

Méthode pratique de construction de bilans exergétiques avec les structures productives

1 Introduction

L'intérêt principal des bilans exergétiques est de permettre d'étudier la répartition des irréversibilités dans un système, et de mettre ainsi en évidence la contribution relative de chacun des composants aux pertes globales. L'annexe 4 présente quelques rappels théoriques sur ces bilans.

Il y a plusieurs manières de construire des bilans exergétiques avec Thermoptim.

La plus directement accessible convient bien aux cycles simples, pour lesquels dresser un bilan exergétique ne pose pas de difficulté particulière mais demande cependant à être fait avec grand soin faute de quoi des erreurs peuvent être commises. Une note méthodologique détaillée téléchargeable depuis une page du portail Thermoptim-UNIT¹ a été rédigée à cet effet et est complétée par une feuille de calcul Excel qui permet, moyennant quelques précautions, de réutiliser les fichiers de résultats de Thermoptim. De plus, une séance Diapason (S06) traite spécifiquement de ce sujet.

Toutefois, même en utilisant ce tableur, l'établissement du bilan exergétique d'un système un peu compliqué peut se révéler difficile en pratique, et ceci pour deux raisons principales :

- d'une part de nombreuses modifications doivent être apportées au tableur ; même si chacune est relativement simple, leur nombre multiplie les risques d'erreur et la procédure est assez rébarbative ;
- d'autre part les bilans exergétiques n'étant pas conservatifs, il n'existe pas de moyen simple de vérifier la cohérence du bilan obtenu.

Dès lors que le système étudié est un peu complexe, l'établissement de son bilan exergétique peut ainsi se révéler un **parcours semé d'embûches**.

Il se trouve qu'il est possible d'automatiser l'établissement des bilans exergétiques, même pour des systèmes complexes, en introduisant un nouveau type de schéma appelé **structure productive** par Valero [1], qui est un graphe permettant de représenter les produits ou consommations d'exergie des différents composants d'un système énergétique. L'annexe 1 présente succinctement un exemple proposé par Valero illustrant les liens existant entre schéma physique et structure productive.

Même s'il n'est bien évidemment pas impératif de recourir à elles pour dresser des bilans exergétiques, les structures productives présentent un grand intérêt car elles :

- permettent d'obtenir une représentation graphique très parlante des flux d'exergie dans un système énergétique ;
- peuvent de générer très largement automatiquement des bilans exergétiques dès lors que l'on dispose d'un schéma Thermoptim et de son paramétrage thermodynamique ;
- facilitent et sécurisent l'établissement des bilans exergétiques ;
- présentent de plus l'intérêt de déboucher sur des analyses thermo-économiques pour ceux qui souhaitent en effectuer.

Pour les utiliser, il n'est pas nécessaire d'en maîtriser toute la complexité : il suffit de mettre en œuvre la méthode que nous proposons dans cette note, résumée section 4.3, en suivant pas à pas les quelques exemples qui y sont présentés, quitte à approfondir ultérieurement les concepts sous-jacents si besoin est.

Par souci de simplicité, nous n'introduisons que le minimum de notions permettant d'utiliser la méthode proposée, puis nous traiterons toute une série d'exemples destinés à faciliter sa prise en mains. Les explications détaillées sur les structures productives sont fournies en annexe 1 et 2 et dans les références bibliographiques, et l'annexe 3 fournit quelques indications sur la manière de programmer les classes externes des composants pour que leurs bilans exergétiques soient pris en compte.

¹ <http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/analyse-quantitative.html>

2 Editeur de structures productives de ThermoOptim

Nous avons implémenté dans ThermoOptim un nouvel éditeur permettant de concevoir des structures et de les relier au simulateur et à l'éditeur de schémas pour pouvoir calculer proprement les allocations exergetiques de chaque composant et représenter les flux d'exergie échangés (figure 1).

Il est accessible à partir du menu "Spécial" de l'écran du simulateur (Ctrl B). On reconnaît sur sa palette l'icône des transfos-points  pour représenter les flux d'entrée et de sortie, celle des unités productives ou dissipatives , et celles des jonctions  et des embranchements .

Cet éditeur de structures productives étant analogue à l'éditeur de schémas, le détail de ses fonctionnalités élémentaires est donné dans le tome 1 du manuel de référence de ThermoOptim.

On construit une structure productive soit à la main en sélectionnant les icônes sur la palette, en les plaçant sur le plan de travail, et en les connectant par des liens, de manière analogue à celle utilisée pour constituer un schéma, soit de manière automatique en générant une structure productive à partir du simulateur et du schéma physique.



Figure 1 : Editeur de structures productives

2.1 Unités productives ou dissipatives

Une structure productive est composée d'**unités productives et dissipatives** (UPD) qui permettent de dresser les bilans exergetique des différents composants du système physique considéré, de jonctions et d'embranchements.

Les ressources exergetiques d'un composant peuvent être de quatre types (exergie-chaleur, exergie chimique, travail, et transfert d'exergie des fluides le traversant), et les produits de deux types (travail et variation d'exergie des fluides le traversant). Les exergies-chaleurs apportées par des sources externes n'étant pas matérialisées par un lien dans la structure productive, trois entrées seulement peuvent aboutir à une UPD.

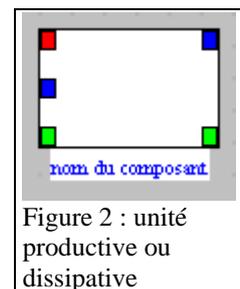


Figure 2 : unité productive ou dissipative

Une unité productive ou dissipative (UPD) est donc représentée par un rectangle muni de trois ports d'entrée et deux de sortie (figure 2), dont les couleurs sont différenciées pour distinguer les différents types de flux exergetiques et permettre de distinguer graphiquement les ressources et produits.

L'affectation des couleurs est la suivante pour les ports d'entrée : rouge pour les combustibles (exergie chimique), bleu pour la puissance mécanique, et vert pour l'exergie d'un fluide ; pour les ports de sortie : bleu pour la puissance mécanique, et vert pour l'exergie d'un fluide.

Les valeurs des flux exergetiques peuvent apparaître sur les liens, qui sont colorés selon le code de couleurs retenu pour les ports d'entrée et de sortie.

2.2 Jonctions et embranchements

L'exergie du fluide qui traverse un composant peut augmenter ou diminuer. Nous l'appellerons **extenseur d'exergie** si elle augmente, et **réducteur d'exergie** si elle diminue.

Un **extenseur** est représenté par une unité productive avec une jonction en sortie, à laquelle arrivent deux liens : celui issu du port vert de l'unité productive (flux exergetique de sortie), et celui correspondant au flux exergetique d'entrée (figure 3).

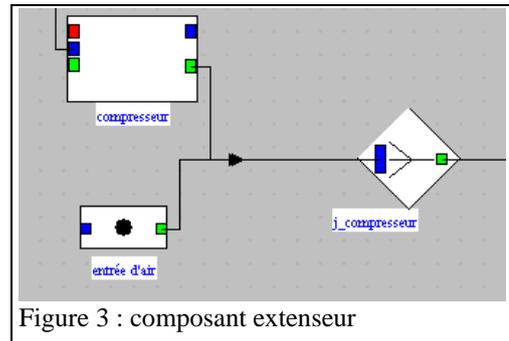


Figure 3 : composant extenseur

Sur cette figure, l'exergie totale disponible en sortie du compresseur est la somme de deux valeurs : d'une part le flux exergetique en entrée du composant, représenté par la transfo-point "entrée d'air", et d'autre part la variation d'exergie communiquée au fluide dans le compresseur, lequel la reçoit sous forme mécanique. Le pseudo-mélangeur ou jonction "j_compresseur" sert à modéliser cette sommation.

Un **réducteur** est représenté par une unité productive avec un embranchement en entrée, dont partent deux liens : celui aboutissant au port vert de l'unité productive ou dissipative (flux exergetique d'entrée), et celui correspondant au flux exergetique de sortie (figure 4).

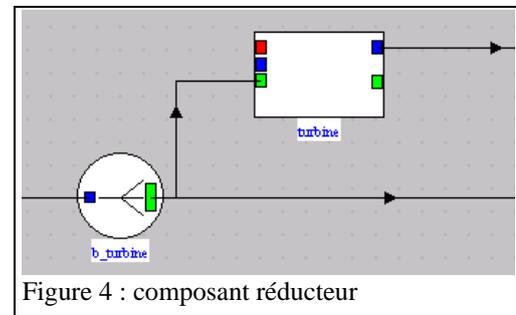


Figure 4 : composant réducteur

Sur cette figure, l'exergie totale disponible en amont de la turbine se décompose en deux parties : d'une part celle qui sert de "combustible" à la turbine et est convertie sous forme mécanique, et d'autre part celle qui reste disponible en sortie de turbine. Le pseudo-diviseur ou embranchement "b_turbine" sert à modéliser cette répartition.

On notera que, pour les composants extenseurs (ceux pour lesquels $\Delta x_h > 0$), le produit exergetique P_i vaut Δx_h . Pour la turbine (pour laquelle $\Delta x_h < 0$) $P_i = \tau$. Les laminages étant purement dissipatifs, $P_i = 0$.

3 Méthode de création des structures productives et des bilans exergetiques

3.1 Création automatique de la structure productive

Il est possible de construire à la main avec Thermoptim la structure productive d'un système énergétique, mais ce n'est pas la meilleure manière d'opérer si on en connaît le schéma physique, comme c'est généralement le cas.

La structure productive peut en effet très largement se déduire du schéma physique (schéma Thermoptim) et du paramétrage thermodynamique (projet Thermoptim). A la condition que la température T_0 de l'environnement soit correctement initialisée (menu Aide / paramètres globaux du simulateur), ce dernier sert notamment à distinguer les composants extenseurs et réducteurs d'exergie ainsi qu'à calculer les bilans exergetiques des UPD.

Dans une première étape, en activant la ligne « Transfert du schéma » du menu « Spécial », on crée toutes les unités productives en respectant les règles de correspondance énoncées ci-dessus. Il faut bien entendu qu'un projet Thermoptim et son schéma aient été préalablement ouverts et recalculés.

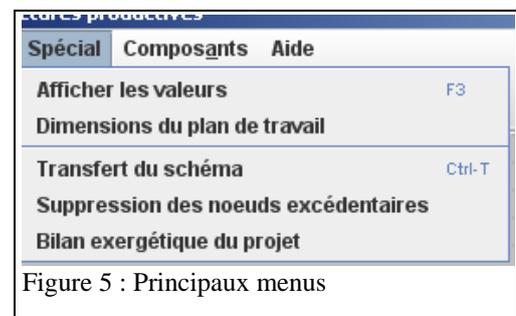


Figure 5 : Principaux menus

Notons qu'en créant la structure productive, il est fréquent que l'on introduise des jonctions en série et des embranchements en série, qui peuvent très bien être regroupés pour simplifier la structure productive. Il suffit pour cela que plusieurs extenseurs ou plusieurs réducteurs soient disposés en série dans le schéma. C'est par exemple le cas lorsqu'un échangeur à changement de phase comme un générateur de vapeur est représenté par trois échangeurs en série (économiseur, vaporiseur, surchauffeur).

Aussi est-il possible, dans une deuxième étape, de sélectionner dans l'éditeur de structures les pseudos-nœuds en série, et de les fusionner en activant la ligne « Suppression des nœuds excédentaires » du menu « Spécial ». Afin d'éviter des erreurs de représentation, vous pouvez choisir de ne pas automatiquement supprimer les véritables nœuds provenant du schéma physique, sachant qu'ils peuvent l'être à la main dans un second temps.

Dans une troisième étape, on finit de renseigner la structure productive, en paramétrant les écrans des bilans exergetiques présentés ci-dessous. Par exemple, les entrées d'exergie bleues (puissance mécanique) ne sont pas connectées à ce stade, tout comme ne sont pas définies les températures des sources externes avec lesquelles des exergies-chaleur sont échangées.

3.2 Bilans exergetiques de composants

Dans Thermoptim, le lien logique entre la structure productive et le simulateur se fait par le nom du composant. Il faut donc nommer l'UPD du même nom que l'élément correspondant du simulateur.

A chaque unité productive correspond un écran de bilan exergetique de composant, qui permet de préciser certains paramètres en vue de calculer les ressources et les produits exergetiques, ainsi que les irréversibilités et le rendement exergetique du composant, ce que, par raccourci, nous désignerons par dresser le bilan exergetique du composant.

Un double-clic sur l'unité productive ouvre cet écran (figures 6 et 7).

La figure 6 montre l'écran d'un composant turbine, dont le bilan exergetique peut être déterminé sans paramétrage spécifique : la ressource exergetique provient de la variation d'exergie du fluide qui le traverse (ΔXh^+), le produit est la puissance mécanique (τ), le rendement exergetique et la valeur des irréversibilités s'en déduisent directement.

Category	Symbol	Value
Resource	τ^+	0
Resource	ΔXh^+	1 556,221
Resource	xq^+	0
Product	τ	1 326,01
Product	ΔXh	0
Exergy efficiency		0,852071
Irreversibilities		230,211

Buttons: display turbine, Calculate, Quit

Figure 6 : Bilan exergetique d'un composant turbine

Lorsque le composant est du type "échange", différentes possibilités existent.

Lorsqu'il s'agit d'une **entrée ou une sortie de fluide**, ce qui correspond à une transfo-point reliée uniquement en amont ou en aval, son exergie totale (physique et chimique) est prise en compte comme indiqué en annexe 3. Notez bien que cela peut jouer sur l'équilibrage des bilans globaux car les modes de calcul des diverses propriétés exergetiques ne sont pas les mêmes.

S'il s'agit d'une **sortie de fluide** avec rejet dans l'environnement, l'exergie est perdue, ce qui constitue une irréversibilité. Si au contraire cette exergie est valorisée en externe, il s'agit d'un produit exergetique sans irréversibilité. L'écran de calcul des exergies est muni d'une option permettant de spécifier cette situation (Valuable exergy).

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 : elle est égale, en valeur absolue, à la somme des variations d'exergie des deux fluides qui échangent de la chaleur. L'écran des bilans exergetiques comporte une option (Internal exchange) pour spécifier ce paramétrage, qui est sélectionné par défaut lorsqu'un échangeur existe dans le schéma physique (figure 7).

Enfin, lorsque l'échange de chaleur a lieu avec une **source d'énergie externe**, l'exergie-chaleur mise en jeu doit être évaluée, ce qui suppose que la température de la source soit connue. L'écran de calcul des exergies est muni d'une option permettant de spécifier cette situation (External source), et d'un champ destiné à entrer la température de la source.

Pour les **laminages**, l'exergie reçue est l'exergie totale entrante, et l'exergie fournie l'exergie totale sortante. L'irréversibilité est égale à leur différence.

Etant donné que les fluides extenseurs d'exergie sont représentés par une UPD couplée à un mélangeur, il faut bien distinguer ces pseudos-mélangeurs des mélangeurs réels du système physique, l'irréversibilité qui prend place dans un vrai mélangeur pouvant provenir de différentes sources :

- diminution de la pression d'un fluide (perte de charge)
- mélange avec changement de composition

On trouvera en annexe 2 un tableau montrant comment les différents types de composants du noyau de Thermoptim sont représentés sous forme d'UPD.

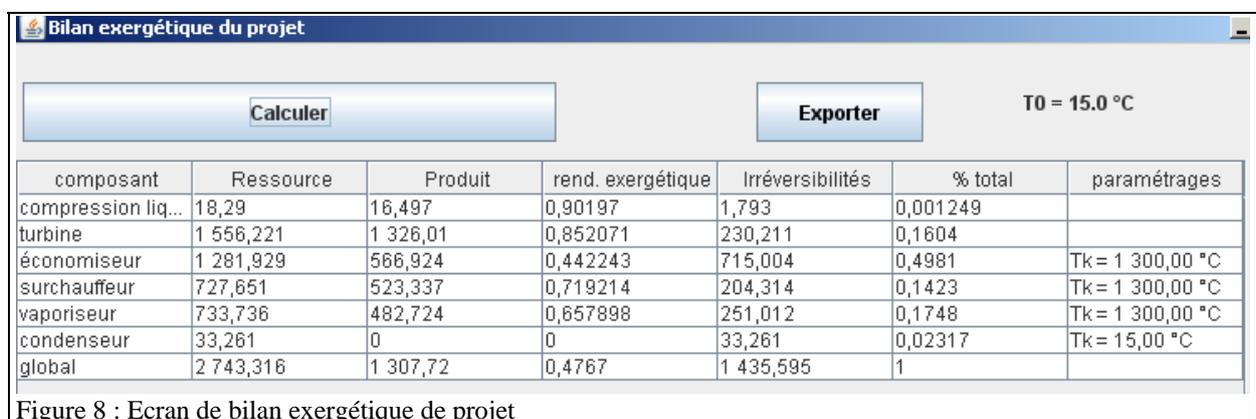
Les **composants externes** peuvent aussi être représentés dans une structure productive. On se référera au manuel de référence tome 3 pour plus de précisions à ce sujet.

3.3 Génération des bilans exergétiques

Une fois une structure productive construite, on peut soit calculer un par un les **bilans exergétiques** des diverses UPD, soit ouvrir un écran permettant de le faire globalement pour l'ensemble du projet en activant la ligne « Bilan exergétique du projet » du menu « Spécial » (figure 8). Thermoptim construit alors un tableau dont les lignes correspondent à chacun des composants, plus une pour le système dans son ensemble, qui présente :

- comme ressource la somme des exergies-chaleurs positives et du travail utile fournis $\Sigma (\Delta x_{qj}^+) + \Sigma (\tau_j^+)$
- comme produit la somme des exergies sortant du système
- le rendement exergétique du système
- la somme des irréversibilités.

Si les règles d'établissement du bilan exergétique retenues dans Thermoptim ne lui donnent pas satisfaction, l'utilisateur peut l'exporter et le retravailler dans un tableur.



composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
compression liq...	18,29	16,497	0,90197	1,793	0,001249	
turbine	1 556,221	1 326,01	0,852071	230,211	0,1604	
économiseur	1 281,929	566,924	0,442243	715,004	0,4981	Tk = 1 300,00 °C
surchauffeur	727,651	523,337	0,719214	204,314	0,1423	Tk = 1 300,00 °C
vaporiseur	733,736	482,724	0,657898	251,012	0,1748	Tk = 1 300,00 °C
condenseur	33,261	0	0	33,261	0,02317	Tk = 15,00 °C
global	2 743,316	1 307,72	0,4767	1 435,595	1	

Figure 8 : Ecran de bilan exergétique de projet

Des exemples seront donnés ci-dessous.

4 Mise en application de la méthode

4.1 Exemple d'un cycle à vapeur

Le schéma de l'installation et la valeur des principaux paramètres sont donnés figure 9.

La structure productive que vous obtenez automatiquement est donnée figure 10.

Elle fait apparaître deux diviseurs et deux mélangeurs en série, qui peuvent être fusionnés. La structure productive devient celle de la figure 11.

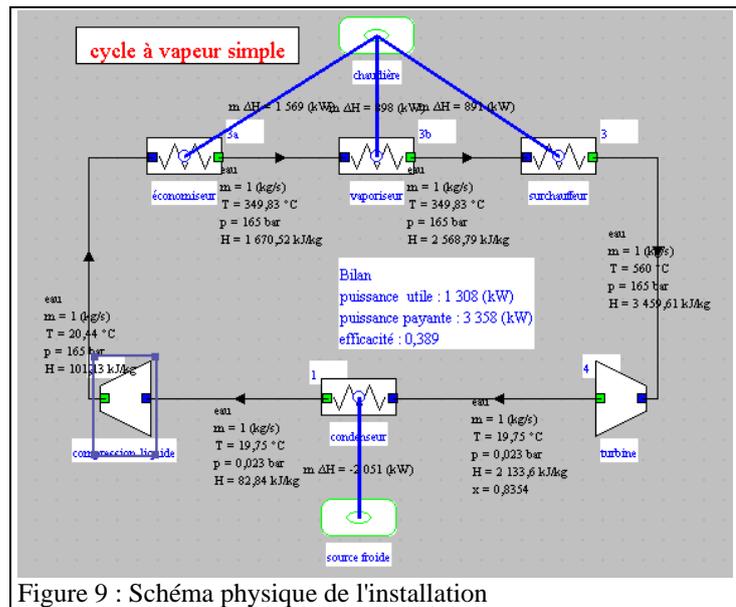


Figure 9 : Schéma physique de l'installation

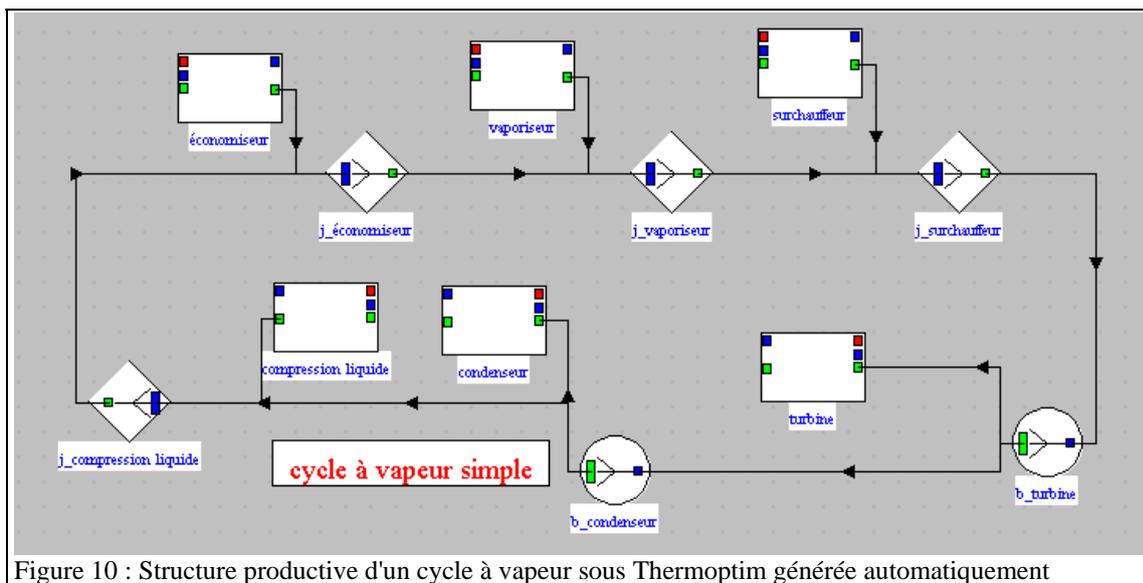


Figure 10 : Structure productive d'un cycle à vapeur sous ThermoOptim générée automatiquement

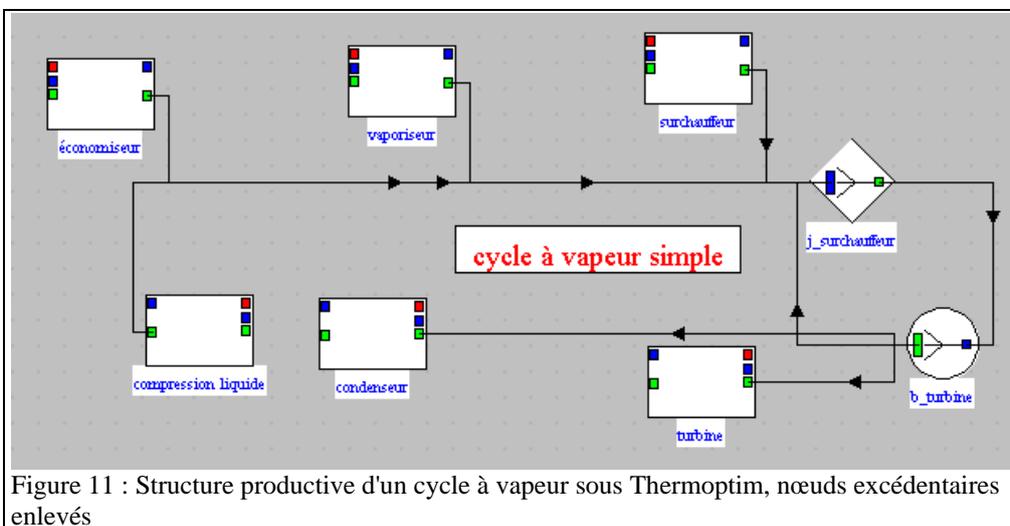


Figure 11 : Structure productive d'un cycle à vapeur sous ThermoOptim, nœuds excédentaires enlevés

Retravaillez la structure pour obtenir une meilleure lisibilité, en réorientant de gauche à droite ou de droite à gauche certains composants. Vous obtenez un résultat voisin de celui de la figure 12 :

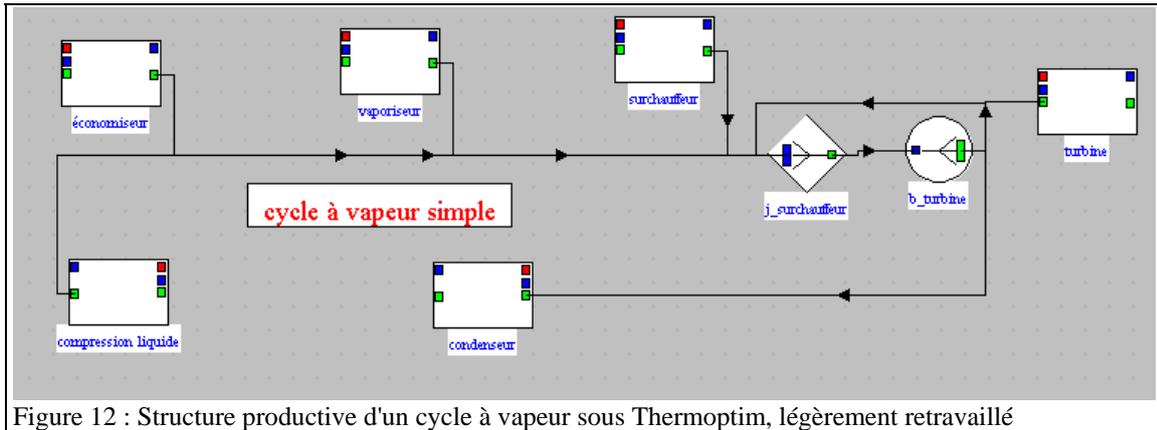


Figure 12 : Structure productive d'un cycle à vapeur sous ThermoOptim, légèrement retravaillé

Ce schéma n'est pas encore complètement paramétré. Si l'on essaie d'établir le bilan exergétique complet du projet (menu Spécial de l'éditeur), on obtient le résultat de la figure 13.

composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
turbine	1 556,221	1 326,01	0,852071	230,211	-0,1669	
compression liq...	18,29	16,497	0,90197	1,793	-0,0013	compr
condenseur	33,261	-112,617	-3,38588	145,878	-0,1057	Tk = 0 °C
économiseur	0	566,924	0	-653,107	0,4734	Tk = 0 °C
surchauffeur	0	523,337	0	-572,256	0,4148	Tk = 0 °C
vaporiseur	0	482,724	0	-532,052	0,3857	Tk = 0 °C
global	18,29	2 786,378	76,426	-1 379,533	1	

Figure 13 : Bilan exergétique avant paramétrage

La dernière colonne, intitulée "settings", donne quelques informations synthétiques sur les paramétrages pris en compte : ThermoOptim considère que le condenseur et les trois parties de la chaudière échangent de la chaleur avec des sources à 0 °C, et que la pompe (compression liquide) représente un apport d'exergie mécanique externe (compr), car elle n'est pas reliée à la turbine.

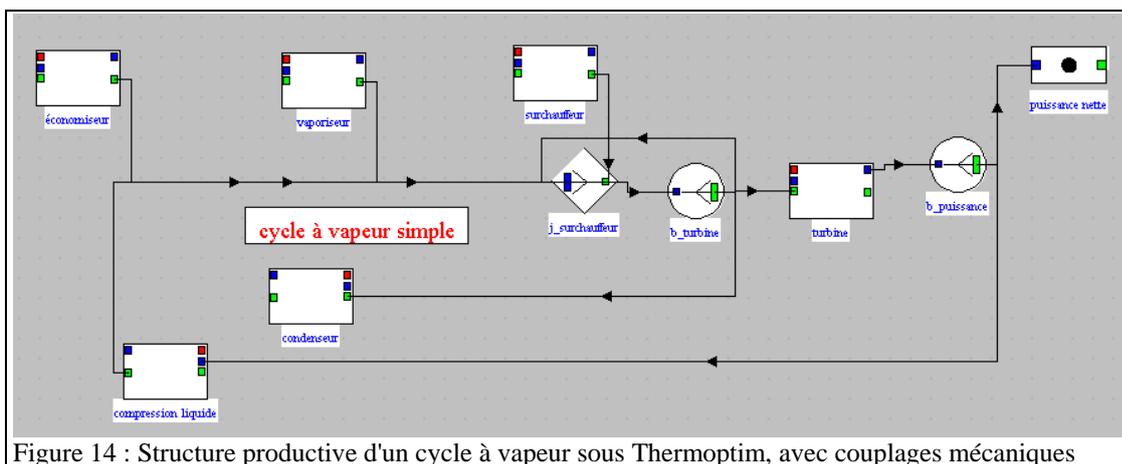


Figure 14 : Structure productive d'un cycle à vapeur sous ThermoOptim, avec couplages mécaniques

Dans la structure productive, il manque en effet le couplage de travail, entre la turbine et la pompe, que nous représenterons par un diviseur en sortie de turbine, avec deux branches, l'une représentant ce couplage, et l'autre un lien avec une nouvelle transfo-point mettant en évidence la puissance nette disponible (figure 14).

Cette structure productive s'interprète de la manière suivante : la centrale à vapeur est une machine qui reçoit de l'extérieur un apport d'exergie au niveau de la chaudière, et, par recyclage interne, un apport d'exergie au niveau de la pompe, qui sont les deux unités productives à gauche de l'écran. Cette exergie est pour partie convertie sous forme mécanique dans la turbine et pour partie dissipée dans le condenseur. Le travail net correspond à la fraction de puissance mécanique non recyclée.

Pour terminer l'établissement de la structure productive, il reste à paramétrer les écrans exergetiques de la chaudière et du condenseur en entrant les températures de sources externes, égales respectivement à 1300 °C et 15 °C.

Le bilan exergetique du projet complet est donné figure 15. Il donne, pour chaque composant, les valeurs de l'exergie entrante (ressource), sortante (produit), de son rendement exergetique, qui le qualifie de manière intrinsèque, indépendamment des autres composants, des irréversibilités, et de leur part dans le total, qui le qualifie de manière relative.

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
compression liq...	18,294	16,497	0,901773	1,797	0,001252	
turbine	1 556,221	1 326,014	0,852073	230,207	0,1604	
économiseur	1 281,928	566,924	0,442243	715,004	0,4981	Tk = 1 300,00 °C
surchauffeur	727,651	523,337	0,719214	204,314	0,1423	Tk = 1 300,00 °C
vaporiseur	733,74	482,724	0,657895	251,016	0,1749	Tk = 1 300,00 °C
condenseur	33,261	0	0	33,261	0,02317	Tk = 15,00 °C
global	2 743,319	1 307,72	0,4767	1 435,599	1	

Figure 15 : Bilan exergetique du projet complet

A titre d'exemple, la pompe (compression liquide) a un rendement exergetique de 90 % environ, mais sa part dans le total des irréversibilités n'est que de 1,25 %.

Une fois le bilan exergetique du projet calculé, il est possible de faire afficher dans l'éditeur de structures productives les valeurs des exergies mises en jeu (figure 16). Les unités n'apparaissent que si l'unité de débit a été sélectionnée dans l'écran principal du simulateur.

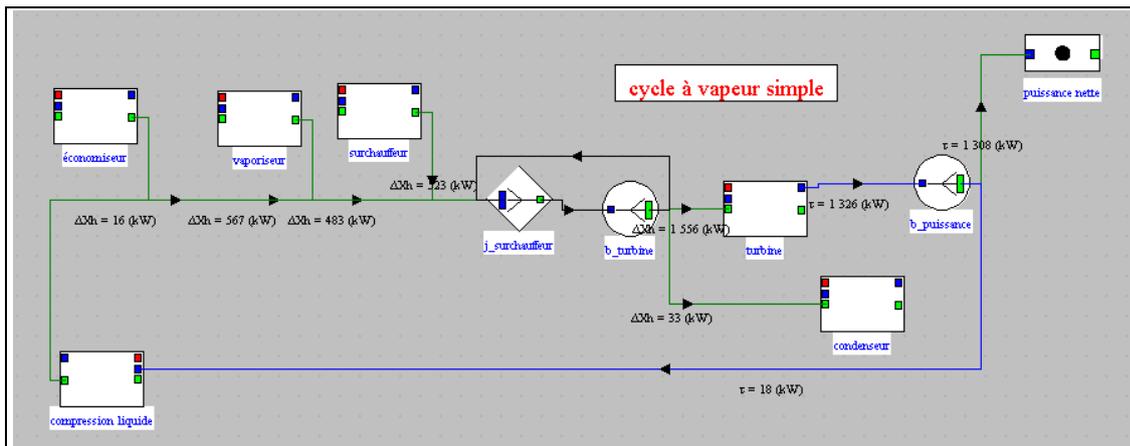


Figure 16 : Structure productive d'un cycle à vapeur sous Thermoptim, avec affichage des exergies

Le bilan exergetique peut par ailleurs être exporté sous forme d'un fichier texte structuré, qui peut être ouvert dans un tableur pour effectuer différents traitements (figure 17). Nous détaillerons ce point ultérieurement, à propos d'un exemple plus compliqué.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Exergy balance						
2							
3	composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	
4	compression	18,29	16,497	0,90197	1,793	0,001249	
5	turbine	1556,221	1326,01	0,852071	230,211	0,1604	
6	économiseur	1281,929	566,924	0,442243	715,004	0,4981	Tk = 1 300,00 °C
7	surchauffeur	727,651	523,337	0,719214	204,314	0,1423	Tk = 1 300,00 °C
8	vaporiseur	733,736	482,724	0,657898	251,012	0,1748	Tk = 1 300,00 °C
9	condenseur	33,261	0	0	33,261	0,02317	Tk = 15,00 °C
10	global	2743,316	1307,72	0,4767	1435,595	1	
11	T0 = 288.15 K						

Figure 17 : Bilan exergetique du projet complet exporté dans un tableur

4.2 Exemple d'un cycle de réfrigération

Le schéma de l'installation et la valeur des principaux paramètres sont donnés figure 18, et la structure productive que vous obtenez automatiquement figure 19.

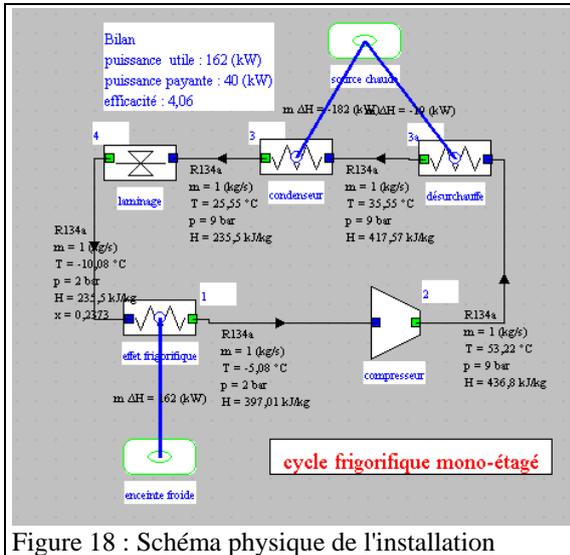
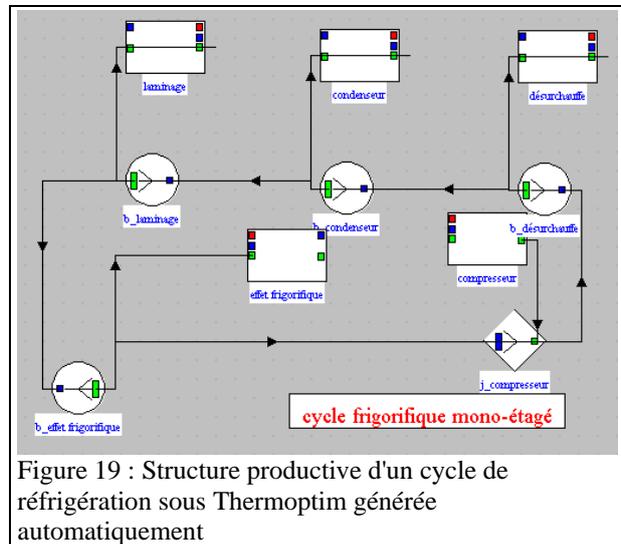


Figure 18 : Schéma physique de l'installation



Elle fait apparaître deux diviseurs et deux mélangeurs en série, qui peuvent être fusionnés. Vous obtenez alors la structure productive de la figure 20.

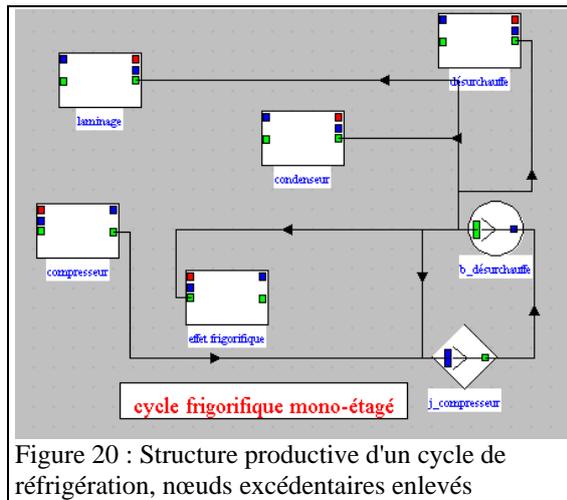


Figure 20 : Structure productive d'un cycle de réfrigération, nœuds excédentaires enlevés

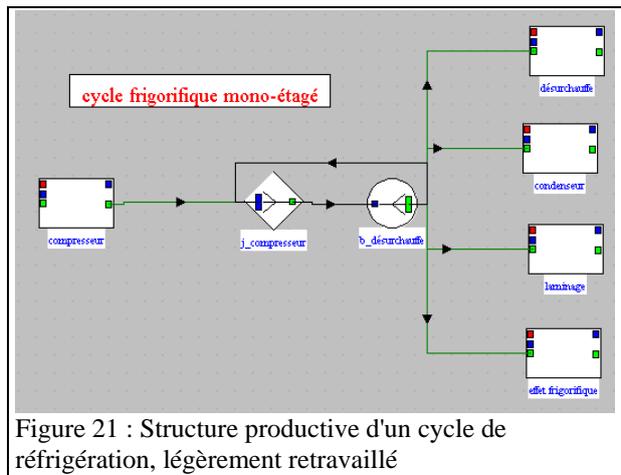


Figure 21 : Structure productive d'un cycle de réfrigération, légèrement retravaillé

Retravaillez la structure pour obtenir une meilleure lisibilité, en réorientant de gauche à droite ou de droite à gauche certains composants. Vous obtenez un résultat voisin de celui de la figure 21.

Cette structure productive s'interprète très simplement : la machine frigorifique reçoit de l'extérieur un apport d'exergie au niveau du compresseur. Cette exergie est pour partie convertie dans l'évaporateur (effet frigorifique), le reste étant dissipé dans le désurchauffeur, le condenseur et le détendeur (laminage).

Ce schéma n'est pas encore paramétré complètement. Si l'on essaie d'établir le bilan exergétique complet du projet (menu Spécial de l'éditeur), on obtient le résultat de la figure 22.

La dernière colonne, intitulée "settings", donne quelques informations synthétiques sur les paramétrages pris en compte : le compresseur représente un apport d'exergie externe, tandis que le désurchauffeur, le condenseur et l'évaporateur sont considérés comme échangeant de l'exergie-chaaleur avec une source à $0 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui est bien évidemment absurde.

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
laminage	4,024	0	0	4,024	0,09585	
compresseur	39,797	32,845	0,825308	6,952	0,1656	compr
désurchauffe	1,681	-1,056	-0,628162	2,738	0,06522	Tk = 0 °C
condenseur	11,782	-9,998	-0,848636	21,78	0,5188	Tk = 0 °C
effet frigorifique	15,358	8,869	0,577504	6,489	0,1546	Tk = 0 °C
global	39,797	-2,185	-0,05493	41,983	1	

Figure 22 : Bilan exergetique avant paramétrage

Pour terminer l'établissement de la structure productive, il reste à paramétrer les températures des sources externes avec lesquelles des exergies-chaleur sont échangées. Nous prendrons -3 °C pour l'évaporateur et 15 °C pour le désurchauffeur et le condenseur.

Le bilan exergetique du projet complet peut être recalculé. Il est donné figure 23.

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
laminage	4,024	0	0	4,024	0,1386	
compresseur	39,797	32,845	0,825308	6,952	0,2394	compr
désurchauffe	1,681	0	0	1,681	0,05789	Tk = 15,00 °C
condenseur	11,782	0	0	11,782	0,4058	Tk = 15,00 °C
effet frigorifique	15,358	10,761	0,700701	4,597	0,1583	Tk = -3,00 °C
global	39,797	10,761	0,2704	29,036	1	

Figure 23 : Bilan exergetique du projet complet

Le bilan exergetique peut ici aussi être exporté sous forme d'un fichier texte structuré, qui peut être ouvert dans un tableur pour effectuer différents traitements.

Une fois le bilan exergetique du projet calculé, il est possible de faire afficher dans l'éditeur de structures productives les valeurs des exergies mises en jeu (figure 24).

Ces deux exemples sont relativement simples : leur principal intérêt est d'illustrer la procédure d'établissement des structures exergetiques et des bilans exergetiques associés.

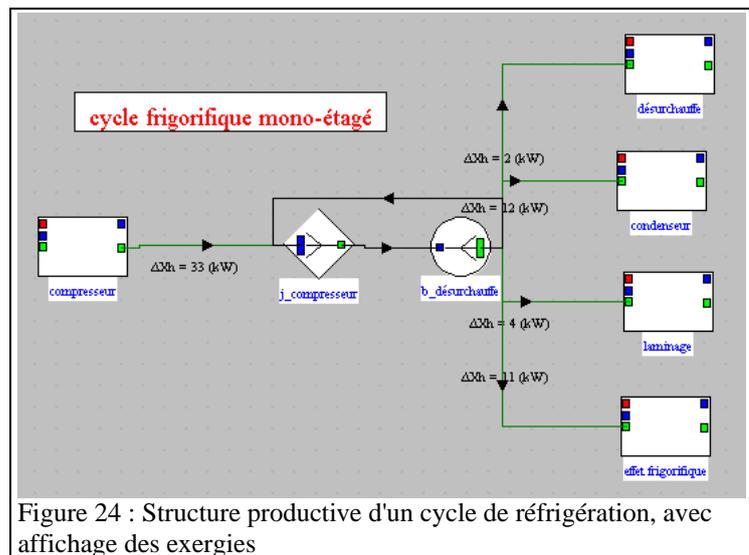


Figure 24 : Structure productive d'un cycle de réfrigération, avec affichage des exergies

4.3 Méthode d'établissement d'un bilan exergetique

Pour résumer les choses, la création d'un bilan exergetique se fait en trois étapes, dont les deux premières sont automatiques, et la troisième simple :

- dans une première étape, toutes les unités productives sont créées ;
- dans une deuxième étape, les pseudos-nœuds en série sont fusionnés. Notons que cette étape ne sert qu'à simplifier la structure productive et peut être sautée si le but est seulement de créer le bilan exergetique ;
- dans une troisième étape, on finit de renseigner la structure productive, en paramétrant les écrans des bilans exergetiques. Il s'agit essentiellement de définir les températures des sources externes avec lesquelles des exergies-chaleur sont échangées, et de connecter entre elles les liens d'exergie bleus (puissance mécanique).

Définir les températures des sources externes avec lesquelles des exergies-chaleur sont échangées ne pose généralement aucun problème particulier : il suffit d'ouvrir l'écran de bilan exergetique du composant (analogue à celui de la figure 8) et de saisir la température de la source, en °C.

Pour être bien lisible, la connexion des liens d'exergie bleus représentant la puissance mécanique demande de créer une jonction entre tous les composants produisant de la force motrice s'il y en a plusieurs, puis de la connecter (ou de connecter le composant unique s'il n'y en a qu'un) à une branche, elle-même reliée aux différents organes de compression, ainsi qu'à une transfo-point additionnelle représentant la puissance nette disponible.

Il s'agit d'un petit ajout à la structure productive, qui peut être fait en quelques minutes.

La partie droite de la figure 16 illustre le cas où il n'y a qu'une turbine et un organe de compression. Sa construction a été expliquée plus haut.

La figure 25 montre le cas où il y a plusieurs turbines et organes de compression (deux de chaque). Il a fallu pour cela :

- ajouter la jonction « puissance » et lui connecter les ports de sortie bleus des deux turbines HP et BP, ce qui permet de faire la somme de leurs puissances ;
- ajouter une branche « div puissance » et lui relier en entrée la sortie de la jonction « puissance » ;
- ajouter la transfo-point « puissance nette » ;
- connecter la sortie de la branche « div puissance » aux ports d'entrée bleus des deux pompes « pompe extraction » et « compression liquide » ainsi qu'à la transfo-point « puissance nette ».

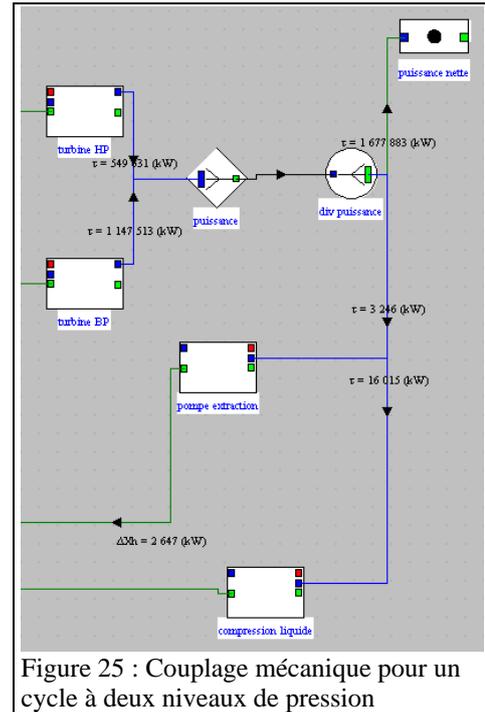


Figure 25 : Couplage mécanique pour un cycle à deux niveaux de pression

Cette manière de faire permet de s'assurer que le bilan exergétique est bien construit et de faire apparaître la valeur de la puissance nette sur la structure productive.

4.4 Exemple d'une turbine à gaz

Le schéma de l'installation et la valeur des principaux paramètres sont donnés figure 26, et la structure productive que vous obtenez automatiquement figure 27.

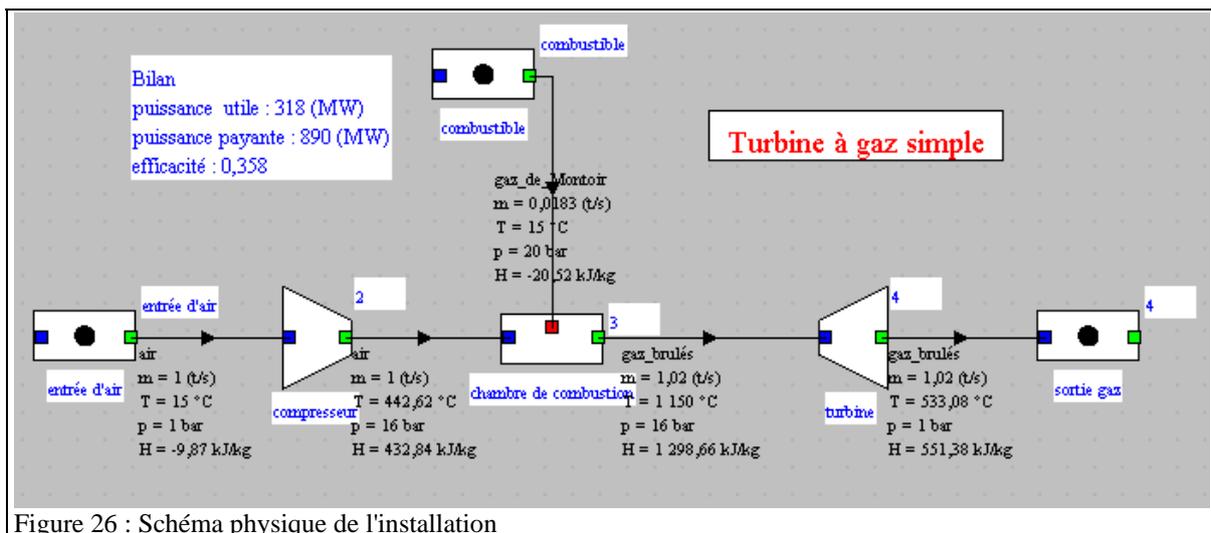


Figure 26 : Schéma physique de l'installation

Après avoir identifié les paramétrages manquants et ajouté les liens représentant les couplages mécaniques, on obtient la structure productive de la figure 28.

Cette structure productive s'interprète de la manière suivante : la turbine à gaz reçoit du combustible un apport d'exergie chimique, et, par recyclage interne, un apport d'exergie au niveau du compresseur. Cette exergie est

convertie sous forme mécanique dans la turbine, le reliquat étant dissipé par rejet dans l'atmosphère. Le travail net correspond à la fraction de puissance mécanique non recyclée.

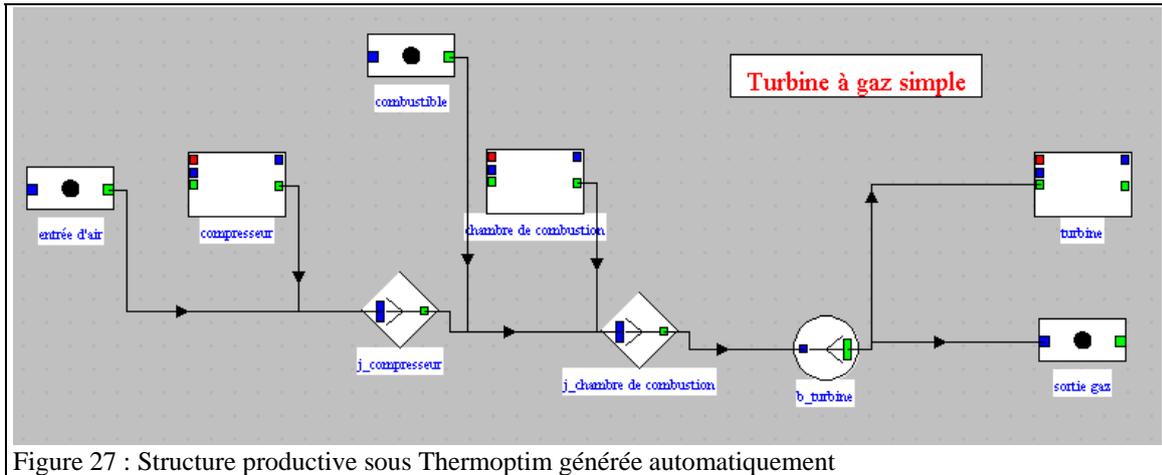


Figure 27 : Structure productive sous ThermoOptim générée automatiquement

Le bilan exergétique brut du projet complet est donné figure 29. On notera que l'exergie apportée par le combustible est automatiquement pris en compte sans qu'une déclaration particulière ait besoin d'être faite, dès lors que la chambre de combustion est correctement définie. La valeur de cet apport est égale au produit du débit-masse de combustible par son PCI.

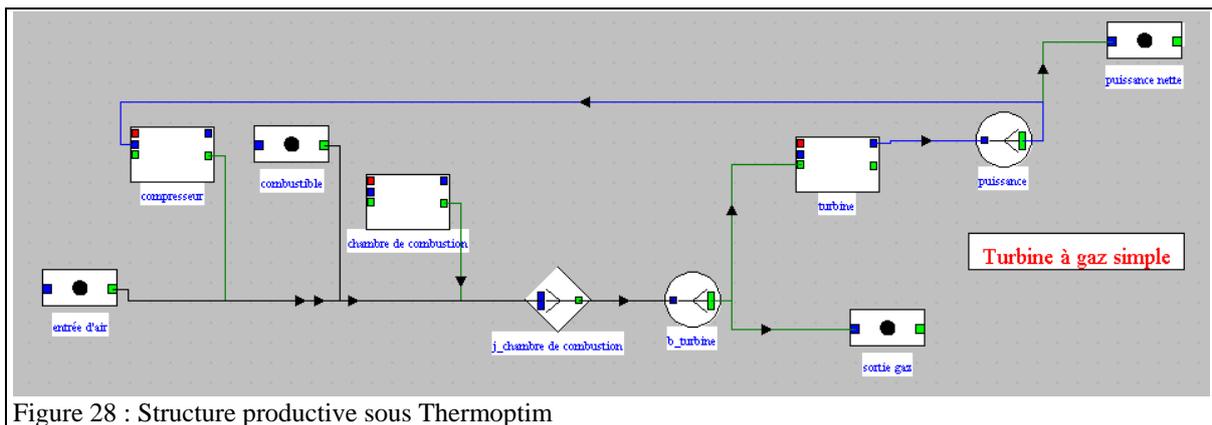


Figure 28 : Structure productive sous ThermoOptim

Ce bilan est toutefois faux car le compresseur est comptabilisé comme une ressource externe. Nous savons qu'il faut pour corriger cette erreur connecter les composants produisant de la puissance mécanique.

composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
combustible	897,044	0	0	0	0	
turbine	796,412	760,94	0,955461	35,472	0,05923	
chambre de com...	0	613,557	0,683977	275,983	0,4609	
compresseur	442,71	402,238	0,908581	40,472	0,06758	compr
sortie gaz	0	0	0	246,919	0,4123	loss
global	1 339,754	760,94	0,553	598,846	1	

Figure 29 : Bilan exergétique brut du projet complet

La figure 30 montre le nouveau bilan obtenu. Son rendement et le produit global sont beaucoup plus faibles que précédemment. Les gaz sortant de la turbine représentent plus de 40 % des irréversibilités. Elles pourraient être réduites en utilisant un cycle combiné du type de celui présenté ci-dessous.

Comme précédemment, une fois le bilan exergétique du projet calculé, il est possible de faire afficher dans l'éditeur de structures productives les valeurs des exergies mises en jeu (figure 31).

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
combustible	897,044	0	0	0	0	
compresseur	442,71	402,238	0,908581	40,472	0,06758	
turbine	796,412	760,94	0,955461	35,472	0,05923	
chambre de com...	0	613,557	0,683977	275,983	0,4609	
sortie gaz	0	0	0	246,919	0,4123	loss
global	897,044	318,23	0,3324	598,846	1	

Figure 30 : Bilan exergetique du projet complet, puissances mécaniques connectées

Considérons maintenant deux exemples un peu plus complexes : celui d'un cycle combiné à un niveau de pression, et celui d'un cycle frigorifique biétagé à injection totale.

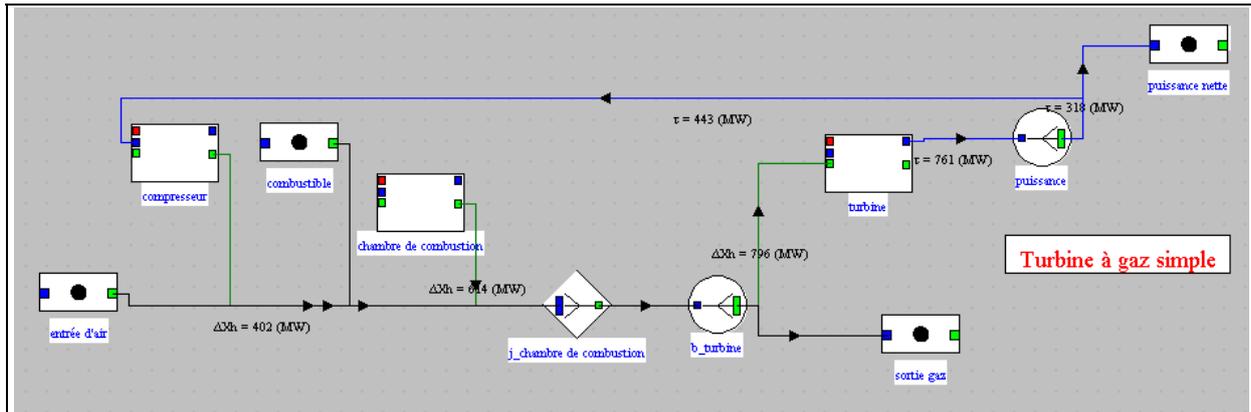


Figure 31 : Structure productive avec affichage des exergies

4.5 Exemple d'un cycle combiné à un niveau de pression

Le schéma de l'installation et la valeur des principaux paramètres sont donnés figure 32.

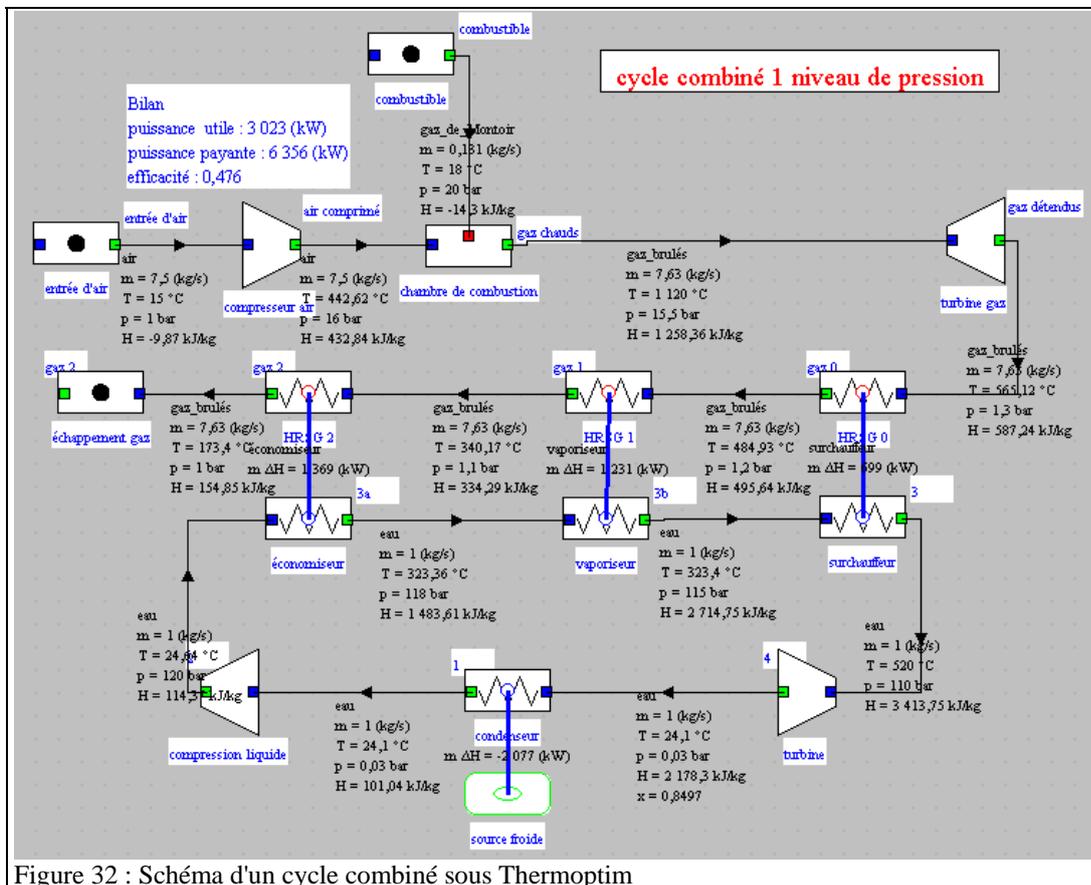
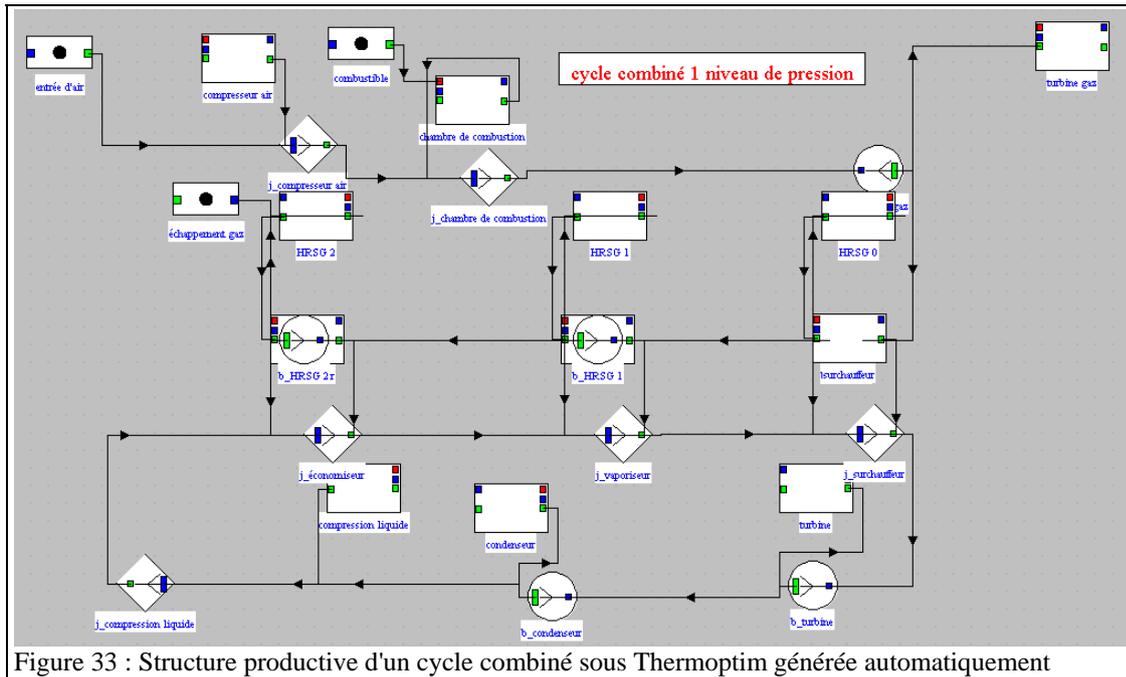
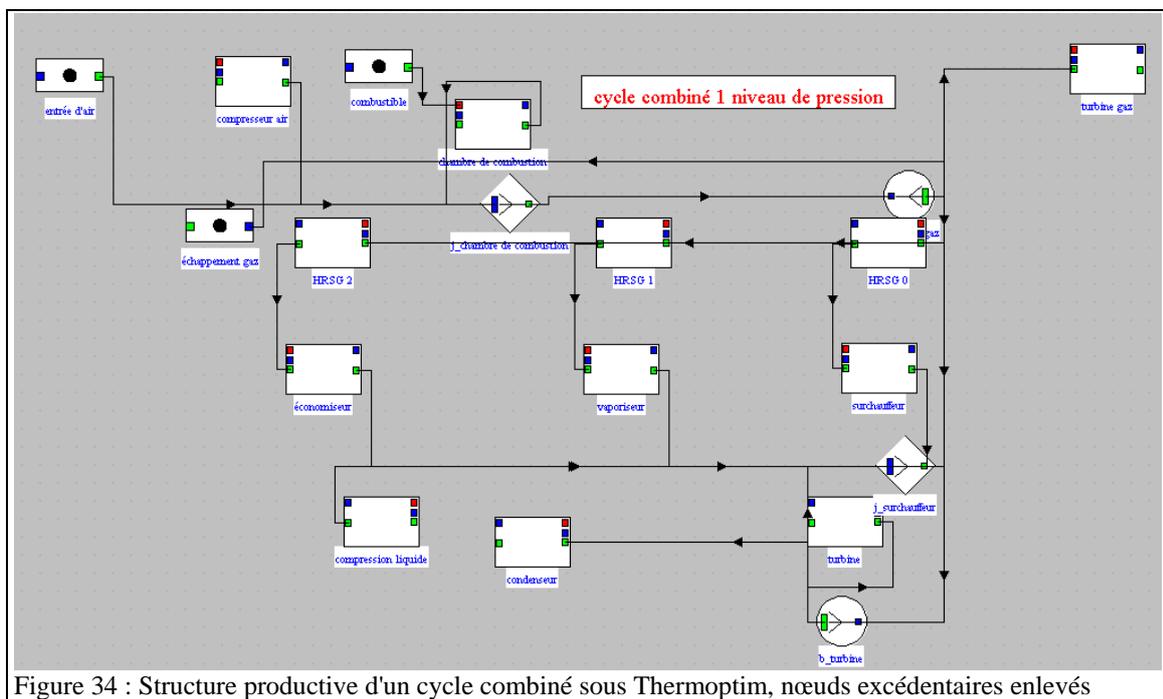


Figure 32 : Schéma d'un cycle combiné sous Thermoptim

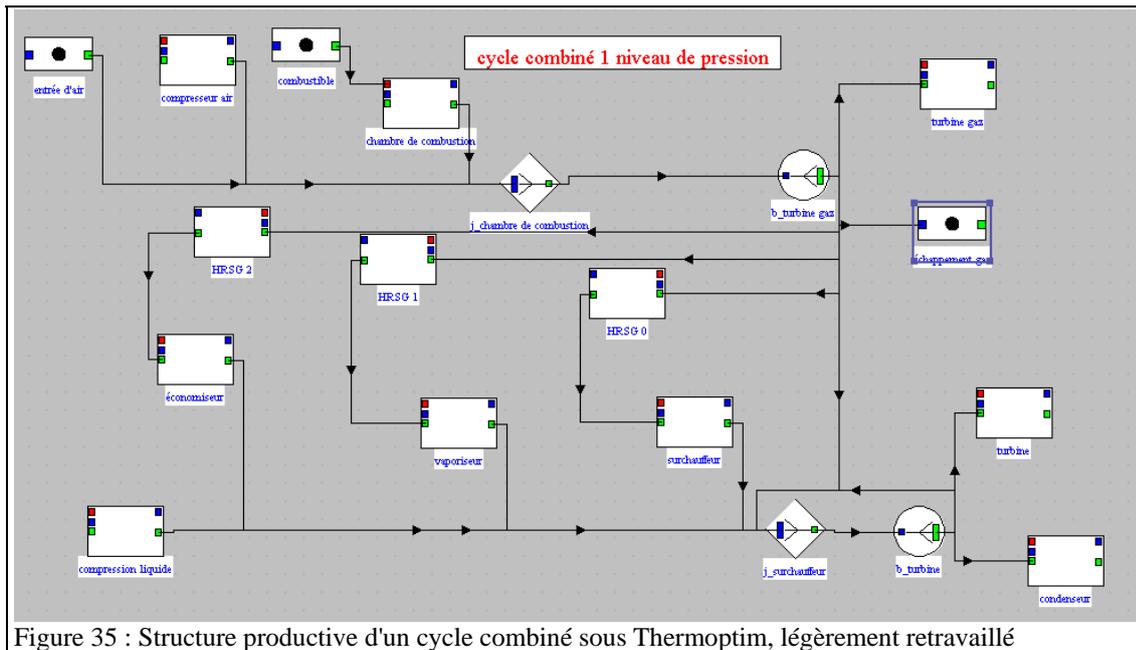
La structure productive que nous obtenons automatiquement est donnée figure 33.



Elle fait apparaître plusieurs diviseurs et mélangeurs en série qui peuvent être fusionnés. Vous obtenez la structure productive de la figure 34.



Retravaillez la structure pour obtenir une meilleure lisibilité, en réorientant de gauche à droite ou de droite à gauche certains composants. Vous obtenez un résultat voisin de celui de la figure 35.



Comme vous avez pu le constater, les unités productives représentant les transferts d'un échangeur de chaleur sont reliées entre elles par un lien destiné à montrer le transfert d'exergie qui prend place.

Ce schéma n'est pas encore paramétré complètement. Si l'on essaie d'établir le bilan exergétique complet du projet, on obtient le résultat de la figure 36.

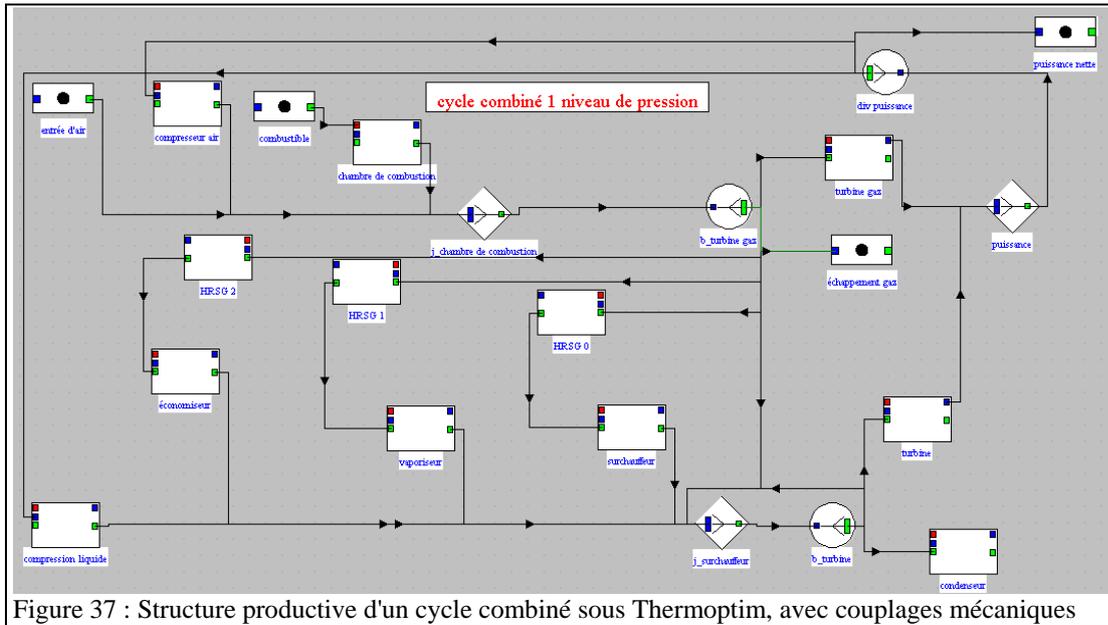
composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
combustible	6 408,392	0	0	0	0	
turbine gaz	5 358,475	5 121	0,955682	237,475	0,06506	
chambre de com...	0	4 339,201	0,677112	2 016,429	0,5525	
turbine	1 446,794	1 235,45	0,853923	211,344	0,0579	
compresseur air	3 320,35	3 016,784	0,908574	303,566	0,08317	compr
compression liq...	11,72	11,989	1,02291	-0,2686	-0,00007359	compr
économiseur	0	468,765	0	(-468,765)	(-0,1284)	économiseur
HRSG 2	680,685	0	0	(680,685)	(0,1865)	économiseur
échappement gaz	0	0	0	256,047	0,07015	loss
HRSG 0	497,607	0	0	(497,607)	(0,1363)	surchauffeur
surchauffeur	0	395,405	0	(-395,405)	(-0,1083)	surchauffeur
condenseur	63,615	-114,072	-1,79317	177,687	0,04868	Tk= 0 °C
vaporisateur	0	634,25	0	(-634,25)	(-0,1738)	vaporisateur
HRSG 1	767,736	0	0	(767,736)	(0,2103)	vaporisateur
global	9 740,462	6 242,378	0,6253	3 649,887	1	

Figure 36 : Bilan exergétique avant paramétrage

Dans ce bilan, comme nous l'avons indiqué précédemment, les variations d'exergie des fluides couplés par un échangeur sont représentées entre parenthèses dans la colonne des irréversibilités, le nom de l'échangeur étant affiché tout à fait à droite. Les irréversibilités de l'échangeur sont égales à la somme algébrique des valeurs entre parenthèses pour les deux fluides appariés.

La dernière colonne, intitulée "settings", donne quelques informations synthétiques sur les paramétrages pris en compte : le compresseur d'air et la compression liquide représentent des apports d'exergie externe, car ils ne sont pas reliés aux turbines, et le condenseur est considéré comme échangeant de l'exergie-chaleur avec une source à 0 °C, ce qui est bien évidemment absurde.

Dans la structure productive, il manque les couplages de travail, entre une des turbines, le compresseur d'air et la pompe (compression liquide), que nous représenterons par exemple par un diviseur en sortie de la turbine à vapeur, avec trois branches, deux représentant ces couplages, et l'autre aboutissant à un mélangeur auquel est connecté la puissance disponible en sortie de l'autre turbine, pour former la puissance nette disponible (figure 37).



Pour terminer l'établissement de la structure productive, il reste à paramétrer la température de la source externe avec laquelle une exergie-chaaleur est échangée, à savoir le condenseur. Nous prendrons 15 °C.

La structure productive du cycle combiné s'interprète de la manière suivante : la turbine à gaz reçoit de l'extérieur un apport d'exergie au niveau de la chambre de combustion, et, par recyclage interne, un apport d'exergie au niveau du compresseur. Cette exergie est pour partie convertie dans la turbine et rejetée à l'extérieur dans les gaz d'échappement, et pour partie transmise au cycle à vapeur par les échangeurs du générateur de vapeur récupérateur. Ce cycle reçoit aussi, par recyclage interne, un apport d'exergie au niveau de la compression liquide. L'exergie disponible est partiellement convertie dans la turbine à vapeur, le reste étant dissipé dans le condenseur.

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
combustible	6 408,375	0	0	0	0	
compresseur air	3 320,351	3 016,784	0,908574	303,567	0,08582	
turbine gaz	5 358,474	5 120,998	0,955682	237,476	0,06713	
chambre de com...	0	4 339,2	0,677114	2 016,43	0,57	
compression liq...	13,33	12,04	0,903177	1,291	0,000365	
turbine	1 446,794	1 235,45	0,853923	211,344	0,05975	
économiseur	0	468,714	0	(-468,714)	(-0,1325)	économiseur
HRSG 2	680,114	0	0	(680,114)	(0,1923)	économiseur
échappement gaz	0	0	0	256,619	0,07254	loss
HRSG 0	497,607	0	0	(497,607)	(0,1407)	surchauffeur
surchauffeur	0	395,405	0	(-395,405)	(-0,1118)	surchauffeur
condenseur	63,615	0	0	63,615	0,01798	Tk = 15,00 °C
vaporisateur	0	634,25	0	(-634,25)	(-0,1793)	vaporisateur
HRSG 1	767,736	0	0	(767,736)	(0,217)	vaporisateur
global	6 408,375	3 022,767	0,448	3 537,43	1	

Figure 38 : Bilan exergetique du projet complet

Le bilan exergetique du projet complet est donné figure 38. Les gaz d'échappement étant rejetés à l'atmosphère, ils sont considérés comme une perte exergetique (loss).

Comme précédemment, une fois le bilan exergetique du projet calculé, il est possible de faire afficher dans l'éditeur de structures productives les valeurs des exergies mises en jeu (figure 39).

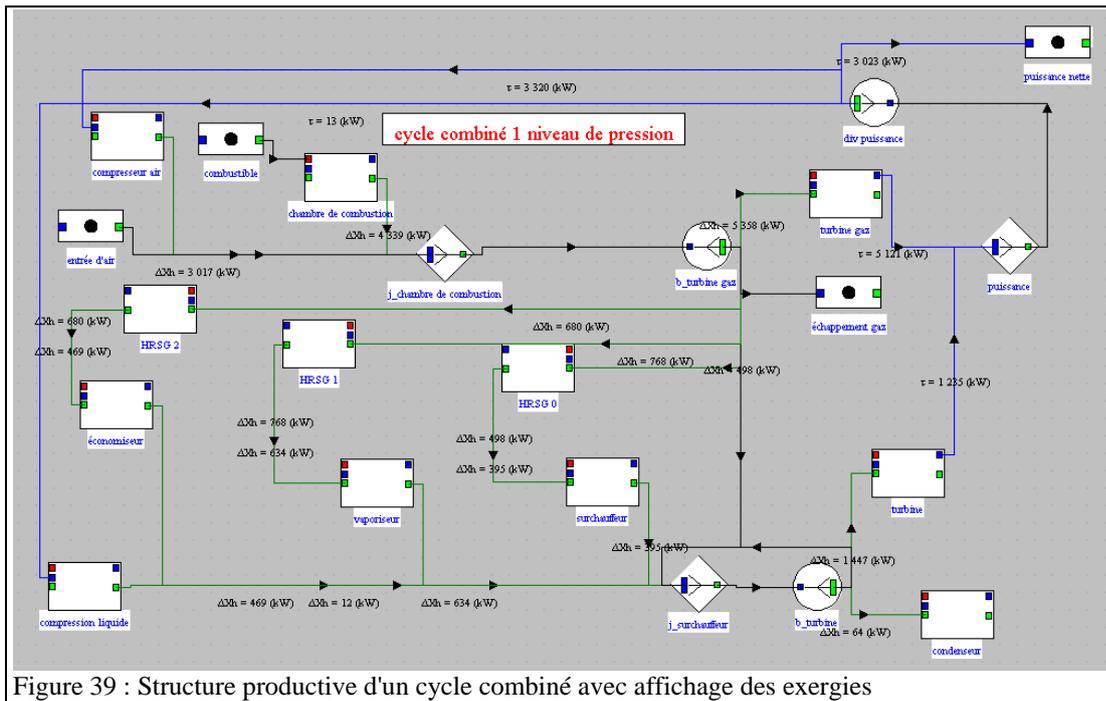


Figure 39 : Structure productive d'un cycle combiné avec affichage des exergies

Nous avons mentionné plus haut qu'il est possible d'exporter le bilan exergétique pour effectuer des post-traitements dans un tableau (figure 40). Discutons de l'intérêt de l'opération.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Exergy balance								
2									
3	composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total			
4	combustible	6408,375	0	0	0	0			
5	compresseur air	3320,351	3016,784	90,9%	303,567	8,6%			
6	turbine gaz	5358,474	5120,998	95,6%	237,476	6,7%			
7	chambre de combustion	0	4339,2	67,7%	2016,43	57,0%			
8	compression liquide	13,33	12,04	90,3%	1,291	0,0%			
9	turbine	1446,794	1235,45	85,4%	211,344	6,0%		échangeur complet	
10	économiseur	0	468,714		-468,714	-13,3%	économiseur	211,4	6,0%
11	HRSG 2	680,114	0		680,114	19,2%	économiseur		
12	échappement gaz	0	0		256,619	7,3%	loss	échangeur complet	
13	HRSG 0	497,607	0		497,607	14,1%	surchauffeur	102,202	2,9%
14	surchauffeur	0	395,405		-395,405	-11,2%	surchauffeur		
15	condenseur	63,615	0		63,615	1,8%	Tk = 15,00 °C	échangeur complet	
16	vaporiseur	0	634,25		-634,25	-17,9%	vaporiseur	133,486	3,8%
17	HRSG 1	767,736	0		767,736	21,7%	vaporiseur		
18	global	6408,375	3022,767	0,448	3537,43	1			
19	T0 = 288,15 K								

Figure 40 : Bilan exergétique du projet complet dans un tableau

Une particularité du bilan exergétique généré automatiquement est que les échangeurs internes sont représentés par deux lignes (ici par exemple « économiseur » et « HRSG2 ») et que les contributions aux irréversibilités des deux fluides sont affichées de manière algébrique, positivement pour le fluide chaud et négativement pour le fluide froid, l'irréversibilité de l'ensemble de l'échangeur étant obtenue en faisant la somme de ces deux valeurs. Pour interpréter le bilan de la figure 38, il faut effectuer mentalement cette sommation, alors que si l'on récupère les valeurs dans un tableau, on peut la faire en ajoutant deux cellules, comme H10 et I10 figure 40, ce qui est plus facile à visualiser. Par ailleurs, on peut travailler la mise en forme du bilan, ce qui en augmente la lisibilité.

Il est intéressant d'étudier l'impact de la prise en compte de la dissociation du CO₂ dans la chambre de combustion. En supposant un taux de dissociation de 5 % et une température de figeage de 1000 °C, le bilan apparaît (figure 41).

Du fait de la dissociation, la consommation de combustible a augmenté, et le rendement de la chambre de combustion a diminué. La perte par les gaz d'échappement a doublé, non pas à cause de la température des gaz, restée sensiblement constante, mais du fait que les gaz contiennent des imbrûlés. Le reste du cycle gaz varie très peu, et le cycle à vapeur reste inchangé.

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
combustible	6 673,73	0	0	0	0	
compresseur air	3 320,35	3 016,784	0,908574	303,566	0,07981	
turbine gaz	5 373,585	5 135,41	0,955677	238,175	0,06262	
chambre de com...	0	4 342,144	0,650632	2 038,606	0,536	
compression liq...	13,33	12,04	0,903177	1,291	0,0003394	
turbine	1 446,794	1 235,45	0,853923	211,344	0,05557	
économiseur	0	468,714	0	(-468,714)	(-0,1232)	économiseur
HRSG 2	681,3	0	0	(681,3)	(0,1791)	économiseur
échappement gaz	0	0	0	498,019	0,1309	loss
HRSG 0	497,742	0	0	(497,742)	(0,1309)	surchauffeur
surchauffeur	0	395,405	0	(-395,405)	(-0,104)	surchauffeur
condenseur	63,615	0	0	63,615	0,01673	Tk = 15,00 °C
vaporiseur	0	634,25	0	(-634,25)	(-0,1668)	vaporiseur
HRSG 1	768,097	0	0	(768,097)	(0,202)	vaporiseur
global	6 673,73	3 037,18	0,4301	3 803,386	1	

Figure 41 : Bilan exergetique du projet complet, avec dissociation du CO2

4.6 Exemple d'un cycle de réfrigération bi-étagé à injection totale

Le schéma de l'installation et la valeur des principaux paramètres sont donnés figure 42.

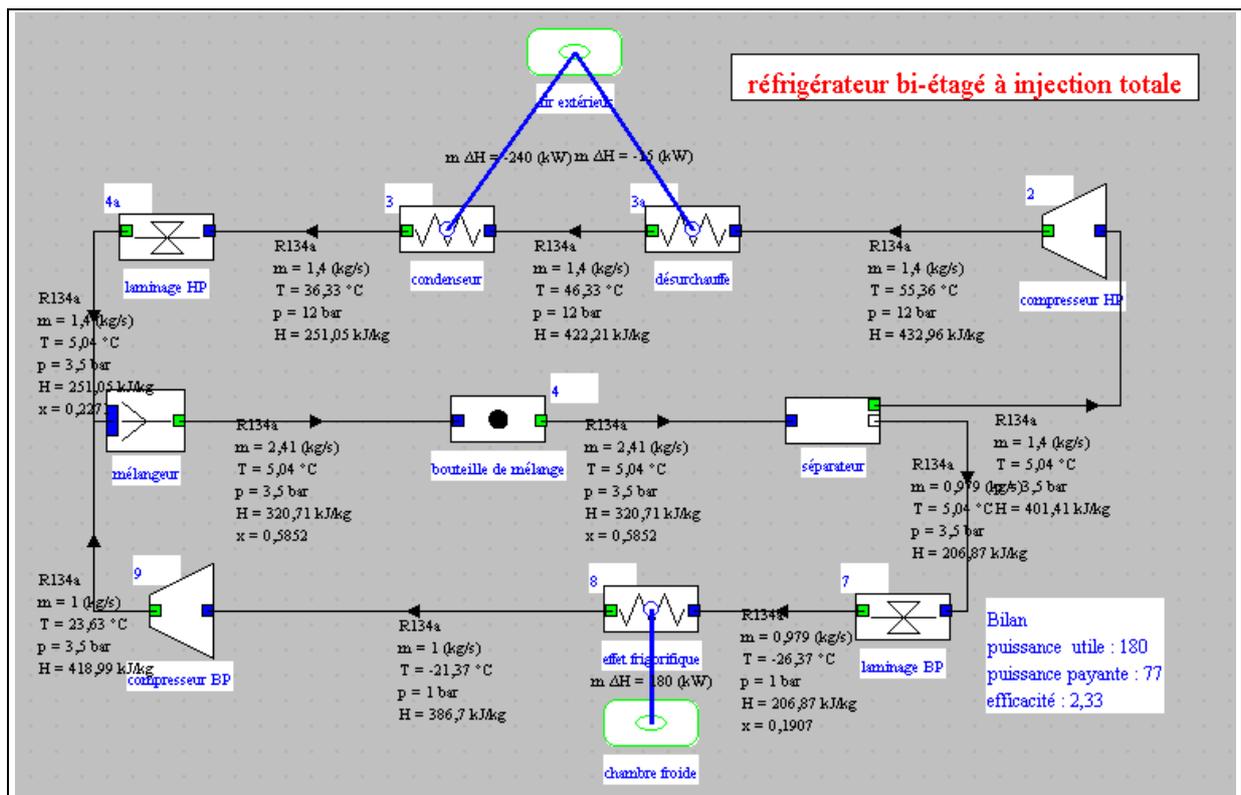


Figure 42 : Schéma d'un cycle de réfrigération biétagé à injection totale sous ThermoOptim

La structure productive que nous obtenons automatiquement est donnée figure 43.

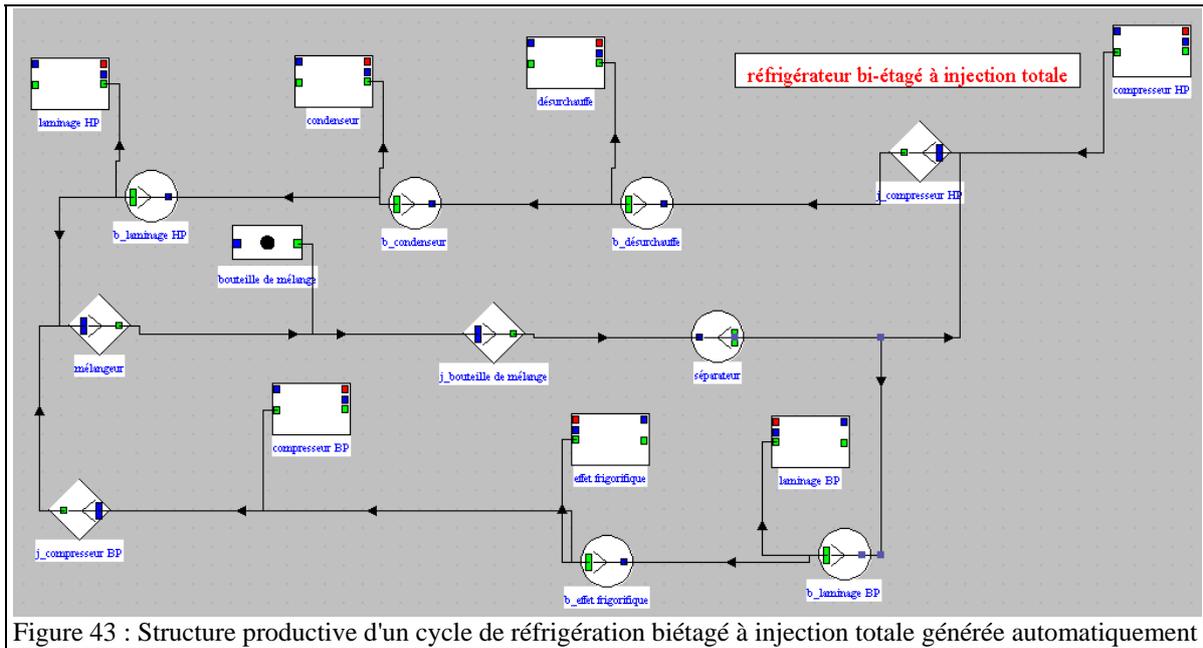


Figure 43 : Structure productive d'un cycle de réfrigération bi-étagé à injection totale générée automatiquement

Elle fait apparaître plusieurs diviseurs et mélangeurs en série qui peuvent être fusionnés. Vous obtenez la structure productive que vous pouvez retravailler pour obtenir une meilleure lisibilité, en réorientant de gauche à droite ou de droite à gauche certains composants. Vous obtenez un résultat voisin de celui de la figure 44.

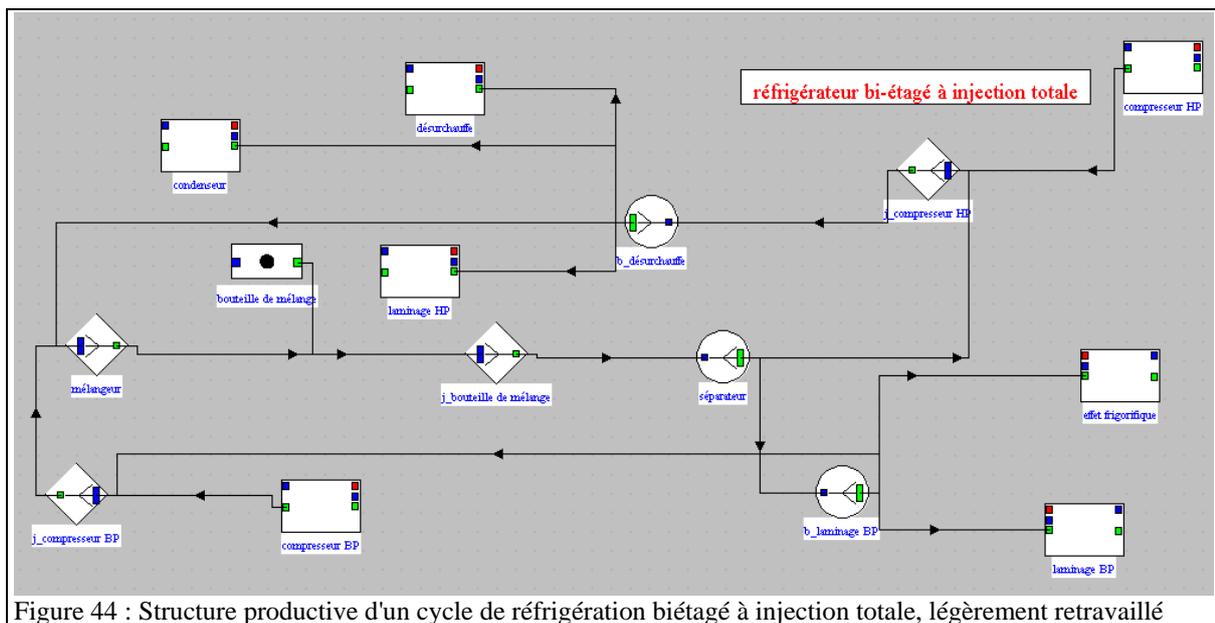
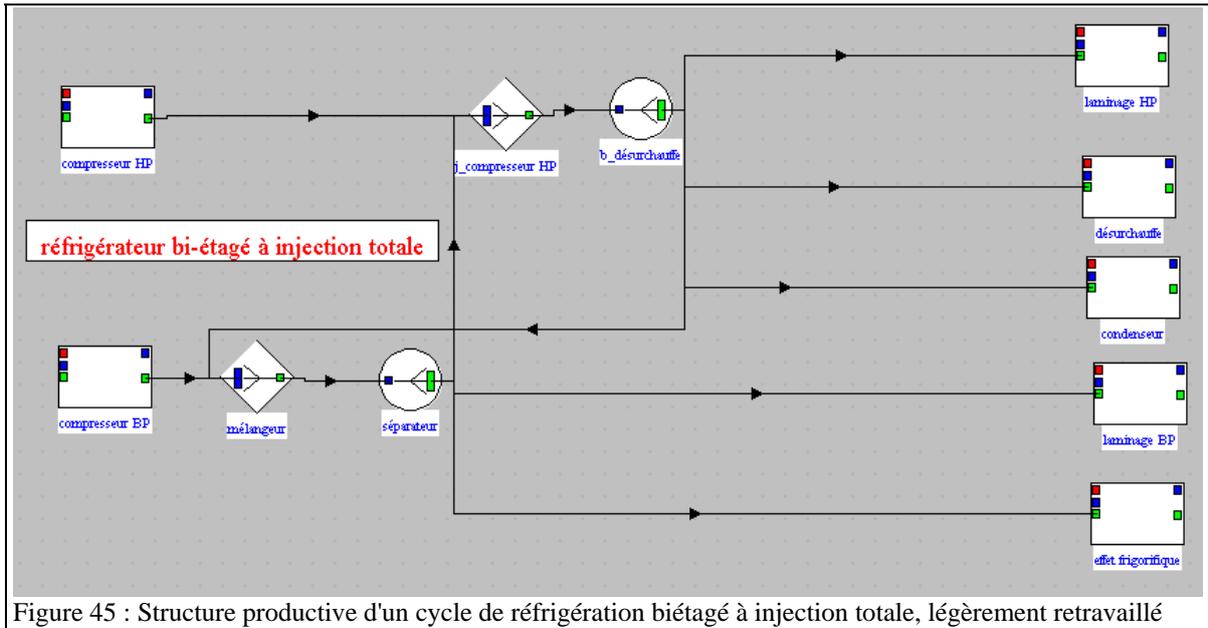


Figure 44 : Structure productive d'un cycle de réfrigération bi-étagé à injection totale, légèrement retravaillé

Ce schéma comporte des éléments qui peuvent être supprimés, comme la bouteille de mélange, issue d'un transfo-point nécessaire dans ThermoOptim pour relier le mélangeur et le séparateur. De la même manière, le pseudo-nœud j_compresseur BP peut être supprimé, ses liens amont étant redirigés vers le mélangeur, ainsi que le pseudo-diviseur b_laminage BP, à condition que les liens qui en partent soient issus du séparateur. On obtient ainsi le schéma de la figure 45.

Notons qu'une fois la bouteille de mélange enlevée à la main, un schéma analogue est obtenu automatiquement en enlevant les nœuds en excès (y compris ceux du modèle physique).



Cette structure productive s'interprète comme ceci : la machine frigorifique reçoit de l'extérieur un apport d'exergie au niveau des deux compresseurs. Cette exergie est pour partie convertie dans l'évaporateur (effet frigorifique), le reste étant dissipé dans le désurchauffeur et le condenseur et les détendeurs (laminages).

Ce schéma n'est pas encore paramétré complètement. Si l'on essaie d'établir le bilan exergétique complet du projet, on obtient le résultat suivant, en considérant (paramètres globaux du simulateur) une température de l'environnement égale à 25 °C pour le calcul des exergies (figure 46).

composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
laminage HP	4,665	0	0	4,665	0,05543	
laminage BP	3,06	0	0	3,06	0,03636	
mélangeur	0	0	0	1,208	0,01435	
compresseur HP	44,32	36,525	0,82412	7,795	0,09263	compr
compresseur BP	32,29	25,894	0,80192	6,396	0,076	compr
désurchauffe	1,083	-1,382	-1,27634	2,465	0,02929	Tk = 0 °C
condenseur	15,619	-22,005	-1,40892	37,624	0,4471	Tk = 0 °C
effet frigorifique	37,399	16,459	0,440089	20,94	0,2488	Tk = 0 °C
global	76,61	-6,928	-0,09846	84,153	1	

Figure 46 : Bilan exergétique avant paramétrage

La dernière colonne, intitulée "settings", donne quelques informations synthétiques sur les paramétrages pris en compte : les deux compresseur représentent des apports d'exergie externe, et la désurchauffe, le condenseur et l'évaporateur sont considérés comme échangeant de l'exergie-chaleur avec une source à 0 °C, ce qui est bien évidemment absurde.

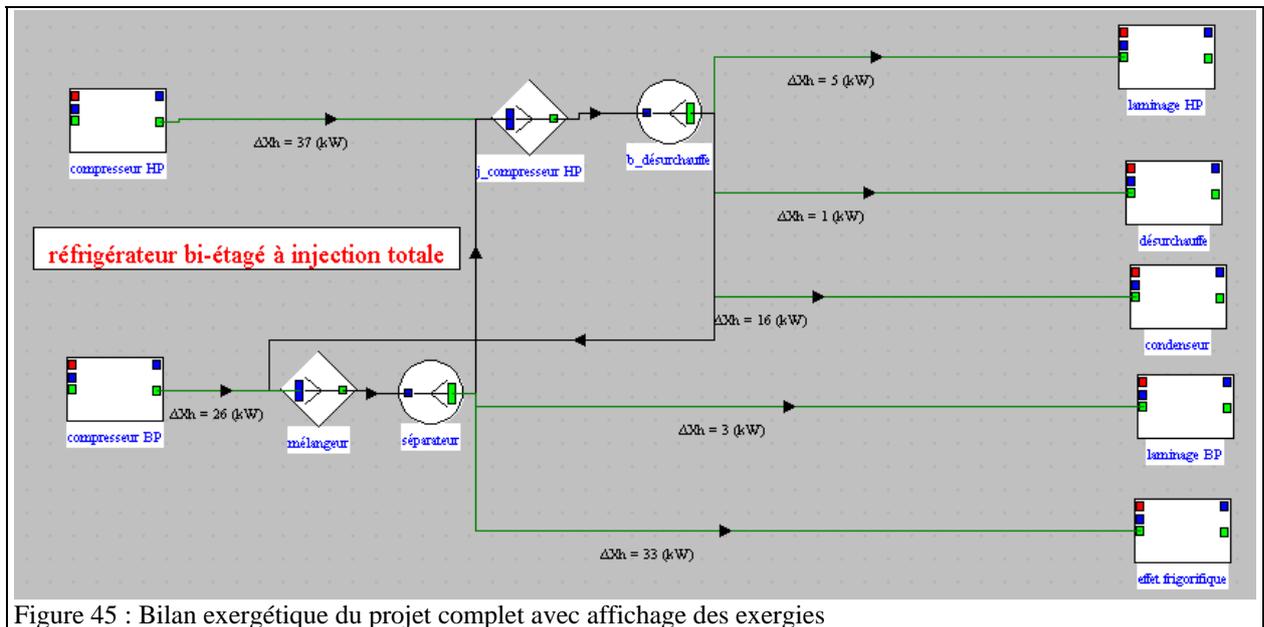
Pour terminer l'établissement de la structure productive, il reste à paramétrer les températures des sources externes avec lesquelles des exergies-chaleur sont échangées. Nous prendrons -21,15 °C pour l'évaporateur et 25 °C pour la désurchauffe et le condenseur.

composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
laminage HP	4,665	0	0	4,665	0,106	
laminage BP	3,06	0	0	3,06	0,06955	
mélangeur	0	0	0	1,208	0,02746	
compresseur HP	44,32	36,525	0,82412	7,795	0,1772	compr
compresseur BP	32,29	25,894	0,80192	6,396	0,1454	compr
effet frigorifique	37,399	33,229	0,8885	4,17	0,09478	Tk = -21,50 °C
désurchauffe	1,083	0	0	1,083	0,02462	Tk = 25,00 °C
condenseur	15,619	0	0	15,619	0,355	Tk = 25,00 °C
global	76,61	33,229	0,4257	43,996	1	

Figure 47 : Bilan exergétique du projet complet

Le bilan exergetique du projet complet est donné figure 47.

Comme précédemment, une fois le bilan exergetique du projet calculé, il est possible de faire afficher dans l'éditeur de structures productives les valeurs des exergeries mises en jeu (figure 45).



5 Conclusion

Le très grand intérêt de cette manière de procéder est que les bilans exergetiques sont automatiquement établis, alors que les calculs sur tableur demandent à chaque fois de prendre beaucoup de précautions si l'on veut éviter des erreurs.

Les indications portées dans la dernière colonne du bilan exergetique complet permettent de vérifier assez facilement le paramétrage de la structure productive, et donc de limiter les risques d'erreur.

6 Références

- [1] VALERO, A., SERRA, L., UCHE, J., Fundamentals of thermoeconomics, lectures 1-3, Euro summer course on sustainable assesment of clean air technologies, téléchargeable sur le site du CIRCE
- [2] KOTAS, T.J., The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, 2-nd edition, Krieger Publishing Company, USA, 1995.
- [3] GICQUEL, R. Systèmes Energétiques, tome 1 : méthodologie d'analyse, bases de thermodynamique, Thermoptim, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, février 2001.

Annexe 1 : Etablissement d'une structure productive

Selon Valero, une structure productive est composée d'unités productives et dissipatives (UPD), de jonctions et d'embranchements. Chaque flux de nature ou coût différent se voit assigner un lien à l'endroit où il est distribué.

Chaque UPD est caractérisée par son propre flux de produit, mais peut aussi avoir d'autres flux sortants ou sous-produits. Pour les produire, il consomme des ressources externes ou produits provenant d'autres unités. A chaque jonction, un flux de produit est obtenu en sommant les intrants de même nature mais d'origine différente.

A1.1 Relation entre schéma physique et structure productive

L'exemple ci-dessous, extrait de [1], montre comment on passe d'un schéma physique à une structure productive. Il s'agit d'une turbine à gaz utilisée en cogénération (production de vapeur surchauffée à 20 bars), l'échangeur de cogénération (HRSG) étant modélisé de manière sommaire par un seul échangeur (figure A1.1). Les B_i sont les flux d'exergie associés à un fluide (sauf B_5 , qui représente la puissance mécanique consommée par le compresseur), les F_i des ressources exergetiques (fuels ou combustibles), et les P_i des produits exergetiques.

Dans cet exemple, l'échangeur n'est modélisé que de manière globale. Si on le représente comme couplage entre deux transfos "échange", on peut considérer que F correspond à la variation d'exergie du fluide chaud, et P à la variation d'exergie du fluide froid. Le bilan de l'échangeur s'en déduit.

Le passage du schéma physique à la structure productive s'explique de la manière suivante : chaque UPD permet de dresser le bilan exergetique d'un composant, selon les règles en matière de calculs exergetiques qui sont précisées plus loin : chaque unité reçoit des "combustibles" F_i qui peuvent être de trois types (exergie-chaleur ou exergie chimique, travail, ou encore transfert d'exergie des fluides la traversant). Il en sort un ou plusieurs "produits" P_i , qui sont de deux types (variation d'exergie des fluides la traversant ou travail).

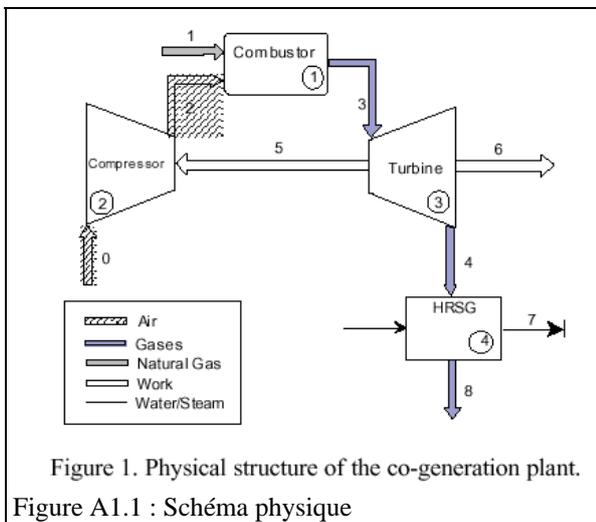


Figure A1.1 : Schéma physique

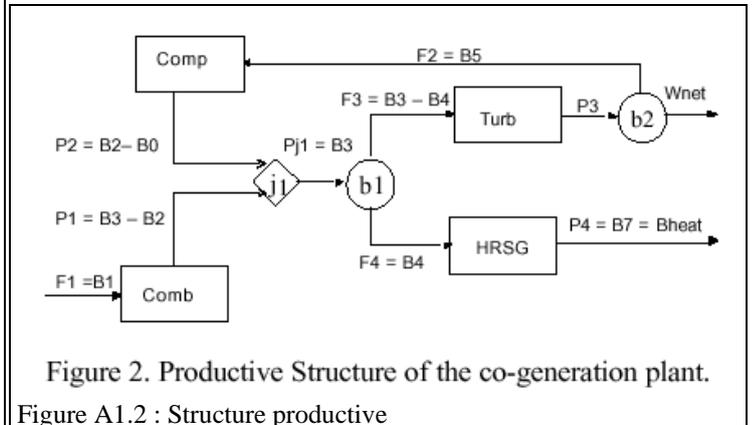


Figure A1.2 : Structure productive

Dans une structure productive (figure A1.2), les UPD sont représentées par les rectangles, tandis que les lignes qui les relient correspondent aux flux d'exergie qui sont échangés : "combustibles" en entrée et "produits" en sortie. Etant donné qu'un flux d'exergie peut être partagé entre plusieurs UPD, il est nécessaire d'introduire des pseudo-nœuds pour représenter les mélanges et les répartitions d'exergie. Dans la structure productive, les mélangeurs (ou jonctions) ont la forme de losanges, et les diviseurs (embranchements) celle de cercles.

A ce stade, il faut souligner qu'il existe un certain degré de subjectivité dans la définition des ressources et des produits. C'est un point qui est débattu dans la communauté des exergeticiens, et nous nous rallions à Valero [1] et Kotas [2], qui font l'hypothèse explicite que tout composant est conçu en fonction d'un objectif précis, ce qui permet de lever les ambiguïtés (Valero parle de "productive purpose" et Kotas de "desired output"). Une fois cet objectif explicite, nous considérerons avec Kotas que les ressources exergetiques sont les intrants nécessaires ("necessary inputs") pour pouvoir fournir le produit désiré. Le rendement exergetique des composants est dans ces conditions ce qu'il appelle le rendement rationnel ψ , défini comme le rapport des exergies sortant du système aux exergies entrantes F_i , ou encore à 1 moins le rapport entre les irréversibilités et les F_i .

No.	Subsystem	Fuel	Product	Technical production coefficients
1	Combustor	$F_1 = B_1$	$P_1 = B_3 - B_2$	$k_{cb} = F_1/P_1$
2	Compressor	$F_2 = B_5 = W_{cp}$	$P_2 = B_2 - B_0$	$k_{cp} = F_2/P_2$
3	Turbine	$F_3 = B_3 - B_4$	$P_3 = B_5 + B_6 = W_{cp} + W_{net}$	$k_{gt} = F_3/P_3$
4	HRSRG	$F_4 = B_4$	$P_4 = B_7 = B_{HEAT}$	$k_{HRSRG} = F_5/P_5$
5	Junction	$P_1 = B_3 - B_2$ $P_2 = B_2 - B_0$	$P_{j1} = B_3$	$r_1 = P_1/P_{j1}$ $r_2 = P_2/P_{j1}$
6	Branching 1	$P_{j1} = B_3$	$F_3 = B_3 - B_4$ $F_4 = B_4$	
7	Branching 2	$P_3 = B_5 + B_6 = W_{cp} + W_{net}$	$F_2 = B_5 = W_{cp}$ $B_6 = W_{net}$	

Tableau 1 : Combustibles et produits

Avec ces conventions, les expressions des F_i et des P_i sont données dans le tableau 1, et les bilans exergetiques des différentes UPD dans le tableau 2.

Tableau 2	F	τ^+	Δxh^+	P	Δxh	τ	η_{exer}	Δxhi
Compresseur	xq^+	$B5$		$B2 - B0$			$(B2 - B0)/B5$	$B5 - (B2 - B0)$
Combustion	$B1$			$B3 - B2$			$(B3 - B2)/B1$	$B1 - (B3 - B2)$
Turbine			$B3 - B4$			$B5 + \tau_{net}$	$(B5 + \tau_{net})/(B3 - B4)$	$B3 - B4 - (B5 + \tau_{net})$
HRSRG			$B4$	$B7$			$B7/B4$	$B4 - B7$

On notera par ailleurs que les unités purement dissipatives ne fournissent aucun produit, de telle sorte que leur bilan exergetique conduit à un rendement nul.

Selon Valero, la principale limitation de la théorie des coûts exergetiques initiale consistait à définir la structure productive à partir des mêmes flux et composants que ceux de la structure physique. Cela génère des difficultés au niveau du traitement des unités dissipatives et des résidus de l'installation. Une autre difficulté est d'identifier les produits utiles comme coproduits ou produits-sous-produits

Une fois la structure productive connue, on exprime les F_i comme fonction des P_i , comme indiqué ci-dessus : $F_i = k_i P_i$, k_i étant l'inverse du rendement exergetique du composant. Le modèle thermoéconomique est construit à partir de là.

A1.2 Structure productive sous Thermoptim de la turbine à gaz utilisée en cogénération

Nous avons modélisé dans Thermoptim l'exemple proposé par Valero, et nous l'avons paramétré du mieux possible compte tenu des valeurs que nous avons pu estimer. Le schéma de l'installation et les valeurs des paramètres sont donnés figure A1.3.

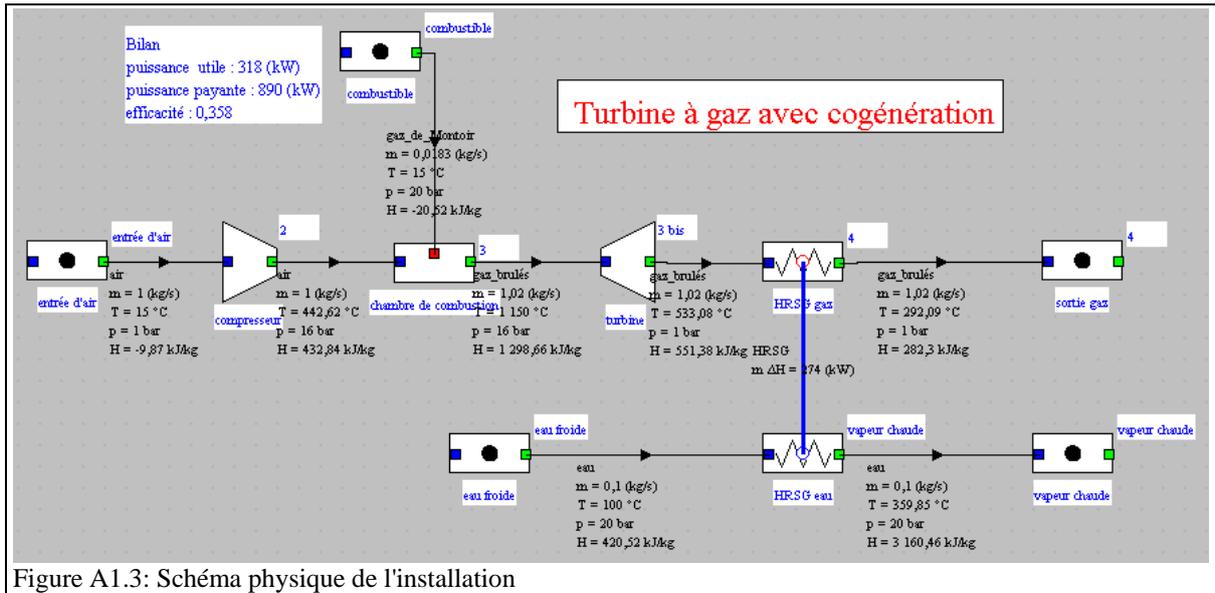


Figure A1.3: Schéma physique de l'installation

La structure productive que nous avons construite est donnée figure A1.4. Elle correspond au schéma fourni par Valero, à la réserve près que nous avons représenté l'entrée d'air et le détail de l'échangeur de cogénération.

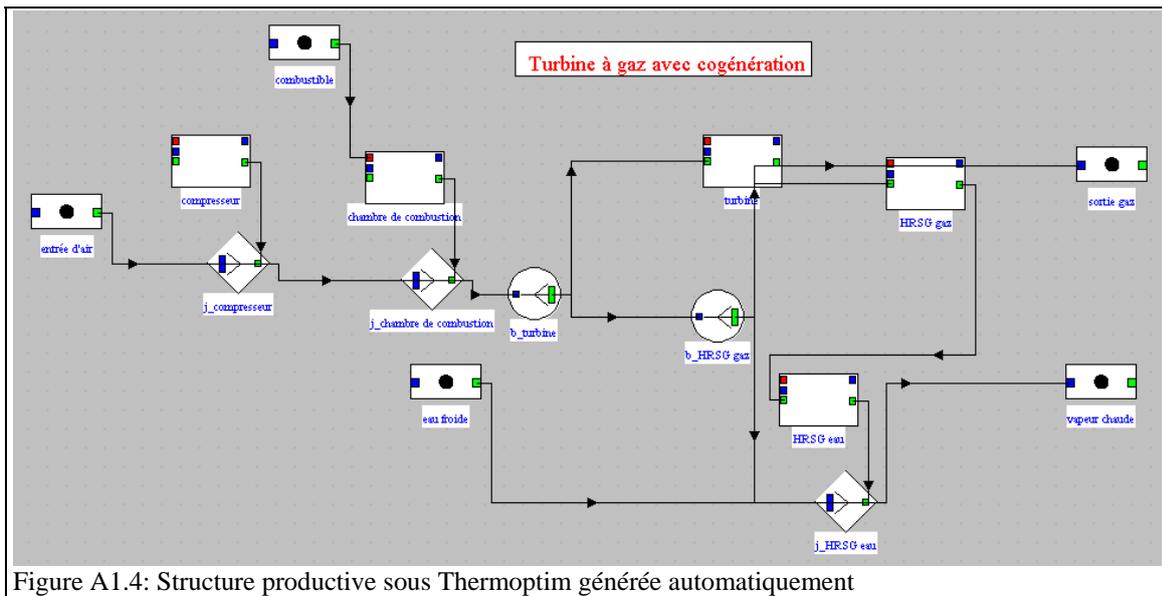


Figure A1.4: Structure productive sous Thermoptim générée automatiquement

Après avoir identifié les paramètres manquants et ajouté les liens représentant les couplages mécaniques, on obtient la structure productive de la figure A1.5.

Cette structure productive s'interprète de la manière suivante : la turbine à gaz reçoit du combustible un apport d'exergie chimique, et, par recyclage interne, un apport d'exergie au niveau du compresseur. Cette exergie est convertie pour partie sous forme mécanique dans la turbine et pour partie sous forme thermique dans le générateur de vapeur récupérateur HRSG, le reliquat étant dissipé par rejet dans l'atmosphère. Le travail net correspond à la fraction de puissance mécanique non recyclée.

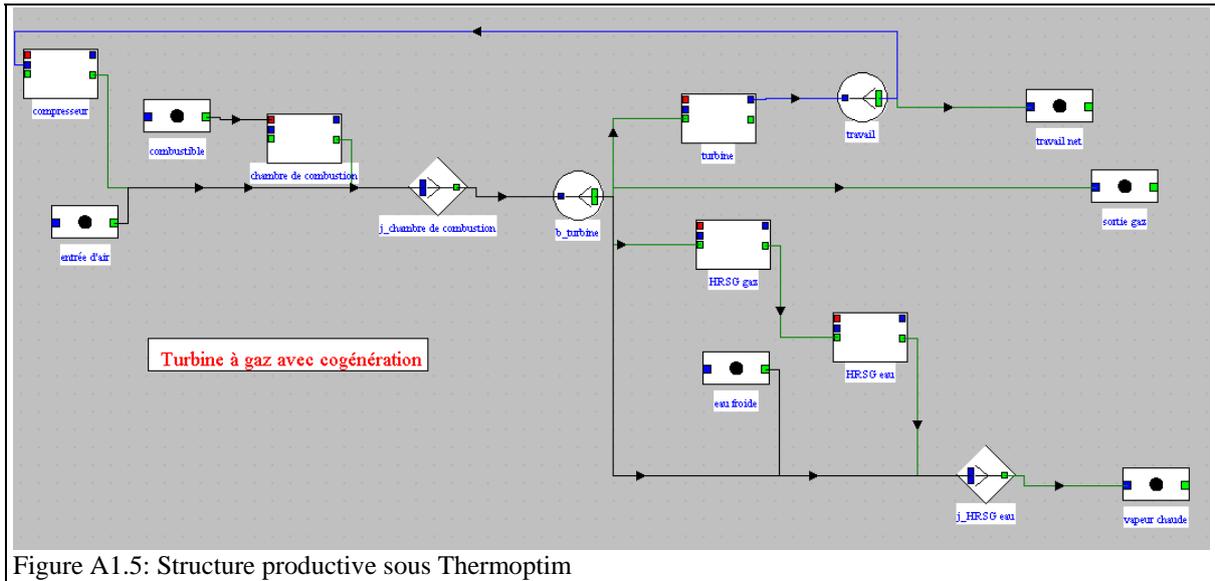


Figure A1.5: Structure productive sous Thermoptim

Le bilan exergétique brut du projet complet est donné figure A1.6.

composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
combustible	897,041	0	0	0	0	
turbine	796,411	760,94	0,955462	35,471	0,05872	
chambre de com...	0	613,557	0,683978	275,983	0,4568	
eau froide	4,593	0	0	0	0	
compresseur	442,71	402,238	0,908581	40,472	0,06699	compr
HRSG gaz	157,839	0	0	(157,839)	(0,2613)	HRSG
HRSG eau	0	110,065	0	(-110,065)	(-0,1822)	HRSG
sortie gaz	0	0	0	89,751	0,1486	loss
vapeur chaude	0	0	0	114,658	0,1898	loss
global	1 344,344	760,94	0,5506	604,109	1	

Figure A1.6: Bilan exergétique brut du projet complet

Une première cause d'erreur est que le compresseur est comptabilisé comme une ressource externe. Nous savons qu'il faut pour corriger cette erreur connecter les composants produisant de la puissance mécanique.

composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
combustible	897,041	0	0	0	0	
compresseur	442,71	402,238	0,908581	40,472	0,06699	
turbine	796,411	760,94	0,955462	35,471	0,05872	
chambre de com...	0	613,557	0,683978	275,983	0,4568	
eau froide	4,593	0	0	0	0	
HRSG gaz	157,839	0	0	(157,839)	(0,2613)	HRSG
HRSG eau	0	110,065	0	(-110,065)	(-0,1822)	HRSG
sortie gaz	0	0	0	89,751	0,1486	loss
vapeur chaude	0	0	0	114,658	0,1898	loss
global	901,634	318,23	0,33	604,109	1	

Figure A1.7: Bilan exergétique du projet complet, puissances mécaniques connectées

La figure A1.7 montre le nouveau bilan obtenu. Son rendement et le produit global sont beaucoup plus faibles que précédemment. Il est cependant encore faux parce que la vapeur cogénérée est comptabilisée comme une perte et non comme un produit. Il faut pour cela cocher l'option « Valuable exergy » dans l'écran de bilan exergétique de la transfo-point « vapeur chaude ».

Le bilan que l'on obtient finalement est donné figure A1.8. Son rendement et le produit global sont maintenant corrects. Les gaz brûlés sortant à 292 °C n'étant pas valorisés, ils correspondent bien à une perte.

composant	Resource	Product	exergy efficiency	irreversibilities	% total	settings
combustible	897,041	0	0	0	0	
compresseur	442,71	402,238	0,908581	40,472	0,08269	
turbine	796,411	760,94	0,955462	35,471	0,07247	
chambre de combustion	0	613,557	0,683978	275,983	0,5639	
eau froide	4,593	0	0	0	0	
vapeur chaude	114,658	114,658	0	0	0	
HRSG gaz	157,839	0	0	(157,839)	(0,3225)	HRSG
HRSG eau	0	110,065	0	(-110,065)	(-0,2249)	HRSG
sortie gaz	0	0	0	89,751	0,1834	loss
global	901,634	432,888	0,4572	489,451	1	

Figure A1.8: Bilan exergetique du projet complet

Comme précédemment, une fois le bilan exergetique du projet calculé, il est possible de faire afficher dans l'éditeur de structures productives les valeurs des exergies mises en jeu (figure A1.9).

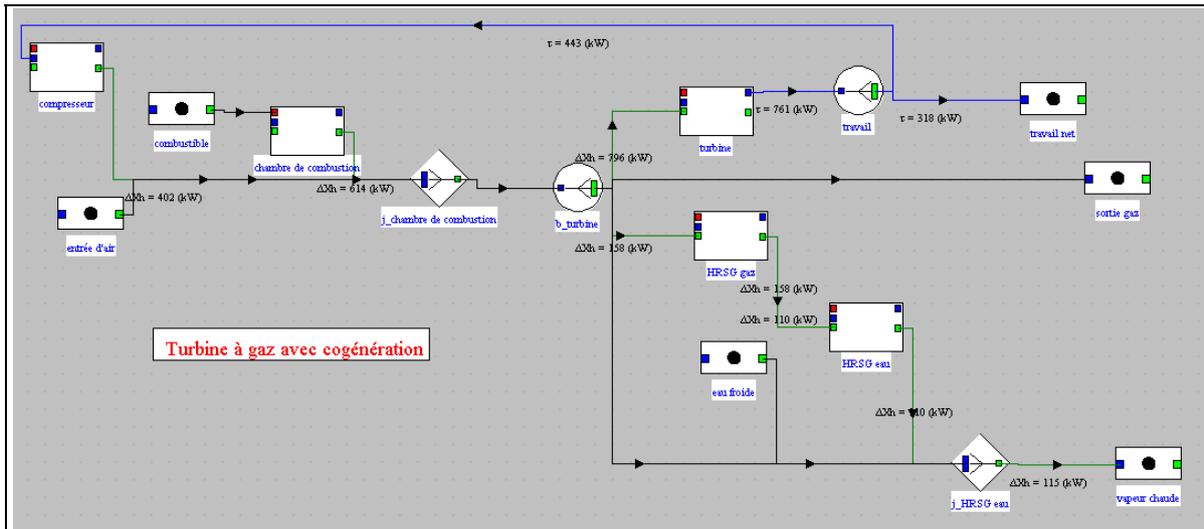


Figure A1.9: Structure productive avec affichage des exergies

Nous avons mentionné plus haut qu'il est possible d'exporter le bilan exergetique pour effectuer des post-traitements dans un tableau (figure A1.10). Discutons de l'intérêt de l'opération.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Exergy balance								
2									
3	composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irreversibilit	% total			
4	combustible	897,041	0		0				
5	compresseur	442,71	402,238	90,9%	40,472	8,3%			
6	turbine	796,411	760,94	95,5%	35,471	7,2%			
7	chambre de combustion	0	613,557	68,4%	275,983	56,4%			
8	eau froide	4,593	0		0				
9	vapeur chaude	114,658	114,658		0		échangeur		
10	HRSG gaz	157,839	0		157,839	32,3%	HRSG	47,774	9,8%
11	HRSG eau	0	110,065		-110,065	-22,5%	HRSG		
12	sortie gaz	0	0		89,751	18,3%	loss		
13	global	901,634	432,888	45,7%	489,451	1			
14	TO = 288.15 K								

Figure A1.10: Bilan exergetique du projet complet dans un tableau

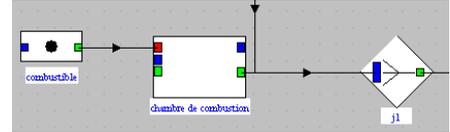
Une particularité du bilan exergetique généré automatiquement est que les échangeurs internes sont représentés par deux lignes (ici « HRSG gaz » et « HRSG eau ») et que les contributions aux irréversibilités des deux fluides sont représentées de manière algébrique, positivement pour le fluide chaud et négativement pour le fluide froid, l'irréversibilité de l'ensemble de l'échangeur étant obtenue en faisant la somme de ces deux valeurs. Pour interpréter le bilan de la figure A1.8, il faut effectuer mentalement cette sommation, alors que si l'on récupère les valeurs dans un tableau, on peut le faire en ajoutant deux cellules, comme en H10 et I10 figure A1.10, ce qui est plus facile à visualiser. Par ailleurs, on peut travailler la mise en forme du bilan, ce qui en augmente la lisibilité.

Annexe 2 : Représentation des composants sous forme d'unités productives

Composants extenseurs d'exergie

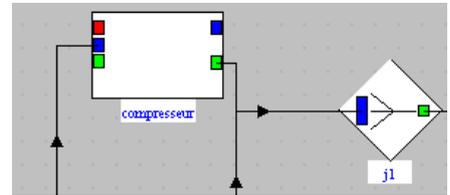
Composant F P

Combustion xq^+ Δxh



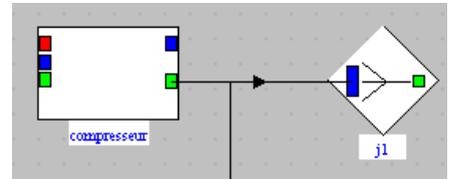
Une chambre de combustion convertit l'exergie du combustible xq^+ (représentée par un lien entrant dans le port rouge) en accroissement d'exergie Δxh du fluide qui la traverse (thermique moins pertes de charge). Le lien sortant provient donc du port vert. Il faut placer en aval une jonction dont l'autre entrée vient du comburant tandis que le combustible est connecté au port d'entrée rouge. L'exergie chimique éventuellement restante se retrouve dans les fumées et est ainsi prise en compte en aval.

Compresseur si τ interne τ^+ Δxh



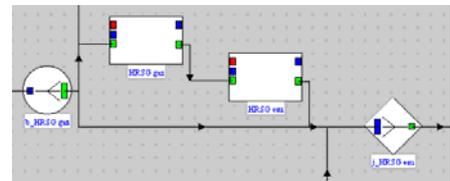
Un compresseur (ou une pompe) convertit la puissance mécanique τ^+ qu'il reçoit en accroissement d'exergie Δxh du fluide qui le traverse. Il faut donc placer en aval une jonction dont les autres entrées sont par exemple le comburant et la chambre de combustion. Le lien sortant provient du port vert.

Compresseur si τ externe τ^+ Δxh



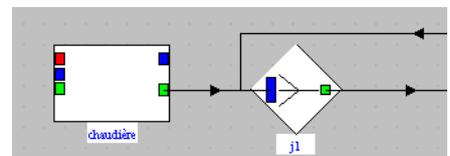
Si la puissance reçue est interne au système, elle est représentée par un lien entrant dans le port bleu. Si elle est externe, elle n'apparaît pas, mais est signalée dans l'écran de calcul exergétique.

Echangeur interne
fluide chaud en amont
fluide froid en aval Δxh^+ Δxh



Dans un échangeur modélisé en interne comme couplage entre deux transfos "échange", la ressource correspond à la variation d'exergie du fluide chaud, et le produit à celle du fluide froid. Il en résulte que le fluide chaud doit correspondre à l'une des branches d'un embranchement, et le fluide froid à l'une des branches d'une jonction. Les deux composants sont reliés comme indiqué sur la figure.

Echangeur externe $Q > 0$
 $T_k > T_0$ xq^+ Δxh

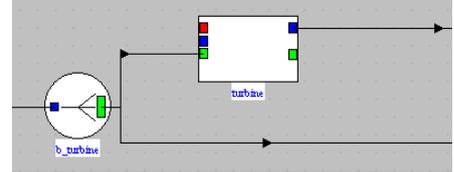


Dans un échange avec une source externe à température supérieure à celle de l'environnement, apportant de chaleur au système, la ressource est l'exergie-chaleur xQ^+ échangée avec la source. Le produit est l'accroissement d'exergie Δxh du fluide qui traverse le composant. Il faut placer en aval une jonction. Le lien sortant provient du port vert.

Composants réducteurs d'exergie

Turbine

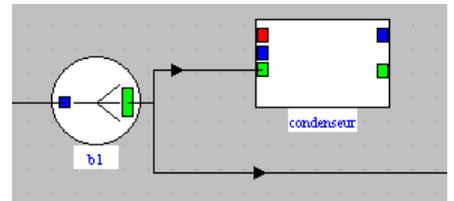
$$\Delta xh^+ \quad \tau$$



Une turbine convertit en puissance mécanique τ la diminution d'exergie Δxh^+ du fluide qui la traverse (représentée par un lien entrant dans le port vert). Il faut donc placer en amont un embranchement avec au moins une autre sortie, par exemple un rejet à l'atmosphère des gaz détendus, ou un condenseur s'il s'agit d'une vapeur. Le lien sortant représentant le travail provient du port bleu.

Echangeur externe $Q < 0$
 $T_k > T_0$

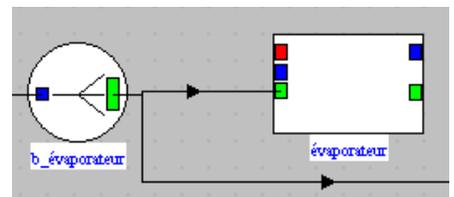
$$\Delta xh^+$$



Dans un refroidissement avec une source externe à température supérieure à celle de l'environnement, la ressource est la diminution d'exergie Δxh^+ du fluide qui le traverse (représentée par un lien entrant dans le port vert), et le produit est l'exergie-chaleur cédée par le système à la source externe, dont la température de la source externe doit être indiquée dans l'écran de calcul exergétique. Il faut placer en amont un embranchement avec au moins une autre sortie.

Echangeur externe $Q > 0$
 $T_k < T_0$

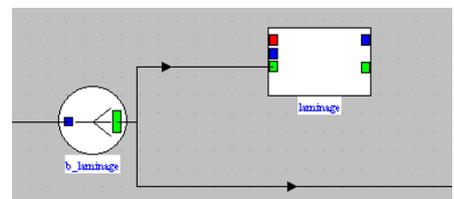
$$\Delta xh^+$$



Dans un échange avec une source externe à température inférieure à celle de l'environnement, avec apport de chaleur au système, la ressource est la diminution d'exergie Δxh^+ du fluide qui le traverse (représentée par un lien entrant dans le port vert), et le produit est l'exergie-chaleur cédée par le système à la source externe, dont la température de la source externe doit être indiquée dans l'écran de calcul exergétique. Il faut placer en amont un embranchement avec au moins une autre sortie.

Laminage

$$\Delta xh^+ \quad 0$$



Dans un laminage, l'exergie totale du fluide diminue entre l'entrée et la sortie du composant, du fait de la baisse de pression à enthalpie constante. Il faut placer en amont un embranchement. Il s'agit d'un composant dissipateur d'exergie. La ressource est la diminution d'exergie Δxh^+ du fluide qui le traverse (représentée par un lien entrant dans le port vert), et le produit est égal à 0.

Annexe 3 : Bilans exergétiques des composants externes

La section 3.2.4 du tome 3 du manuel de référence explique comment programmer les classes externes pour que les bilans exergétiques des composants puissent être effectués et pris en compte dans le bilan global.

Compte tenu d'une part de la diversité des modèles qui peuvent être construits sous forme de classes externes, et d'autre part des difficultés méthodologiques qui peuvent se poser, les structures productives et les bilans obtenus ne seront pas toujours parfaits. Il pourra alors être nécessaire de les retravailler à la main en fonction du contexte, en modifiant les liens dans l'éditeur de structure productive et/ou en exportant le bilan dans un tableur pour pouvoir le retravailler aisément.

Dans cette annexe, nous donnerons simplement quelques exemples.

A3.1 Installation de réfrigération à éjecteur alimentée par des capteurs solaires

Le premier exemple que nous présenterons est une machine de réfrigération où le compresseur est remplacé par un éjecteur alimenté en flux moteur par un générateur, lui-même chauffé par des capteurs solaires.

Le schéma de l'installation et la valeur des principaux paramètres sont donnés figure A3.1.

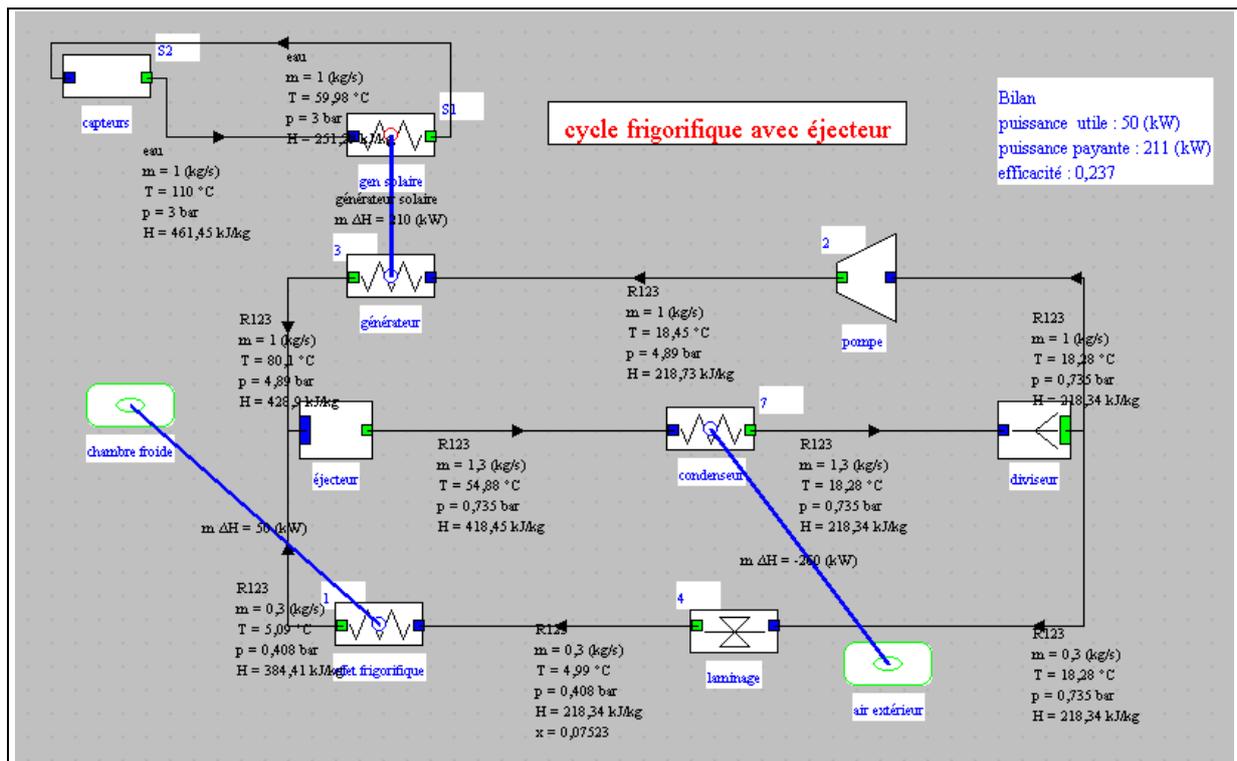


Figure A3.1 : Schéma d'un cycle de réfrigération à éjecteur alimenté par des capteurs solaires

Ce cycle met en jeu deux composants externes, l'éjecteur et les capteurs solaires.

La structure productive que nous obtenons automatiquement est donnée figure A3.2. Pour qu'elle puisse être construite, il faut impérativement que les deux composants externes aient été recalculés, faute de quoi les calculs exergétiques ne sont pas initialisés correctement.

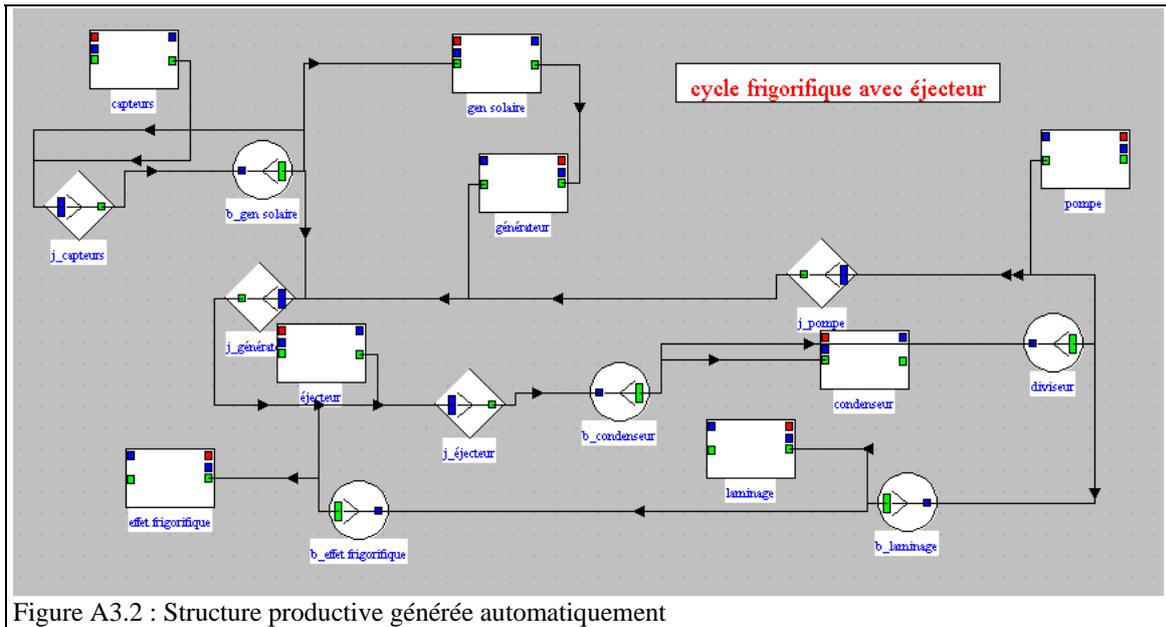


Figure A3.2 : Structure productive générée automatiquement

Elle fait apparaître plusieurs diviseurs et mélangeurs en série qui peuvent être fusionnés, ainsi qu'un élément qui peut être supprimé, le diviseur. En enlevant les nœuds en excès (y compris ceux du modèle physique), vous obtenez une nouvelle structure productive que vous pouvez retravailler pour obtenir une meilleure lisibilité, en réorientant certains composants. Vous obtenez un résultat voisin de celui de la figure A3.3.

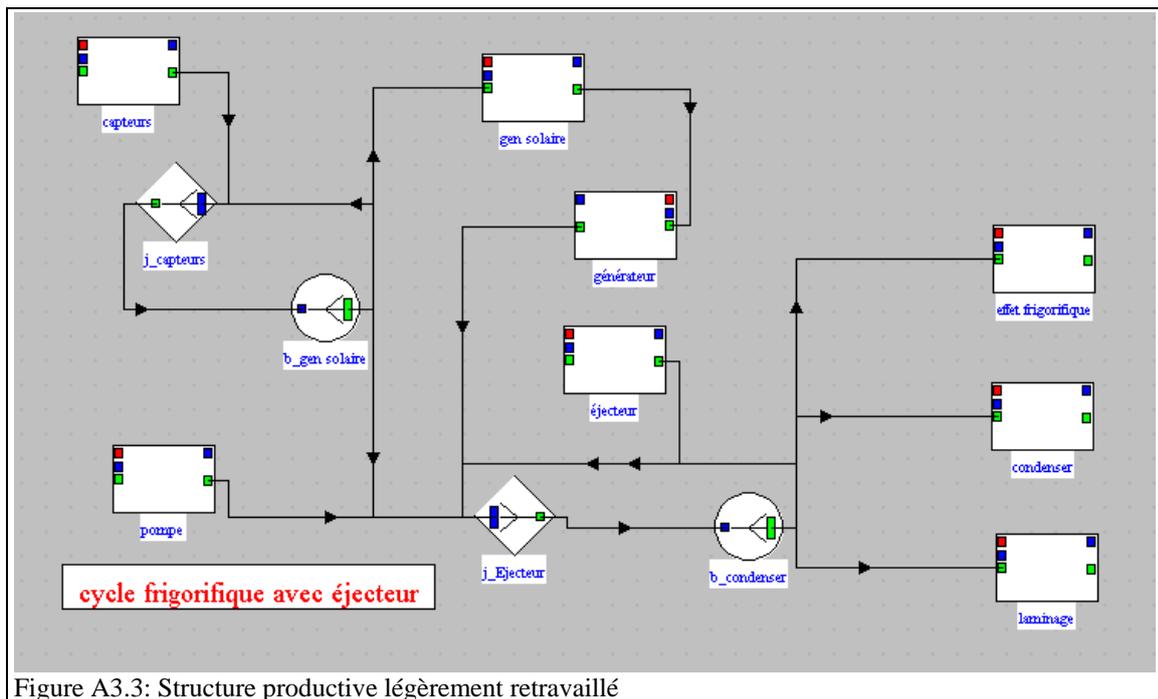


Figure A3.3: Structure productive légèrement retravaillé

Cette structure productive s'interprète comme ceci : la machine frigorifique reçoit de l'extérieur un apport d'exergie au niveau du générateur et de la pompe. Cette exergie est pour partie convertie dans l'évaporateur (effet frigorifique), le reste étant dissipé dans le condenseur et le détendeur (laminage). L'exergie apportée au générateur provient des capteurs solaires, lesquels convertissent en chaleur le rayonnement solaire.

Ce schéma n'est pas encore paramétré complètement. Si l'on essaie d'établir le bilan exergétique complet du projet, on obtient le résultat suivant, en considérant (paramètres globaux du simulateur) une température de l'environnement égale à 15 °C pour le calcul des exergies (figure A3.4).

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
laminage	0,1182	0	0	0,1182	0,0002832	
éjecteur	31,933	0	0	31,933	0,07651	
capteurs	399,417	40,801	0,102152	358,616	0,8592	
pompe	0,3939	0,2818	0,715531	0,112	0,0002684	compr
générateur	0	33,542	0	(-33,542)	(-0,08037)	générateur solaire
gen solaire	40,812	0	0	(40,812)	(0,09779)	générateur solaire
effet frigorifique	1,783	2,736	1,53423	-0,9527	-0,002283	Tk = 0 °C
condenseur	5,978	-14,286	-2,38972	20,264	0,04855	Tk = 0 °C
global	431,744	-11,55	0,03331	417,361	1	

Figure A3.4 : Bilan exergetique avant paramétrage

La dernière colonne, intitulée "settings", donne quelques informations synthétiques sur les paramétrages pris en compte : les deux compresseur représentent des apports d'exergie externe, et la désurchauffe, le condenseur et l'évaporateur sont considérés comme échangeant de l'exergie-chaleur avec une source à 0 °C, ce qui est bien évidemment absurde.

Pour terminer l'établissement de la structure productive, il reste à paramétrer les températures des sources externes avec lesquelles des exergies-chaleur sont échangées. Nous prendrons 10 °C pour l'évaporateur et 15 °C pour le condenseur.

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
laminage	0,1182	0	0	0,1182	0,0002964	
éjecteur	0	119,653	0,814049	27,332	0,06853	
capteurs	399,414	40,801	0,102152	358,613	0,8991	
pompe	0,394	0,2818	0,715317	0,1122	0,0002813	compr
générateur	0	33,542	0	(-33,542)	(-0,0841)	générateur solaire
gen solaire	40,812	0	0	(40,812)	(0,1023)	générateur solaire
effet frigorifique	1,783	0,8797	0,493324	0,9036	0,002266	Tk = 10,00 °C
condenseur	4,494	0	0	4,494	0,01127	Tk = 15,00 °C
global	399,808	0,8797	0,002414	398,843	1	

Figure A3.5: Bilan exergetique du projet complet

Le bilan exergetique du projet complet est donné figure A3.5. Son rendement est très faible (0,2 %), car 90 % des irréversibilités prennent place dans les capteurs solaires, le soleil pouvant être considéré comme une source à 5800 K, alors que la température des capteurs varie entre 60 et 110 °C. L'éjecteur n'est quant à lui responsable que d'un peu moins de 7 % des pertes exergetiques.

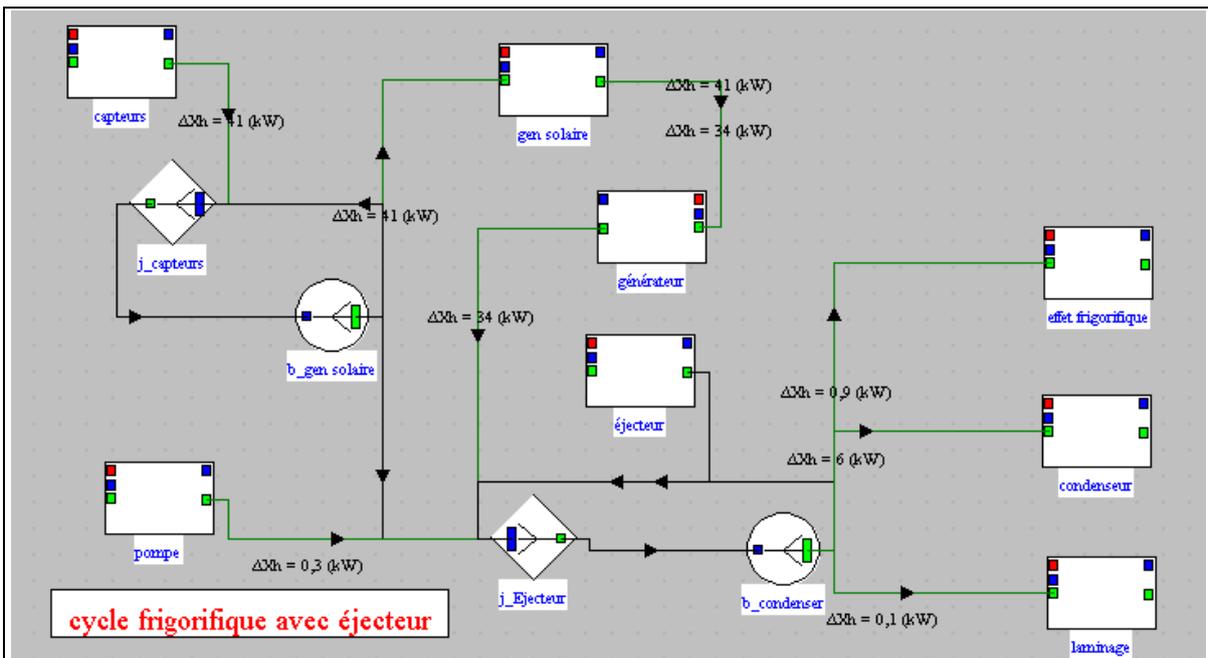


Figure A3.6 : Bilan exergetique du projet complet avec affichage des exergies

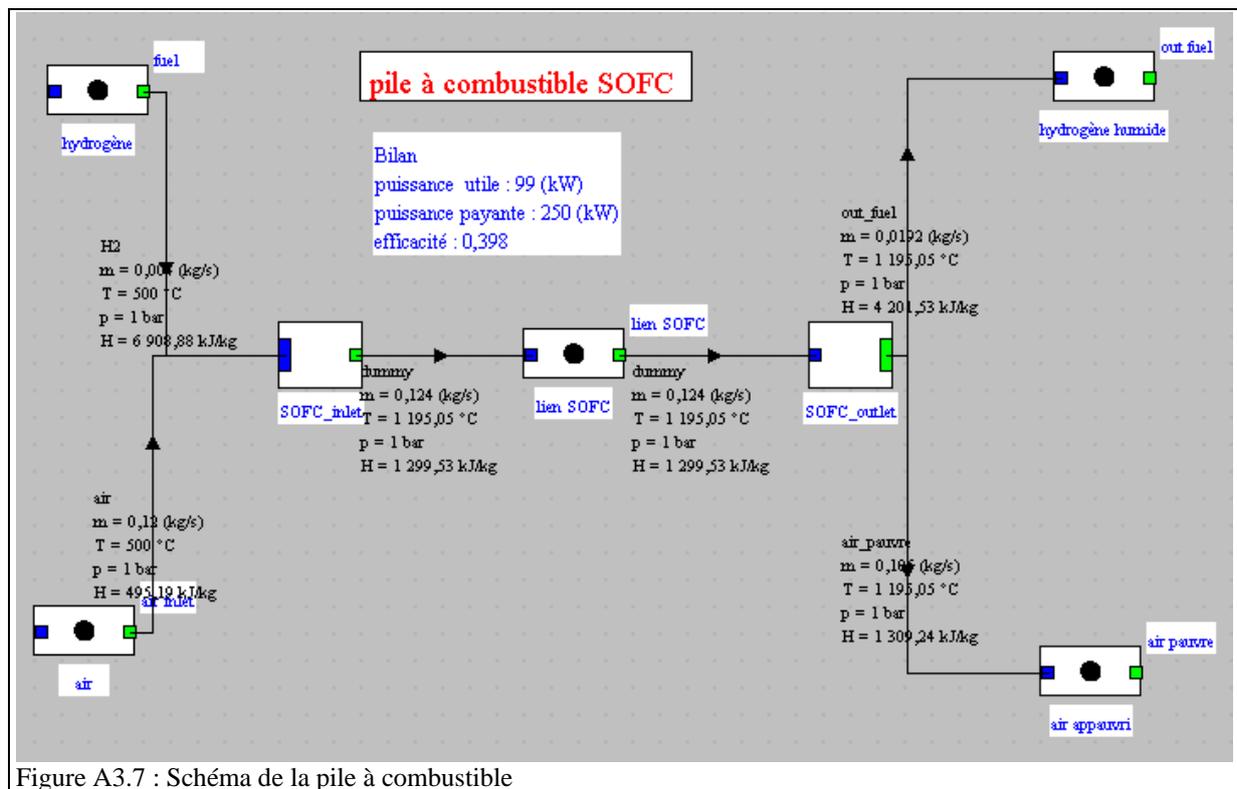
Dans cet exemple, la structure productive et le bilan exergetique sont correctement calculés, à part le choix des températures des sources.

Comme précédemment, une fois le bilan exergetique du projet calculé, il est possible de faire afficher dans l'éditeur de structures productives les valeurs des exergies mises en jeu (figure A3.6).

A3.2 Piles à combustible

Le second exemple que nous présenterons est une pile à combustible SOFC alimentée en hydrogène. Son modèle est expliqué dans la fiche-guide n°4². Ce modèle est particulièrement simple : on suppose que du côté de l'anode, seule la fraction τ est transformée dans la pile, le reste ressortant, et que le rendement de conversion énergétique ε est connu. Il s'agit d'une pile de technologie cylindrique du type à haute température de celle développée par Westinghouse, correspondant à un système de 100 kWe, pour laquelle $\tau = 0,48$ et $\varepsilon = 0,44$.

Le schéma de l'installation et la valeur des principaux paramètres sont donnés figure A3.7.



La pile est modélisée par un quadripôle : l'hydrogène entre en haut à gauche de la pile, se combine au niveau de l'anode avec les ions O²⁻ de l'air humide entrant en bas à gauche, pour former de l'eau. L'hydrogène ressort en haut à droite enrichi en eau, tandis que l'air ressort en bas à droite appauvri en oxygène.

Pour la représenter dans ThermoOptim, on forme ce quadripôle en associant un mélangeur en entrée (classe SOFCH2inlet) et un diviseur en sortie (classe SOFCH2outlet), les deux étant reliés par une transfo-point qui joue un rôle purement passif.

La structure productive que nous obtenons automatiquement est donnée figure A3.8. Pour qu'elle puisse être construite, il faut impérativement que les deux composants externes aient été recalculés, faute de quoi les calculs exergetiques ne sont pas initialisés correctement.

² <http://diren.s.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/fiche-sujet-fg4.html>

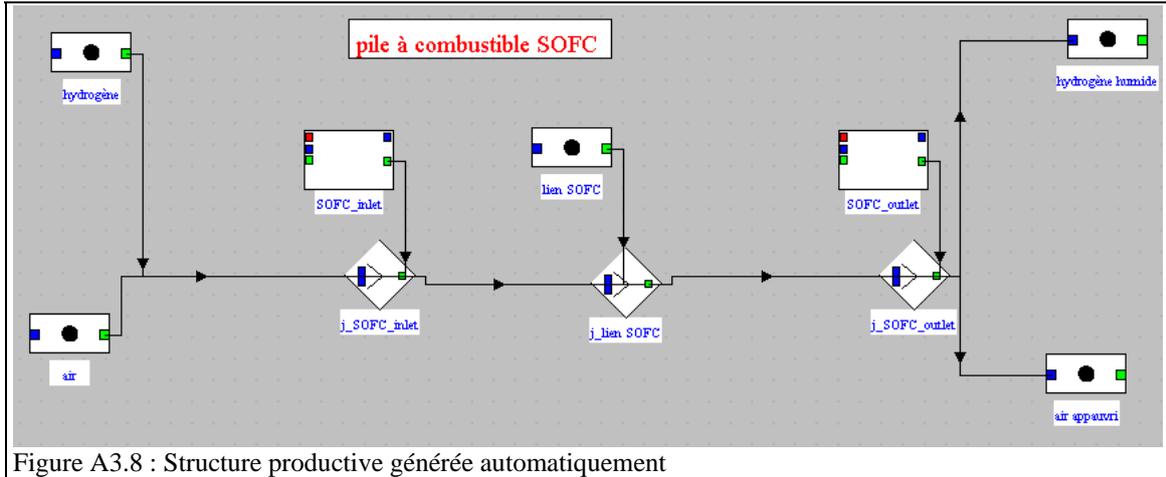


Figure A3.8 : Structure productive générée automatiquement

Elle fait apparaître trois mélangeurs en série qui peuvent être fusionnés et comporte des éléments inutiles, comme le diviseur d'entrée et le lien SOFC. En enlevant les nœuds en excès, vous obtenez une nouvelle structure productive que vous pouvez retravailler pour obtenir une meilleure lisibilité, en réorientant certains composants. Par ailleurs, la puissance électrique produite par la pile à combustible n'apparaît pas. Pour cela il faut ajouter une transfo-point connectée au port bleu de sortie du composant SOFC_outlet.

Vous obtenez un résultat voisin de celui de la figure A3.9, et la figure A3.10 montre le bilan du diviseur externe correspondant au modèle de pile. L'exergie entrante correspond à l'exergie de l'hydrogène entrant et le travail produit au courant généré. Le rendement et les irréversibilités s'en déduisent.

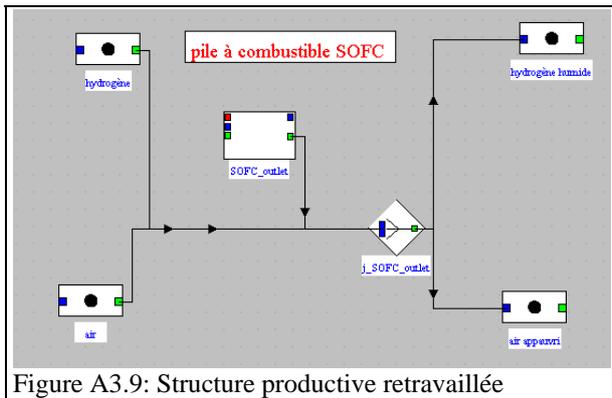


Figure A3.9: Structure productive retravaillée

	t+	<input type="text" value="0"/>	<input type="button" value="afficher"/> SOFC_outlet
Ressource	ΔXh^+	<input type="text" value="0"/>	
	xq^+	<input type="text" value="0"/>	
Produit	t	<input type="text" value="99,387"/>	
	ΔXh	<input type="text" value="0"/>	
rend. exergétique		<input type="text" value="0,175238"/>	<input type="button" value="Calculer"/>
Irréversibilités		<input type="text" value="81,971"/>	

Figure A3.10: Bilan exergétique du composant pile

Son bilan exergétique peut être calculé de la manière suivante :

- la puissance produite est la puissance électrique
- x_q^+ est le PCS de l'hydrogène³, supérieur à son PCI
- le rendement est le rapport de la puissance produite à x_q^+
- l'irréversibilité se déduit des précédentes

Le code correspondant est le suivant :

```
double DH0=-241830;//kJ/kmol H2 vapeur
double DH0_vap=-285830;//kJ/kmol H2 liquide
double DG0=-237160;//kJ/kmol H2
double elecPower=tau*DG0*epsi*molFlowH2;
double Qlib=-tau*DH0*molFlowH2+elecPower;
tauProduct=-elecPower;
etaExer=elecPower/DH0/molFlowH2;
deltaXhi=(1-etaExer)*tauProduct;
```

³ En effet, l'exergie maximale correspond au cas où de l'eau formée pendant la réaction est condensée

Le bilan exergetique complet du projet est donné figure A3.11, en considérant une température de l'environnement égale à 15 °C.

Du fait que seulement 48 % du débit d'hydrogène entrant est converti, 64 % des irréversibilités proviennent de l'hydrogène rejeté en sortie de pile, et 17 % prennent place dans le composant pile. De plus, les deux flux gazeux sortent à très haute température sans être valorisés, ce qui contribue à baisser les performances.

composant	Ressource	Produit	rend. exergetique	Irréversibilités	% total	paramétrages
air	25,328	0	0	0	0	
hydrogène	491,525	0	0	0	0	
SOFC_outlet	0	99,387	0,175238	81,971	0,1758	
air appauvri	0	0	0	84,7	0,1817	loss
hydrogène humi...	0	0	0	299,556	0,6425	loss
global	516,853	99,387	0,09795	466,227	1	

Figure A3.11 : Bilan exergetique global

Par ailleurs, si l'on adopte un code de lien analogue à celui en vigueur pour les chambres de combustion, l'hydrogène entrant devrait être connecté au port d'entrée rouge du composant SOFC_outlet.

Ceci vient de ce qu'il est impossible de coder les bibliothèques des classes externes pour pouvoir faire face à toutes les situations qui peuvent être rencontrées en pratique. Comme nous le disons en introduction, il est possible de retravailler à la main en fonction du contexte les éléments construits automatiquement, en exportant le bilan dans un tableau et éventuellement en modifiant les liens de la structure productive.

La figure A3.12 montre le résultat obtenu en modifiant le lien entre l'entrée d'hydrogène et le composant pile.

Nous laissons au lecteur le soin d'affiner le bilan dans un tableau pour cet exemple.

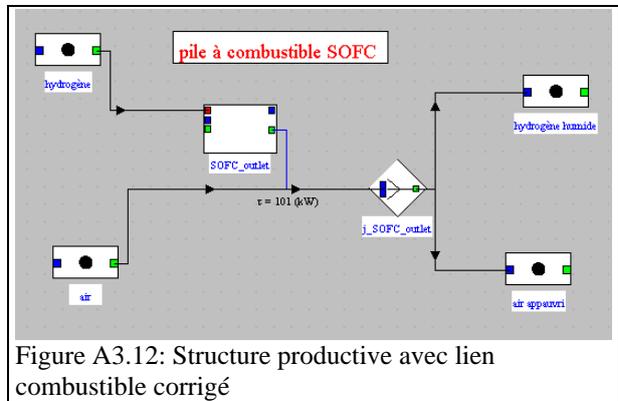


Figure A3.12: Structure productive avec lien combustible corrigé

Considérons maintenant un autre paramétrage du même modèle, destiné à représenter une pile à combustible théorique où le combustible est de l'hydrogène, et le comburant de l'oxygène, en quantité à peine supérieure à la stœchiométrie. Le paramétrage de la pile et son synoptique sont donnés figures A3.13 et A3.14.

noeud: PACO_outlet type: external divider

veine principale: afficher m global: 0,0355

lien PACO: h global: 377,91716724

isobare T global: 222,18729248

liens: Calculer

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
traces	0,000069558	0,000069558	222,19	193,81
hydrogène hu...	0,03543	0,03543	222,19	378,54

ajouter une branche

supprimer une branche

SOFC H2 outlet

fuel use rate: 0.99

conversion efficiency: 0.990

heat released (W): 13.84

electric power generated (W): -461.21

outlet temperature (K): 495.34

Dupliquer Sauver

Supprimer Fermer

Figure A3.13 : Ecran du composant pile à combustible

On a supposé que le taux d'utilisation du combustible et l'efficacité de conversion valaient 99 %. Pour un même débit d'hydrogène entrant, la température de sortie est beaucoup plus basse, et la puissance électrique près de cinq fois plus grande.

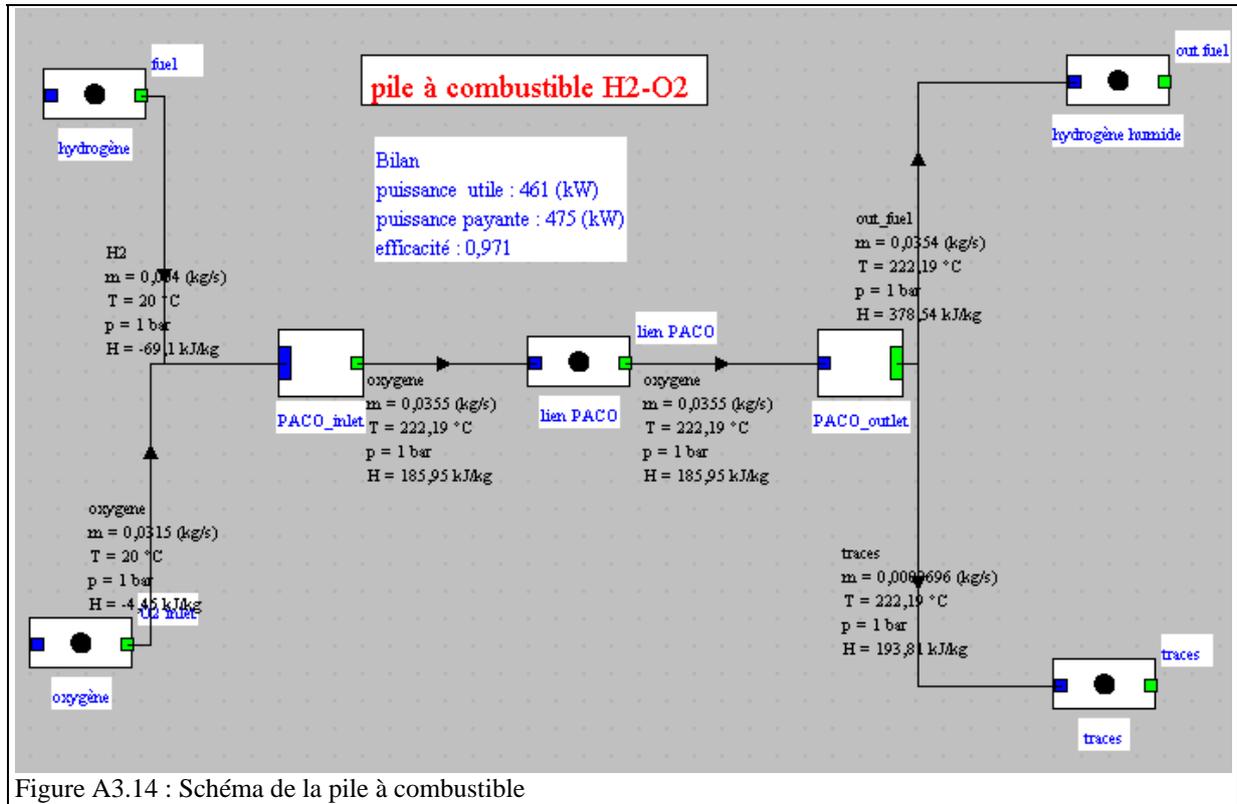


Figure A3.14 : Schéma de la pile à combustible

Le bilan exergétique est donné figure A3.15.

composant	Ressource	Produit	rend. exergétique	Irréversibilités	% total	paramétrages
oxygène	0,001238	0	0	0	0	
hydrogène	479,833	0	0	0	0	
PACO_outlet	0	461,219	0,813212	86,15	0,9122	
traces	0	0	0	0,003507	0,00003713	loss
hydrogène humi...	0	0	0	8,289	0,08777	loss
global	479,834	461,219	0,8032	94,443	1	

Figure A3.15 : Bilan exergétique avec le nouveau paramétrage

Pour une température d'entrée des fluides de 20 °C, la température de la pile atteint 222 °C, la puissance électrique 461 kW. Son rendement exergétique de composant vaut 81 %, celui du système étant légèrement plus faible.

Annexe 4 : Bilans exergetiques

La théorie de l'exergie, présentée succinctement section 2.5 de [3], 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 exergetiques. 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, les équations de bilan habituelles ne peuvent être appliquées et une démarche spécifique doit être utilisée.

L'intérêt principal des bilans exergetiques est de permettre d'étudier la répartition des irréversibilités dans un système, et de mettre ainsi en évidence la contribution relative de chacun des composants aux pertes globales. La valeur exacte des exergies mises en jeu importe donc généralement peu. Cela justifie que certaines imprécisions soient tolérées dans leur évaluation, qui, comme nous le verrons plus loin, pose diverses difficultés méthodologiques.

A4.1 Rappels

Rappelons quelques résultats établis section 2.5 de [3]. 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 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.

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 (3) :

$$\Delta x_{hij} = \sum_{k=1}^n x_{qjk} - \sum_{k=1}^p m_{jk} x_{hjk} + \sum_{k=1}^q \tau_{jk} \quad (3)$$

Par exemple, pour calculer les irréversibilités dans un échangeur de chaleur, il suffit d'ajouter membre à membre les équations (3) de chacun des deux fluides qui le traversent. S'il est adiabatique les exergies-chaleurs sont nulles. Comme le travail utile est nul, l'irréversibilité est égale à la somme des variations des exergies des deux fluides.

Pour pouvoir calculer cette équation, il faut pouvoir estimer d'une part les exergies-chaleurs et d'autre part les exergies entrantes et sortantes, ce qui pose quelques problèmes méthodologiques ébauchés plus loin.

A4.2 Calcul des exergies-chaueur

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 ($\delta Q_k = Q_k dT_k / (T_b - T_a)$) :

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

A4.3 Calcul des exergies entrantes et sortantes

L'exergie x_h entrante ou sortante est composée de quatre termes, généralement appelés exergie physique, cinétique, potentielle et chimique. L'exergie cinétique et l'exergie potentielle sont égales aux énergies du même nom. Dans la plupart des cas, elles sont négligeables pour les systèmes énergétiques que nous étudierons.

L'exergie physique est la fonction $x_h = h - T_0 s$ introduite précédemment, qui doit être évaluée par rapport aux conditions de température et de pression de l'environnement. h_0 et s_0 étant calculés pour T_0 et P_0 , elle s'exprime donc sous la forme :

$$x_h = h - h_0 - T_0 (s - s_0) \quad (4)$$

L'exergie chimique représente quant à elle le travail maximum qui pourrait être produit si la composition chimique du fluide, à la température T_0 et à la pression P_0 , était ramenée à celle de l'environnement, supposé homogène. Elle mesure donc l'écart de la composition chimique du fluide avec celle de l'environnement. Ceci suppose bien évidemment que l'on s'accorde sur la composition de l'environnement, ce que divers chercheurs ont essayé de faire. Pour le propos qui nous intéresse, c'est-à-dire l'étude des systèmes énergétiques, les changements de composition chimique à prendre en compte seront de deux types : ceux liés à un mélange de gaz, et ceux provenant des réactions de combustion.

Lorsqu'il y a mélange de fluides de compositions différentes, l'entropie du mélange est supérieure à la somme des entropies des constituants avant mélange d'une valeur $k_m = -r \sum x_i \ln x_i > 0$. Physiquement, ceci s'explique par le caractère irréversible de l'opération de mélange. Le calcul de l'exergie du mélange ne pose donc pas de problème particulier si celle des constituants est connue.

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, nous suivrons ceux qui l'assimilent à son PCI, disponible dans Thermoptim (il serait possible de la multiplier par un facteur voisin de 1,06 si l'on voulait affiner un peu les choses).

Pour le calcul des exergies des flux entrants et sortants, une valeur de référence est prise pour T_0 et 1 bar :

A4.4 Rendement exergetique

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, ou produits, 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.

On notera qu'il existe un certain degré de subjectivité dans la définition des ressources et des produits. C'est un point qui est débattu dans la communauté des exergéticiens, et nous nous rallions à Kotas [2], qui fait l'hypothèse explicite que tout composant est conçu en fonction d'un objectif précis, qui permet de lever les ambiguïtés (Kotas parle de "desired output"). Une fois cet objectif explicite, nous considérerons avec lui que les ressources exergétiques sont les intrants nécessaires ("necessary inputs") pour pouvoir fournir le produit désiré. Le rendement exergétique des composants est dans ces conditions ce qu'il appelle le rendement rationnel ψ , défini comme le rapport des exergies sortant du système aux exergies entrantes.

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.

Autant le calcul du bilan exergétique d'un composant ne pose pas de problème particulier, autant faut-il spécifier avec soin comment ses différentes composantes doivent être prises en compte dans le bilan global, du fait que la frontière du système n'est pas la même que celle d'un composant donné.

Pour les éléments du noyau de Thermoptim, les règles peuvent être figées une fois pour toutes, mais il n'en va pas de même des composants externes, pour lesquels seul le concepteur est capable de dire quelles valeurs doivent être comptabilisées dans le bilan exergétique global.

Sommaire

METHODE PRATIQUE DE CONSTRUCTION DE BILANS EXERGETIQUES AVEC LES STRUCTURES PRODUCTIVES.....	1
1 Introduction	1
2 Editeur de structures productives de ThermoOptim	2
2.1 Unités productives ou dissipatives	2
2.2 Jonctions et embranchements	3
3 Méthode de création des structures productives et des bilans exergétiques	3
3.1 Création automatique de la structure productive.....	3
3.2 Bilans exergétiques de composants.....	4
3.3 Génération des bilans exergétiques	5
4 Mise en application de la méthode	6
4.1 Exemple d'un cycle à vapeur.....	6
4.2 Exemple d'un cycle de réfrigération.....	9
4.3 Méthode d'établissement d'un bilan exergétique.....	10
4.4 Exemple d'une turbine à gaz.....	11
4.5 Exemple d'un cycle combiné à un niveau de pression	13
4.6 Exemple d'un cycle de réfrigération bi-étagé à injection totale	18
5 Conclusion.....	21
6 Références	21
Annexe 1 : Etablissement d'une structure productive.....	22
A1.1 Relation entre schéma physique et structure productive	22
A1.2 Structure productive sous ThermoOptim de la turbine à gaz utilisée en cogénération	23
Annexe 2 : Représentation des composants sous forme d'unités productives	27
Annexe 3 : Bilans exergétiques des composants externes	29
A3.1 Installation de réfrigération à éjecteur alimentée par des capteurs solaires	29
A3.2 Piles à combustible	32
Annexe 4 : Bilans exergétiques	36
A4.1 Rappels	36
A4.2 Calcul des exergies-chaleur.....	37
A4.3 Calcul des exergies entrantes et sortantes	37
A4.4 Rendement exergétique	37