

ANALYSES QUANTITATIVES : BILANS ÉNERGÉTIQUES ET EXERGÉTIQUES

L'analyse des performances des diverses technologies conduit de manière classique à calculer leurs bilans énergétiques. En complément, notamment lorsque l'on cherche à optimiser un système, l'établissement de son bilan exergétique présente un grand intérêt, car ce bilan permet de quantifier les irréversibilités. Dresser un bilan exergétique ne pose pas de difficulté particulière mais demande à être fait avec grand soin faute de quoi des erreurs peuvent être commises : nous verrons comment en pratique peuvent être établis les bilans énergétiques et exergétiques, et en quoi ils diffèrent. Nous nous contenterons ici d'une présentation succincte, en suggérant au lecteur désireux d'approfondir la question de se reporter à la littérature spécialisée, relativement abondante aujourd'hui, et notamment aux ouvrages de L. Borel et M. Moran cités en références.

Le lecteur pourra utilement se référer à la note rédigée en octobre 2002 sur la problématique d'optimisation de divers cycles [3], qui présente les bilans exergétiques d'un certain nombre de cycles de machines thermiques, mettant ainsi en application les principes exposés dans cette section.

1.1 Bilans énergétiques

La méthode générale exposée section 2.3.5 de [1] présente la manière de dresser un bilan enthalpique. Pour un système en régime permanent (cas auquel nous nous limiterons), il s'agit simplement de comptabiliser les flux aux frontières de chaleur, de travail utile et d'enthalpie, et éventuellement dans des cas particuliers comme pour une réaction de combustion de réintroduire un terme de génération d'énergie dans le volume¹, l'équation générale du bilan d'un volume de contrôle devenant la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{transport} \\ \text{entrant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{transport} \\ \text{sortant par} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{transfert} \\ \text{à} \\ \text{la surface} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{génération} \\ \text{dans le} \\ \text{volume} \end{array} \right\} = 0 \quad (1)$$

Ecrire un bilan énergétique ne pose généralement pas de difficulté particulière (le lecteur qui le désire pourra se reporter à [1] pour de plus amples explications).

D'une grande utilité, ces bilans sont très largement utilisés, notamment dans les bureaux d'études. Ils présentent toutefois une limite importante : dérivés du premier principe, ils ne prennent pas en compte la qualité de l'énergie, de telle sorte qu'un kWh électrique vaut autant qu'un kWh thermique, et ceci quel que soit son niveau de température. Pour tenir compte de cette qualité, il faut ajouter la fonction d'état introduite par le second principe, l'entropie.

1.2 Bilans exergétiques

La théorie de l'exergie, présentée succinctement section 2.5 de [1], fournit un cadre tout à fait rigoureux pour quantifier la qualité thermodynamique d'un système quelconque, ouvert ou fermé, en régime dynamique ou non. Elle est de plus en plus acceptée comme l'outil privilégié pour comparer et optimiser les cycles thermodynamiques, grâce aux bilans exergétiques. Elle définit une méthode d'analyse intégrée qui englobe les deux premiers principes de la thermodynamique, et permet ainsi de tenir compte à la fois des quantités d'énergie mises en jeu et de leur qualité, ce que le premier principe ne permet pas de faire.

L'exergie dépend à la fois de l'état du système et de la composition chimique de ses éléments. Elle diffère de l'énergie en ce sens que cette dernière se conserve tandis que de l'exergie est détruite chaque fois que des irréversibilités existent. Étant donné qu'elle n'est pas une grandeur conservative, l'équation (1) ne peut être appliquée et une démarche spécifique doit être utilisée.

Rappelons quelques résultats établis section 2.5 de [1]. Pour un système ouvert, on appelle généralement **exergie** la fonction $x_h = h - T_0 s$. Pour un système ouvert multitherme en régime permanent traversé par un débit constant de

¹ Bien que cela soit en contradiction formelle avec le premier principe, on procède souvent ainsi pour prendre la même référence pour les enthalpies et les entropies des différents gaz (cela revient à ne pas prendre en compte les potentiels chimiques dans leurs enthalpies libres)

fluide, qui reçoit un travail τ et échange de la chaleur avec n sources extérieures à températures constantes T_k et avec l'environnement pris à la température T_0 , l'élimination de T_0 des équations traduisant les deux premiers principes de la thermodynamique conduit à l'équation exergetique (2) :

$$\Delta x_{hi} = \tau - \Delta x_h + \sum_{k=1}^n x_{qk} \quad (2)$$

$\Delta x_{hi} = T_0 \Delta s_i \geq 0$ est la dissipation d'exergie résultant des irréversibilités (Δs_i , positif ou nul, est la génération d'entropie), τ est le travail reçu par le système, Δx_h la variation d'exergie du fluide qui le traverse, $x_{qk} = \theta_k Q_k$ l'exergie-chaleur ou chaleur utile reçue de la source à température T_k , $\theta_k = 1 - T_0/T_k$ étant appelé facteur de Carnot.

Si la température de la source k est variable et non constante :

$$x_{qk} = \int_{T_a}^{T_b} \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \delta Q_k \quad (3)$$

Par exemple, si l'on suppose que les échanges de chaleur varient linéairement avec T_k ($\delta Q_k = Q_k dT_k / (T_b - T_a)$) :

$$x_{qk} = \left(1 - \frac{T_0}{T_b - T_a} \ln \left(\frac{T_b}{T_a}\right)\right) Q_k$$

L'équation (2) montre que le travail moteur maximum que peut fournir un système ouvert est égal à la somme des exergies-chaleurs des sources avec lesquelles il échange de la chaleur, diminuée de la variation d'exergie du fluide qui le traverse et de l'exergie détruite du fait des irréversibilités.

Lorsque plusieurs travaux utiles sont mis en jeu et que le système est traversé par plusieurs fluides, l'équation (2) se complique un peu. Pour calculer les irréversibilités de chaque composant j , elle devient (4) :

$$\Delta x_{hij} = \sum_{k=1}^n x_{qjk} - \sum_{k=1}^p m_{jk} \Delta x_{hjk} + \sum_{k=1}^q \tau_{jk} \quad (4)$$

Par exemple, pour calculer les irréversibilités dans un échangeur de chaleur, il suffit d'additionner membre à membre les équations (4) de chacun des deux fluides qui le traversent. S'il est adiabatique les exergies-chaleur sont nulles. Comme le travail utile est nul, l'irréversibilité est égale à la somme des variations des exergies des deux fluides.

Nous avons introduit section 2.5.5 de [1] le rendement exergetique d'un système, toujours compris entre 0 et 1, et d'autant plus élevé que les irréversibilités sont faibles. Il est défini comme le rapport des utilisations exergetiques aux ressources exergetiques. Les ressources exergetiques correspondent à la somme de toutes les exergies que l'on a dû fournir au cycle en provenance de l'extérieur. Les utilisations exergetiques représentent le bilan net du cycle, c'est-à-dire la somme algébrique des exergies produites et consommées en son sein.

Si le système est formé de composants vérifiant l'équation (3), cette définition générale se traduit mathématiquement par l'équation (5) :

$$\eta_x = 1 - \frac{\sum (\Delta x_{hij})}{\sum (\Delta x_{qj}^+) + \sum (\tau_j^+)} \quad (5)$$

Le dénominateur représente l'exergie apportée, c'est-à-dire la somme des exergies chaleurs positives et du travail utile fournis au cycle. Le numérateur correspond à la somme des irréversibilités du cycle.

Sur le plan pratique, et bien que la procédure ne soit pas encore automatisée dans le progiciel, l'établissement du bilan exergetique d'un cycle peut être fait de la manière suivante lorsqu'il est modélisé dans Thermoptim :

- une fois le modèle bien paramétré et calculé (il ne suffit en effet pas de charger un projet et de l'exporter : comme les exergies ne sont pas sauveées dans les fichiers de projet, elles doivent être recalculées dans chaque composant), on exporte le fichier de résultats (ligne "Exporter les résultats" du menu "Fichier de résultats"). Il s'agit d'un fichier texte qui peut facilement être relu dans un tableur, et dans lequel sont calculées les différentes valeurs d'un certain nombre de fonctions d'état relatives aux points (en variables intensives) et les énergies et exergies mises en jeu dans les transfos ;
- les premières lignes de ce fichier peuvent être copiées dans une feuille de calcul préalablement préparée pour l'établissement du bilan. On prendra garde à ce que le tableur ne reconnait pas toujours le séparateur des milliers, et qu'il peut donc être nécessaire de faire une suppression globale de ce séparateur (pour cela, copier le séparateur, sélectionner "Remplacer" dans le menu "Edition" du tableur, coller le séparateur dans le champ de recherche, et ne rien mettre dans le champ de remplacement, puis cliquer sur "tout remplacer") ;
- il faut ensuite reprendre à la main soigneusement la partie de la feuille de calcul qui dresse le bilan, les lignes relatives aux différentes transformations devant être construites différemment (voir ci-dessous les équations 6 et 7) selon qu'il s'agit de compressions ou détente adiabatiques ou d'échanges de chaleur avec l'extérieur. Pour ces dernières, il faut en plus spécifier la valeur de la température de la source T_k . Enfin, il faut comptabiliser dans $\Sigma (\tau_j^+)$ les puissances fournies au système par l'extérieur.
- si l'on ne dispose que de la version de démonstration de Thermoptim, il faut modifier légèrement le tableur pour recalculer les exergies mises en jeu dans les transformations à partir des valeurs calculées dans les écrans des points et des débits mis en jeu, qui devront être recopiées une à une ;

Pour les transformations simples, traversées par un débit m de fluide, l'équation (2) se réécrit selon les cas :

- pour les transfos adiabatiques ($Q = 0$, $\tau = m\Delta h$)

$$\Delta x_{hi} = m\Delta h - m\Delta x_h \quad (6)$$

- pour les transfos sans travail et avec échange de chaleur avec une source à température T ($\tau = 0$, $Q = m\Delta h$)

$$\Delta x_{hi} = m\Delta x_h + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) m\Delta h \quad (7)$$

Pour faciliter l'établissement du bilan exergétique, le fichier BilansExerThopt.xls rassemble un certain nombre de feuilles de calcul relatives aux exemples du catalogue de Thermoptim.

Sur la feuille de calcul de la figure 3, on retrouve dans la partie haute le fichier de résultats de Thermoptim, et dans la partie basse les lignes qui doivent être vérifiées. La liaison entre les parties basse et haute se fait par les formules des cellules ; celles qui sont en rouge ne doivent pas être modifiées, sauf cas particuliers expliqués ci-dessous en italique, tandis que celles qui sont en bleu correspondent aux puissances mécaniques mises en jeu, et celles en noir aux échanges avec les sources externes. Ce qu'il faut bien vérifier, c'est que chaque type de ligne s'applique bien à un composant approprié (l'ordre des transfos est imprédictible dans Thermoptim car il dépend de celui de leur création), et que les températures T_k sont bien entrées. On rectifie ainsi ligne à ligne le calcul du bilan en faisant des copier-coller. On remarque sur l'exemple ci-dessous qu'apparaît une transfo-point ("prélèvement") qui, bien évidemment, ne participe pas au bilan exergétique. On pourra la supprimer si on le souhaite, d'abord de la partie basse, puis de la partie haute pour éviter de perdre les références des formules.

Outre ces mises en forme de la partie basse de la feuille de calcul, il peut être nécessaire d'effectuer un certain nombre de modifications, en fonction du cas traité. Elles sont indiquées ci-dessous en italique.

En premier lieu, les mélangeurs n'étant pas des transfos dans Thermoptim, ils ne sont pas automatiquement inclus dans le bilan exergétique de cette feuille de calcul. Il faut donc les rajouter à la main, l'équation (3) ne comportant que la variation d'exergie au sein du composant puisque le mélangeur est adiabatique et sans travail.

Pour les chambres de combustion, on remplace l'exergie-chaleur par l'apport exergétique du combustible. Selon les auteurs, la littérature spécialisée sur l'exergie indique que l'exergie d'un combustible est proche de son PCI ou de son PCS. Ces deux valeurs différant finalement assez peu, et compte tenu du fait que nous ne cherchons à dresser qu'un bilan approximatif, nous suivrons ceux qui l'assimilent à son PCI, disponible dans Thermoptim.

économiseur	B	3a	échange	1126,84604	494,901154	payante	1	
prélèvement	4a	4a	échange	0	0	autre	0,15	
resurchauffe	4a	3c	échange	466,171557	275,380302	payante	0,85	
surchauffeur	3b	3	échange	890,820093	523,336681	payante	1	
vaporiseur	3a	3b	échange	898,274438	482,723771	payante	1	
bilan enthalpique				bilan exergetique				
évolution	dh	r	Q	Tk	dxq	dxh	dxhi	% pertes globales
compression liq 2	15	15				14	0	0,01%
compression liquide	2	2				3	0	-0,01%
turbine HP	-417	-417				-454	37	2,74%
turbine BP	-1030	-1030				-1209	179	13,32%
condenseur	-1952		-1952	288,15	0	-32	32	2,36%
économiseur	1127		1127	1600	924	495	429	31,95%
prélèvement	0		0			0	0	0,00%
resurchauffe	466		466	1600	382	275	107	7,96%
surchauffeur	891		891	1600	730	523	207	15,42%
vaporiseur	898		898	1600	737	483	254	18,90%
mélangeur						-99	99	7,35%
cycle	0	-1430	1430			0	1343	100,0%
						sigma(xq+)	2773	
						sigma(tau+)	0,00	
rendement énergétique		42,29%	rendement exergetique		51,58%			

Figure 3 : Bilan exergetique d'un cycle à vapeur à réchauffe et prélèvement

Un autre cas particulier correspond aux cycles non fermés, pour lesquels il faut prendre en compte dans le bilan l'exergie entrant dans le cycle et celle en sortant, et modifier en conséquence le calcul de Δx_h .

Il faut noter que pour établir ce bilan, une correction doit être apportée aux exergies entrantes et sortantes pour tenir compte de ce que les températures et pression de référence des corps ne sont généralement pas T_0 et 1 bar. Pour cela, on leur soustrait l'exergie X_0 du corps à T_0 et 1 bar. On parle alors d'exergie relative.

L'exemple de la turbine à gaz simple de ThermoOptim donné figure 4 illustre ces deux points :

nom	point amont	point ava	type	m ?H	m ?Xh	type_ener	débit	
compresseur	entrée d'ai	2	compressor	442,713499	402,237893	utile	1	
turbine	3	4	détente	-760,93531	-796,4106	utile	1,01826855	
chambre de combustic	2	3	combustion	889,54487	619,474042	payante	1,01826855	
bilan enthalpique				bilan exergetique				
évolution	dh	r	Q	Tk	dxq	dxh	dxhi	% pertes globales
compresseur	443	443				402	40	7,08%
turbine	-761	-761				-796	35	6,21%
chambre de combustic	890		890		890	619	270	47,27%
aspiration / échappement						-225	225	39,44%
cycle	571	-318	890			0	571	100,0%
						sigma(xq+)	890	
						sigma(tau+)	0,00	
rendement énergétique		35,77%	rendement exergetique		35,77%			

Figure 4 : Bilan exergetique d'une turbine à gaz simple

Ici, l'exergie entrant et sortant du cycle est prise en compte au niveau d'une ligne supplémentaire appelée "aspiration / échappement". Elle représente une part très importante des pertes.

Lorsqu'il y a des échanges de chaleur internes, comme c'est le cas dans les cycles combinés, le calcul de la perte exergetique demande aussi à être modifié comme nous l'avons vu plus haut : elle est égale, en valeur absolue, à la somme des variations d'exergie des deux fluides qui échangent de la chaleur. Etant donné qu'il s'agit d'échanges internes, il est bien évidemment inutile de calculer les exergies-chaleurs associées.

bilan enthalpique			bilan exergetique					
évolution	dh	τ	Q	Tk	dxq	dxh	dxhi	% pertes globales
HRSG 2	-1371		-1371			-681	212	6,06%
HRSG 1	-1231		-1231			-768	133	3,82%
HRSG 0	-699		-699			-498	102	2,92%
compression liquide	12	12				12	0	-0,01%
turbine	-1235	-1235				-1447	211	6,05%
condenseur	-2077		-2077	288,15		-64	64	1,82%
économiseur	1371		1371			469		0,00%
surchauffeur	699		699			395		0,00%
vaporiseur	1231		1231			634		0,00%
compresseur air	3320	3320				3017	304	8,69%
turbine gaz	-5121	-5121				-5358	237	6,80%
chambre de combustion	6356		6356		6356	4381	1974	56,49%
aspiration / échappement						-257	257	7,35%
						351		
cycle	1254	-3024	4278			188	3494	100,0%
						6356		
						0,00		
rendement énergétique		47,59%	rendement exergetique		45,02%			

Figure 5 : Bilan exergetique d'un cycle combiné à un niveau de pression

Si l'on veut connaître le détail des pertes dans les différents échangeurs internes, il faut donc modifier la formule de calcul de Δx_{hi} pour les fluides mis en jeu, en associant bien deux à deux les lignes correspondantes. Si l'on se contente de dresser le bilan global, il suffit de sommer globalement les variations d'exergie de tous les fluides.

Par exemple, pour le cycle combiné à un niveau de pression de la figure 5, les lignes suivantes doivent être appariées : les lignes 42 et 48 correspondant à l'économiseur, 43 et 50 au vaporiseur, et 44 et 49 au surchauffeur. Pour plus de clarté, il est bien sûr possible de modifier l'ordre des lignes des parties basse et haute de la feuille de calcul pour que les fluides appariés se succèdent.

2 RÉFÉRENCES

- [1] GICQUEL, R. Systèmes Energétiques, tome 1 : méthodologie d'analyse, bases de thermodynamique, Thermoptim, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, février 2001.
- [2] GICQUEL, R. Systèmes Energétiques, tome 2 : Applications, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, novembre 2001.
- [3] GICQUEL, R. Activités pédagogiques avec Thermoptim : Explorations autour des diagrammes et de divers cycles, Ecole des Mines de Paris, mai 2002.
- [4] GICQUEL, R. Activités pédagogiques avec Thermoptim : Exploration de divers cycles, problématique d'optimisation, Ecole des Mines de Paris, octobre 2002.
- [5] L. BOREL, Thermodynamique et énergétique, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Vol. 1, 1984, Vol. 2 (Exercices corrigés), 1987.
- [6] L. BOREL, Introduction aux nouveaux bilans énergétiques, Entropie n° 153, 154, Paris, 1990.
- [7] A. BEJAN, G. TSATSARONIS, M. MORAN, Thermal design and optimization, Wiley publishers, 1996.
- [8] M. MORAN, Availability analysis: a guide to efficient energy use, Prentice Hall, New York, 1989.
- [9] T. J. KOTAS, The exergy method of thermal plant analysis, Butterworth, London, 1985