industrielle, d'intégration des processus et de recyclage des déchets ;

- la méthodologie proposée permet de décomposer les coûts de production entre les coûts dus aux irréversibilités internes, qui peuvent être réduits par des améliorations de la conception, de l'exploitation et de la maintenance, et ceux dus aux déchets, qui peuvent être réduits par l'intégration et le recyclage des processus. Il est à noter qu'il existe un point de pincement au-delà duquel le recyclage n'a pas de sens. La formule coût-irréversibilité présentée ici est à la base du lien entre la thermodynamique et l'économie circulaire.

Le chapitre 6 présente une nouvelle propriété thermodynamique, l'« énergie libre relative », qui permet de construire une nouvelle théorie mathématique des coûts thermodynamiques pour diagnostiquer les malfonctionnements dans les systèmes thermiques. Cette nouvelle fonction, associée au paramètre de la « température de détérioration », permet d'établir une relation exacte entre la quantité de ressources utilisées et

l'augmentation de la production d'entropie causée par la trajectoire de détérioration du composant.

Ce chapitre va au-delà du diagnostic thermoéconomique conventionnel des systèmes énergétiques industriels. Tout au long de l'histoire, l'émergence de nouvelles propriétés fondamentales a été un événement scientifique d'une grande portée qui a ouvert de nouvelles voies et applications de la thermodynamique. De même qu'il existe une équation fondamentale du comportement de tous les états d'équilibre d'un système, du type $U = U(S, V, N_i)$, nous postulons l'existence d'une équation caractéristique qui décrit le comportement d'un flux qui réalise un processus utile dans une machine détériorée par une cause « r ». Comme la détérioration de la machine peut être due à diverses causes, la substance utile évoluant à l'intérieur de la machine subira des variations d'enthalpie et d'entropie différentes de celles prévues à la conception.

Nous appelons « fonction trajectoire de détérioration » $h_r = h_r(s_r)$ l'ensemble des paires (h_r, s_r) de la substance en mouvement dans la machine détériorée en raison de la cause r . Maintenant, en utilisant la transformation de Legendre, cette trajectoire peut également être décrite par l'intersection de la ligne tangente de la trajectoire de détérioration r avec l'axe h et sa pente est T_d . En d'autres termes, l'équation :

$$\ell = h - T_d s$$

contient la même information que la trajectoire $h_r = h_r(s_r)$. Cela donne naissance à une nouvelle propriété, l'énergie libre relative, ainsi qu'à son conjugué, la température de détérioration de la substance circulant à l'intérieur de la machine.

Nous appelons cette nouvelle fonction « énergie libre relative » (ELR) parce qu'elle a des dimensions énergétiques, c'est la partie enthalpique du flux qui reste disponible pour accomplir sa tâche dans la machine, et elle est relative parce qu'elle est associée à une cause, r , de détérioration de la machine. Il convient de noter que la température de détérioration a des dimensions de température, mais ne peut en aucun cas être mesurée comme une température conventionnelle. Il convient également de noter que plus la T_d est élevée, plus l'ELR est faible.

Il est remarquable que l'ELR présente des propriétés intéressantes pour le diagnostic des systèmes énergétiques. Ainsi, si le concept de malfonctionnement de l'équipement est dû à plusieurs causes, chacune d'entre elles aura son chemin de détérioration et sa température de détérioration. Nous avons constaté que la quantité de fluide qui doit compenser la détérioration du moteur dépend de l'ELR et de la température de détérioration, quel que soit le niveau d'agrégation choisi par l'analyste.

Cela nous permet de repenser le concept de coût exergetique et d'efficacité du deuxième principe. En outre, comme la détérioration du composant ne dépend pas de la décision de l'analyste quant à l'état de référence choisi, la température de détérioration ne dépend plus de la température de référence choisie pour les calculs énergétiques, pas plus que la nouvelle définition de l'efficacité utilisant l'ELR. Ce fait n'isole pas l'usine des conditions environnementales, mais élimine la sélection arbitraire de tout état de référence. Cette idée clarifie le rôle des conditions environnementales sur la plante et il sera peut-être plus important d'utiliser l'ELR plutôt que l'exergie dans le diagnostic de l'usine.

Nos remerciements chaleureux envers l'équipe d'ISTE et les auteurs pour leurs contributions. Bonne lecture francophone et en restant à l'écoute des remarques et suggestions. Les compléments bibliographiques internationaux ajoutés (Feidt 1987, 2018) sont un approfondissement et une ouverture à la diligence du lecteur.

Bibliographie

- Andresen, B. (1983). *Finite-Time Thermodynamics*. Physics Laboratory II, University of Copenhagen, Copenhagen.
- Arias, F. (2018). On osmotic heat engines driven by thermal precipitation-dissolution of saturated aqueous solution. *Int. J. Therm. Sci.*, 133, 151–161.
- Asad, U. and Zheng, M. (2008). Fast heat release characterization of a diesel engine. *Int. J. Therm. Sci.*, 47, 1688–1700.
- Barrère, M. (1980). Le rôle du temps dans l'optimisation des cycles thermodynamiques. *Rev. Gen. Therm. Fr.*, 228, 995–1006.
- Barrère, M. (1983). La thermoéconomie. *Rev. Gen. Therm. Fr.*, 225, 243–262.
- Barrère, M. (1995). Démarche unitaire de la thermodynamique dans l'étude des systèmes complexes. *Rech. Aérospatiale*, 5, 353–362.
- Blaise, M. (2016). Contribution au développement des moteurs à apport de chaleur externe utilisés pour la conversion des rejets thermiques industriels en électricité. Modélisation et optimisation thermodynamique d'un nouveau convertisseur : Turbosol. PhD Thesis, Université de Lorraine.
- Bonjour, J. (2023). *Systèmes frigorifiques, pompes à chaleur et machines à cycle inverse : principes, état de l'art et tendances*. ISTE Editions, London.

- Chambadal, P. (1957). *Les centrales nucléaires*. Armand Colin, Paris.
- Chen, C.-K. and Su, Y.-F. (2005). Exergetic efficiency optimization for an irreversible Brayton refrigeration cycle. *Int. J. Therm. Sci.*, 44, 303–310.
- Chesse, P., Hetet, J.F., Tauzia, X., Frayret, J.P. (1998). Influence of the engine/compressor duct on the operating range of a high output diesel engine with a two-stage turbo charging system. *Rev. Gen. Therm.*, 37, 801–812.
- Curzon, F.L. and Ahlborn, B. (1975). Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am. J. Phys.*, 43, 22–24.
- Czarneski, F.E., Och, S.H., Moura, L.M., Domingues, E. (2019). Experimental model for prediction of tip temperature of diesel injector nozzle in dual-fuel engines. *Int. J. Therm. Sci.*, 138, 596–604.
- Desmet, B. (2023). *Thermodynamique des moteurs thermiques*. ISTE Editions, London.
- Erdem, H.H., Akkaya, A.V., Cetin, B., Dagdas, A., Sevilgen, S.H., Sahin, B., Teke, I., Gungor, C., Atas, S. (2009). Comparative energetic and exergetic performance analysis for coal-fired thermal power plants in Turkey. *Int. J. Therm. Sci.*, 48, 2179–2186.
- Feidt, M. (1987). *Thermodynamique et optimisation énergétique des systèmes et procédés*, 1st edition. Lavoisier TEC & DOC, Paris¹.
- Feidt, M. (1996). Optimisation d'un cycle de Brayton moteur en contact avec des capacités thermiques finies. *Rev. Gen. Therm.*, 35, 662–666.
- Feidt, M. (2001). Reconsideration of efficiency of processes and systems from a non-equilibrium point of view. *Int. J. Energy Environ. Econ.*, 11, 31–49.
- Feidt, M. (2012). Thermodynamics of energy systems and processes: A review and perspectives. *J. Appl. Fluid Mech.*, 5, 85–98.
- Feidt, M. (2013). *Thermodynamique optimale en dimensions physiques finies*. Hermes-Lavoisier, Paris.
- Feidt, M. and Costea, M. (2018). From finite time to finite physical dimensions thermodynamics: The Carnot engine and Onsager's relations revisited. *J. Non-Equil. Thermodyn.*, 43, 151–161.
- Feidt, M. and Costea, M. (2019a). A new perspective on Carnot and Curzon-Ahlborn models of thermomechanical engine by transfer and production of entropy. *15th Joint European Thermodynamic Conference, JETC 2019*, May 22–24, Barcelona.

1. Voir également les éditions de 1996 et de 2016.

- Feidt, M. and Costea, M. (2019b). Progress in Carnot and Chambadal modeling of thermomechanical engine by considering entropy production and heat transfer entropy. *Entropy*, 21, 1232.
- Feidt, M. and Feidt, R. (In press). Du rôle fondamental de l'entropie de transfert de chaleur et de la production d'entropie dans la description et l'optimisation des moteurs thermodynamiques : le cas emblématique de la machine de Carnot. *C. R. Acad. Sci.*
- Feidt, M., Costea, M., Petrescu, S., Stanciu, C. (2016). Nonlinear thermodynamic analysis and optimization of a Carnot engine cycle. *Entropy*, 18, 243.
- Feidt, M., Costea, M., Stanciu, C., Stanciu, D. (2019). Entropic model and optimization of a refrigeration machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 595.
- Fratzscher, E. (1997). Exergy and possible applications. *Rev. Gen. Therm.*, 36, 690–696.
- Goffause, P. (1994). How to finance the energy future of greater Europe and respect the environment. *Rev. Gen. Therm.*, 33, 214–216.
- Grazzini, G. and Gori, F. (1987). Influence of thermal irreversibilities on work producing systems. *Rev. Gen. Therm.*, 312, 637–639.
- Ibrahim, O.M., Klein, S., Mitchell, J.W. (1991). Optimum heat power cycles for specified boundary conditions. *J. Eng. Gas Turb. Power*, 113, 514–521.
- Lin, J.C. and Hou, S.S. (2008). Performance analysis of an air-standard Miller cycle with considerations of heat loss as a percentage of fuel's energy, friction and variable specific heats of working fluid. *Int. J. Therm. Sci.*, 47, 182–191.
- Loizeau, S. (1995). Thermodynamic approach to the fuel-cell considered as an open system. *Rev. Gen. Therm.*, 34, 426–436.
- Lucia, U. and Grazzini, G. (1997). Global analysis of dissipation due to irreversibility. *Rev. Gen. Therm.*, 36, 605–609.
- Molière, M. (2000). Stationary gas turbines and primary energies: A review of fuel influence on energy and combustion performances. *Int. J. Therm. Sci.*, 39, 141–172.
- Moutier, J. (1872). *Éléments de thermodynamique*. Gauthier-Villars, Paris.
- Nie, W., He, J., Deng, X. (2008). Local stability of an irreversible Carnot heat engine. *Int. J. Therm. Sci.*, 47, 663–640.
- Novikov, I. (1957). The efficiency of atomic power stations. *At. Energy*, 3, 409–412.

- Petrescu, S., Costea, M., Feidt, M., Ganea, I., Boriaru, N. (2015). *Advanced Thermodynamics of Irreversible Processes with Finite Speed and Finite Dimensions*. AGIR, Bucharest.
- Popescu, G., Radcenco, V., Costea, M., Feidt, M. (1996). Optimisation thermodynamique en temps finie du moteur de Stirling endo- et exo-réversible. *Rev. Gen. Therm.*, 35, 656–661.
- Radcenco, V., Vasilescu, E.E., Popescu, G., Apostol, V. (2007). New approach to thermal power plants operation regimes maximum power versus maximum efficiency. *Int. J. Therm. Sci.*, 46, 1259–1266.
- Remy, P., Boissenin, Y., Molière, M. (1994). Gas turbine and cogeneration installations of complex construction – The UEM power-plant case. *Rev. Gen. Therm.*, 33, 717–725.
- Roche, M. (1983). Récupération de chaleur, le cycle thermodynamique idéal. *Rev. Gen. Therm. Fr.*, 260–261, 561–571.
- Ser, L. (1888). *Traité de physique industrielle : production et utilisation de la chaleur (Machines à air chaud)*. G. Masson, Paris.
- Stitou, D. and Feidt, M. (2005). Nouveaux critères pour l’optimisation et la caractérisation des procédés thermiques de conversion énergétique. *Int. J. Therm. Sci.*, 44, 1142–1153.
- Torres, C. and Valero, A. (2021). The exergy cost theory revisited. *Energies*, 14, 1594.
- Tyagi, S.K., Chen, G.M., Wang, Q., Kaushik, S.C. (2006). Thermodynamic analysis and parametric study of an irreversible regenerative-intercooled-reheat Brayton cycle. *Int. J. Therm. Sci.*, 45, 829–840.
- Ust, Y., Sahin, B., Kodal, A. (2006). Performance analysis of an irreversible Brayton heat engine based on ecological coefficient of performance criterion. *Int. J. Therm. Sci.*, 45, 94–101.
- Vaudrey, A., Lanzetta, F., Feidt, M. (2014). H. B. Reitlinger and the origin of the efficiency at maximum power for heat engines. *J. Non-Equil. Thermodyn.*, 39, 199–203.
- Wang, W., Chen, L., Sun, F., Wu, C. (2005). Power optimization of an endoreversible closed intercooled regenerated Brayton cycle. *Int. J. Therm. Sci.*, 44, 89–94.
- Wu, W.D., Zhang, H., Men, C.L. (2011). Performance of a modified zeolite 13Xwater adsorptive cooling module powered by exhaust waste heat. *Int. J. Therm. Sci.*, 50, 2042–2049.

- Xia, S., Chen, L., Sun, F. (2012). Engine performance improved by controlling piston motion: Linear phenomenological law system diesel engine. *Int. J. Therm. Sci.*, 51, 163–174.
- Zhao, Y. and Chen, J. (2007). An irreversible heat engine model including three typical thermodynamic cycles and their optimum performance analysis. *Int. J. Therm. Sci.*, 46, 605–613.
- Zhou, Y., Tyagi, S.K., Chen, J. (2004). Performance analysis and optimum criteria of an irreversible Braysson heat engine. *Int. J. Therm. Sci.*, 43, 1101–1106.