

# Fiche-guide de TD sur l'optimisation des cycles combinés par la méthode du pincement

## 1) Objectifs du TD

L'objectif du TD est d'étudier la mise en œuvre de la méthode du pincement pour l'optimisation de centrales électriques à cycle combiné et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec ThermoOptim. Pour pouvoir faire ce TD, il est nécessaire que vous ayez accès à la version Professionnelle ou Industrielle de ThermoOptim.

Son intérêt est de vous guider pas à pas dans cette démarche un peu difficile. Il comporte deux parties : la première (section 3) est un rappel sur la méthode du pincement, et la seconde (section 4) correspond à la mise en œuvre pratique de cette méthode.

## 2) Références

LINNHOF B. - Introduction to Pinch Technology. *Document web*: [www.linnhoffmarch.com](http://www.linnhoffmarch.com), copyright 1998 Linnhoff March

GICQUEL R. - Méthode d'optimisation systémique basée sur l'intégration thermique par extension de la méthode du pincement : application à la cogénération avec production de vapeur. *Revue Générale de Thermique*, tome 34, n° 406, octobre 1995.

GICQUEL R. - Méthodologie d'analyse, base de thermodynamique, composants, THERMOPTIM, tome 1. *Les presses de l'Ecole des Mines*, Paris 2001.

GICQUEL R. - Application, tome 2. *Les presses de l'Ecole des Mines*, Paris 2001.

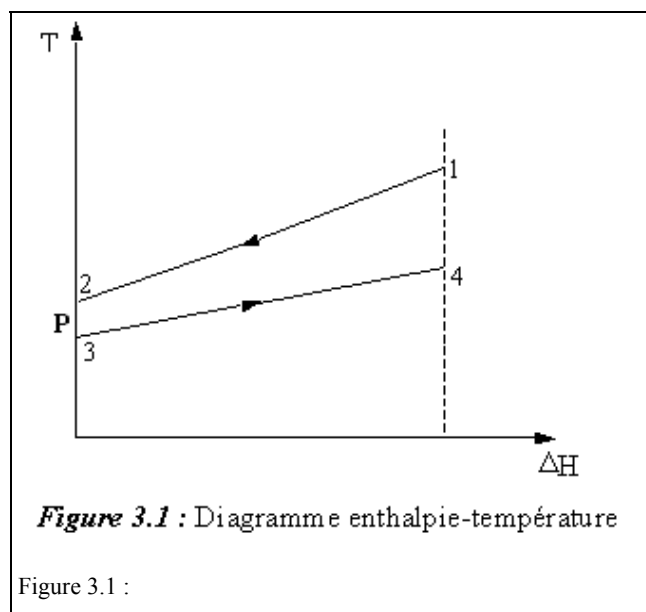
## 3) Optimisation par la méthode du pincement

### 3.1 Principes fondamentaux

L'intégration thermique est une méthode rigoureuse et structurée permettant l'utilisation efficace de l'énergie disponible dans une installation et donc la réduction des consommations énergétiques.

Elle permet aussi de concevoir un réseau optimal d'échangeurs en conduisant le concepteur à identifier comment appairer convenablement les fluides présents dans le système.

Pour un simple échangeur de chaleur à contre courant dans lequel circule deux fluides échangeant de la chaleur entre eux, comme le travail échangé est nul, l'enthalpie échangée



est égale à la quantité de chaleur échangée et est donnée par la relation :

$$Q = \Delta H = (\dot{m}c_p)_c(T_1 - T_2) = (\dot{m}c_p)_f(T_4 - T_3) \quad (3-1)$$

Le diagramme enthalpie-température de l'échangeur est représenté par la figure 3.1.

Dans cette figure, l'écart minimal de température entre le fluide chaud et le fluide froid est appelé pincement (**P**). D'après la seconde loi de la thermodynamique, l'échange n'est possible que si cet écart est plus grand que zéro. S'il était égal à zéro, l'échangeur de chaleur devrait avoir une surface infinie.

La valeur du pincement est choisie en fonction du problème considéré, c'est-à-dire que le concepteur choisit sa valeur :

- soit elle lui est imposée par des considérations extérieures à l'optimisation,
- soit il la choisit par expérience, des valeurs usuelles de pincement sont 16 K pour les gaz, 8 K pour les liquides et 6 K pour les vaporisations ou condensations. Néanmoins, ces valeurs sont parfaitement modifiables, par exemple dans le cas où des échangeurs à haute performance en matériau spécial sont utilisés.
- ou alors c'est un paramètre à faire varier dans une étude systémique afin de trouver l'optimum technico-économique.

Le dimensionnement de l'échangeur dépend de la valeur choisie pour le pincement. Si le pincement est trop faible, la surface de l'échangeur va augmenter et par conséquent le coût d'investissement aussi. Si elle est trop grande, il y aura beaucoup d'irréversibilité, la perte de rendement finissant par surpasser l'économie d'investissement.

Dans le cas d'un système complexe où l'on effectue des échanges entre plusieurs fluides chauds et plusieurs fluides froids, l'intégration thermique permet non seulement de déterminer la quantité minimale d'énergie fournie par les utilités mais aussi de trouver un réseau d'échangeurs adapté pour que l'usine fonctionne.

Le principe fondamental de la démarche consiste à satisfaire les besoins de chaque équipement par une source appropriée (produite en un autre point du système ou par une source externe).

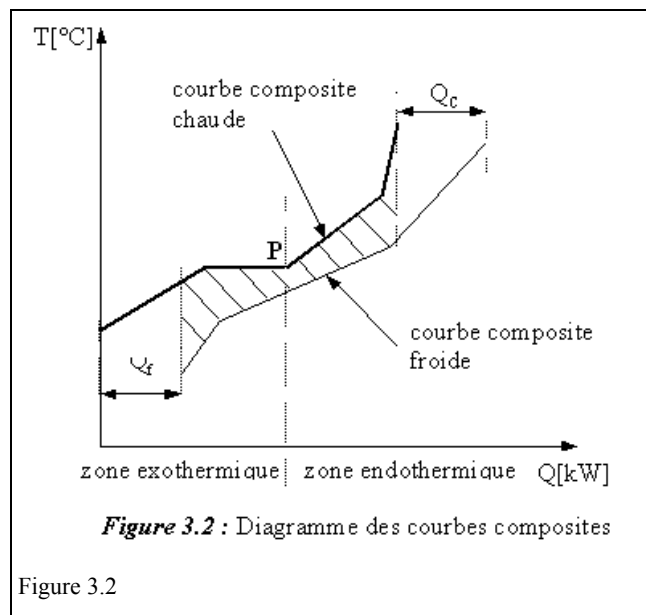


Figure 3.2

### 3.2 Courbes composites

Pour obtenir le besoin minimal en énergie, on utilise un outil appelé « courbes

composites ». Il consiste à tracer sur un diagramme enthalpie température le profil des sources d'énergie disponible (courbes composites chaudes) et le profil des besoins en énergie (courbes composites froides) en fonction des températures.

La construction de ces courbes est simple. Elles sont construites en cumulant, par niveau de température, l'enthalpie disponible dans les fluides chauds (respectivement froids). Nous détaillerons la méthode de construction un peu plus tard.

Dans un diagramme enthalpie-température, on cale la courbe composite chaude à l'origine des abscisses. Il reste à caler la courbe composite froide par translation suivant l'axe horizontal de manière à respecter la valeur choisie pour le pincement. C'est-à-dire que l'écart minimum entre les deux courbes au point le plus proche selon l'axe des ordonnées correspond bien à la valeur du pincement retenu (*figure 3.2*). L'aire hachurée sur le schéma représente la zone où se situe l'échange thermique entre les fluides chauds et les fluides froids.

Nous tenons à faire remarquer que les extrémités des courbes composites sont en général décalées, parce que ces courbes sont calées en fonction du pincement.  $Q_c$  est en fait un besoin de chauffage et  $Q_f$  un besoin de refroidissement complémentaires.

A ce stade de l'optimisation, le système est à priori non équilibré : il a à la fois un besoin d'énergie à haute température et un rejet à basse température.

La position du point (**P**) où la différence de température est minimale entre les deux courbes indique l'endroit du système où l'échange thermique est le plus contraint. Ce point permet de séparer le problème en deux zones distinctes: la zone exothermique au-dessous du pincement et la zone endothermique au-dessus du pincement.

Dans la zone exothermique, les fluides chauds contiennent plus d'énergie que les fluides froids n'en ont besoin. Les fluides chauds se refroidissent moins vite que ne se réchauffent les fluides froids, et à cette étape de la procédure il existe en général un excédent  $Q_f$  de chaleur qui doit être évacué par un fluide de refroidissement externe, cette zone se comporte donc comme une source de chaleur.

Dans la zone endothermique où l'énergie disponible dans les fluides chauds est insuffisante pour les besoins des fluides froids, ils se refroidissent donc plus vite que les fluides froids ne se réchauffent. Un complément de chauffage  $Q_c$  est en général nécessaire, d'où le fait que cette zone se comporte comme un puits de chaleur.

L'existence du pincement, visible sur la *figure 3.2*, implique que les courbes composites se rapprochent en aval du pincement et s'écartent au-dessus du pincement. Donc la pente de la courbe composite froide au-dessous du pincement est supérieure à celle de la courbe composite chaude, c'est à dire :

$$\dot{m}c_{pf} < \dot{m}c_{pc} \quad (3-2)$$

Inversement au-dessus du pincement on a :

$$\dot{m}c_{pc} < \dot{m}c_{pf} \quad (3-3)$$

### 3.3 Définition

Nous allons introduire deux définitions que nous utiliserons par la suite dans le document.

### Utilité froide

L'utilité froide est, par définition, un fluide de refroidissement complémentaire utilisé pour évacuer l'excédent de chaleur du système à basse température.

### Utilité chaude

L'utilité chaude est un complément de chauffage utilisé pour satisfaire le besoin de chaleur du système à haute température.

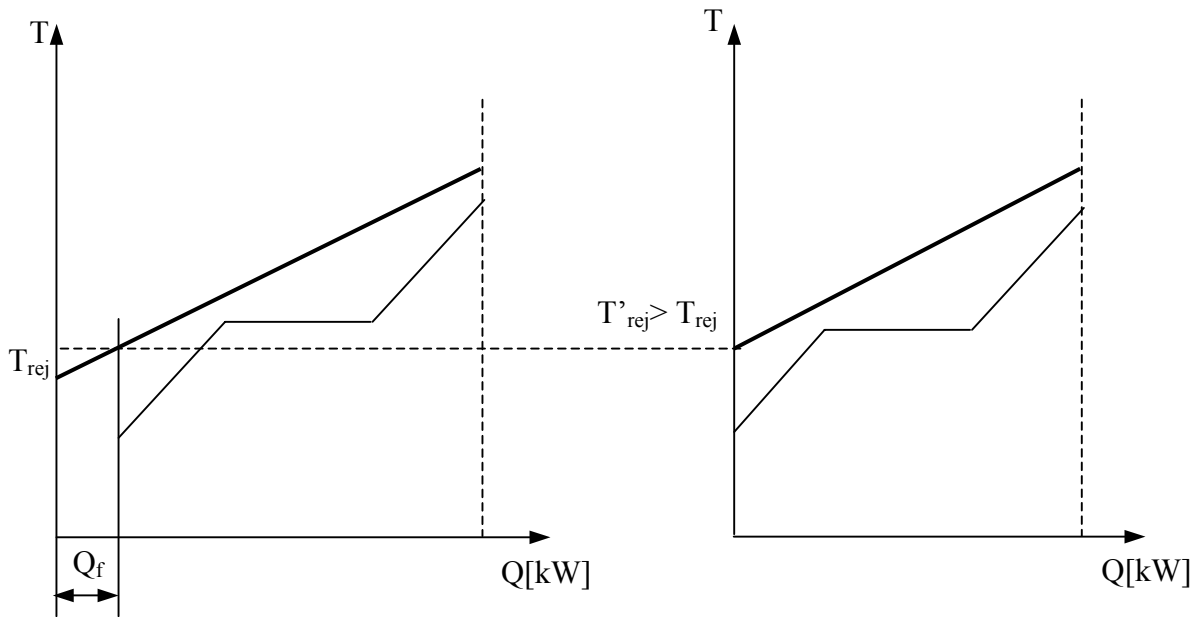
$Q_c$  et  $Q_f$  sont donc à satisfaire par des utilités adaptées. Dans le cas d'un procédé chimique, il n'est pas forcément nécessaire et/ou possible d'annuler ces deux quantités : de la chaleur peut être disponible ou nécessaire dans une autre partie de l'usine. En revanche pour un système de production d'électricité par exemple, il faudra les annuler : on n'imagine pas placer une source de chaleur d'appoint à côté d'un réacteur nucléaire ni rejeter sans l'utiliser de la chaleur dans un puits.

## **3.4 Règles de base à respecter**

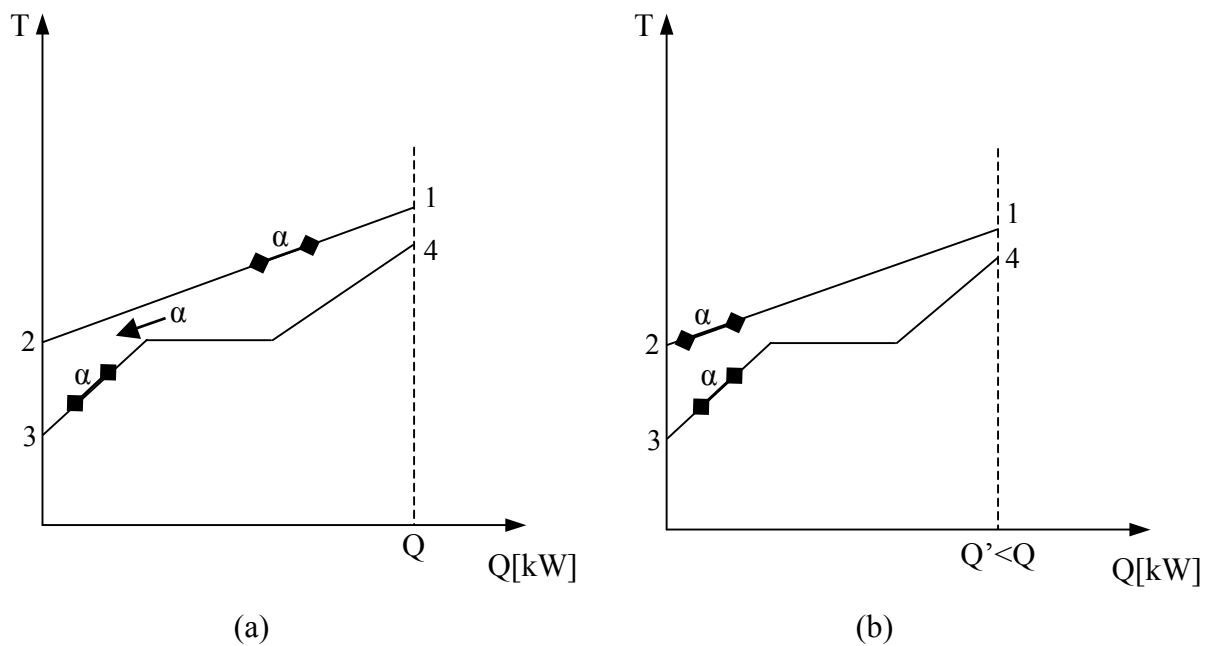
Le schéma de la **figure 3.2**, tout en étant assez simple à construire, est très riche et permet de formuler simplement quelques règles d'optimisation générales très importantes pour les systèmes de production d'énergie :

- 1) Annuler l'utilité chaude ( $Q_c$ ) : En général, dans les systèmes thermodynamiques comme les cycles combinés, pour annuler  $Q_c$ , il suffit d'ajuster le débit de vapeur du système. Pour un cycle de Brayton avec régénération, il faudra choisir les températures aux bornes du régénérateur.
- 2) Essayer d'annuler l'utilité froide ( $Q_f$ ) : La façon d'annuler  $Q_f$  dépend fortement du système étudié. En fonction de ce dernier, on peut modifier soit un débit, soit une pression, soit une température. La **figure 3.3** montre un cas simple où l'on modifie la température de sortie des gaz d'une cheminée. La méthode du pincement ne dit pas quel paramètre doit être modifié mais elle permet de bien identifier ce problème pour le régler avant d'aller plus loin dans l'optimisation.
- 3) La chaleur ne doit pas être transférée à travers le pincement. Ce qui se décline en :
  - 3a) Eviter d'utiliser un fluide chaud au-dessus du pincement pour chauffer un fluide froid qui se trouve au-dessous du pincement.
  - 3b) Eviter d'utiliser un fluide froid au-dessous du pincement pour refroidir un fluide chaud qui se situe au-dessus du pincement.

En effet, dans le cas de la **figure 3.4**, on réalise une économie d'énergie si on n'utilise pas de la chaleur qui se trouve au-dessus du pincement pour chauffer un fluide au-dessous du pincement. Il faut éviter de prendre de la chaleur dans une zone qui n'en a déjà pas assez pour chauffer un fluide dans une zone où il y a déjà trop de disponibilités.



**Figure 3.3**



**Figure 3.4** : Effet d'un transfert de chaleur à travers le pincement

### 3.5 Méthode de construction des courbes composites

Revenons à la méthode de construction des courbes composites. Le Professeur B. Linnhoff a proposé un algorithme permettant de déterminer algébriquement la consommation minimale d'énergie et la localisation du pincement des fluides chauds et des fluides froids. Pour expliquer la méthode nous allons prendre un exemple tiré d'un article de B. Linnhoff, ce cas relève du génie des procédés qui est un peu plus général que le cas de l'énergétique car il n'est pas nécessaire d'annuler  $Q_c$  et  $Q_f$ .

Les données thermiques sont représentées dans le tableau suivant:

Fluide		$\dot{m}.c_p$ [kW / K]	$T_{inf}$ [°C]	$T_{sup}$ [°C]	$\Delta H$ [kW]
N°	type				
1	froid	2	20	135	230
2	chaud	3	170	60	-330
3	froid	4	80	140	240
4	chaud	1,5	150	30	-180

**Tableau 3.1**

- Après avoir choisi la valeur du pincement, les deux courbes sont décalées de manière à les rapprocher l'une de l'autre. La courbe composite chaude est décalée en la réduisant de  $\frac{\Delta T_{pinc}}{2}$  et la courbe composite froide est décalée en l'augmentant de  $\frac{\Delta T_{pinc}}{2}$ . Nous choisissons comme valeur  $\Delta T_{pinc} = 10K$ , nous obtenons le tableau ci-dessous avec les températures modifiées:

Fluide		$\dot{m}.c_p$ [kW / K]	$T_{inf}$ [°C]	$T_{sup}$ [°C]	$\Delta H$ [kW]
N°	type				
1	froid	2	25	140	230
2	chaud	3	165	55	-330
3	froid	4	85	145	240
4	chaud	1,5	145	25	-180

**Tableau 3.2** : Données avec les températures décalées

- Il faut créer les intervalles de température des températures décalées en les classant de la température supérieure à la température inférieure. Ces intervalles sont définis par les températures supérieures et inférieures des températures calculées précédemment.

- Pour chaque intervalle de température, il faut repérer les fluides qui interviennent dans le calcul des bilans enthalpiques. Ensuite, calculer les bilans enthalpiques de chaque intervalle de température et leur différence en vérifiant si le bilan net de l'intervalle abouti

à un déficit d'énergie ou un excès d'énergie. On les détermine par les formules suivantes :

$$\Delta T_i = T_i - T_{i+1} \quad (3-4)$$

$$\sum (\dot{m}.c_p)_i = \sum (\dot{m}.c_p)_f - \sum (\dot{m}.c_p)_c \quad (3-5)$$

$$\Delta H_{net,i} = \sum (\dot{m}.c_p)_i . \Delta T_i \quad (3-6)$$

Où  $\sum (\dot{m}.c_p)_f$  et  $\sum (\dot{m}.c_p)_c$  représentent respectivement la somme des débits calorifiques des fluides froids et des fluides chauds de l'intervalle considéré.

$\Delta H_{net,i}$  représente le bilan enthalpique net de l'intervalle i.

Pour chaque intervalle, si  $\Delta H_{net,i}$  est positif on a un excès d'énergie, et si  $\Delta H_{net,i}$  est négatif on a un déficit d'énergie.

Dans le cas de l'exemple précédent on obtient le tableau ci-dessous :

Intervalle	$T_i$ [°C]	$T_{i+1}$ [°C]	fluides	$\Delta T_i$ [K]	$\sum (\dot{m}.c_p)_i$	$\Delta H_{net,i}$ [kW]
1	165	145	« 2 »	20	-3	-60
2	145	140	« 2,3,4 »	5	-0,5	-2,5
3	140	85	« 2,3,1,4 »	55	1,5	82,5
4	85	55	« 2,1,4 »	30	-2,5	-75
5	55	25	« 1,4 »	30	0,5	15

**Tableau 3.3** : Classification par intervalle de températures

Par exemple, pour l'intervalle 2,  $\Delta H_{net,2}$  est négatif, c'est à dire que les fluides chauds apportent plus d'énergie que les fluides froids en ont besoin. Donc cet excédent d'énergie peut être utilisé pour chauffer un fluide froid dans l'intervalle 3.

Les excédents et les déficits d'énergie se transmettent d'un intervalle à l'autre pour former une cascade d'énergie. On obtient alors le tableau suivant :

Intervalle	$T_i$ [°C]	$\Delta H_{net,i}$ [kW]	cascade
	165		0
1		-60	
	145		60
2		-2,5	
	140		62,5
3		82,5	
	85		-20
4		-75	
	55		55
5		15	
	25		40

**Tableau 3.4** : Cascade d'énergie

D'après le **tableau 3.4**, il y a un déficit entre les intervalles 3 et 4, il doit être compensé par un appoint de 20 kW. En ajoutant les 20 kW manquants au début de la cascade on a le tableau ci-dessous :

Intervalle	$T_i$ [°C]	$\Delta H_{net,i}$ [kW]	cascade
	165		20
1		-60	
	145		80
2		-2,5	
	140		82,5
3		82,5	
	85		0
4		-75	
	55		75
5		15	
	25		60

**Tableau 3.5**

Le tableau montre que le flux d'énergie entre les intervalles 3 et 4 est nul. C'est le pincement du système. Il se situe à la température de 85 °C soit 90 °C pour les fluides chauds et 80° C pour les fluides froids si on tient compte de  $\Delta T_{pinc} = 10K$ .

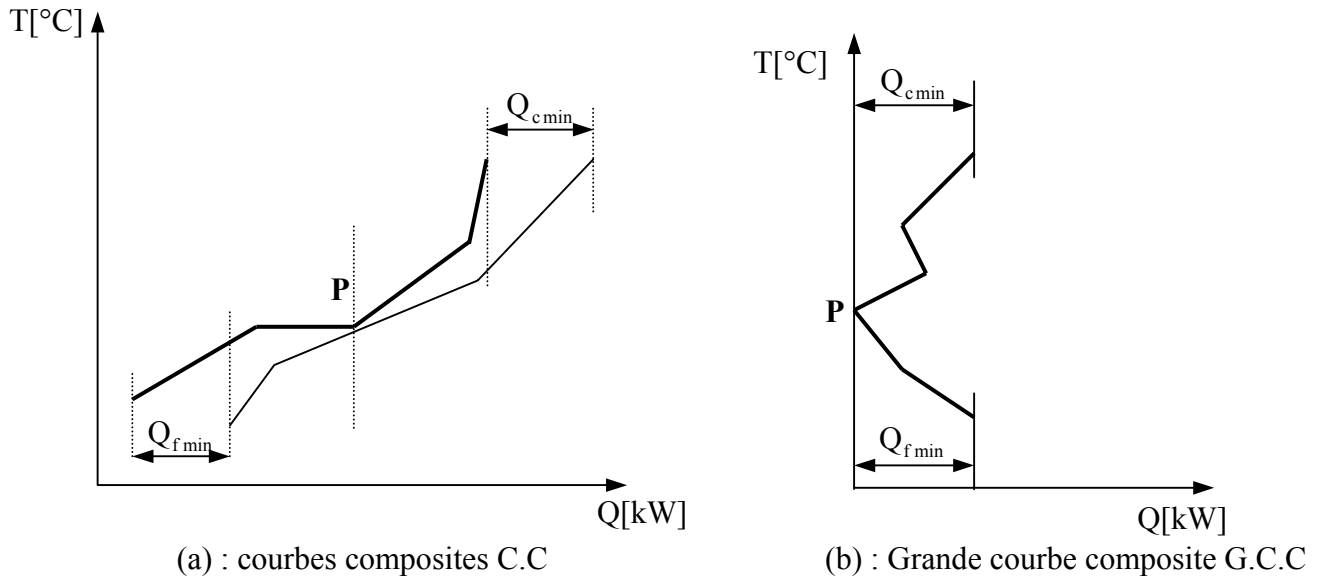
Le besoin minimum d'utilité chaude est égal à  $Q_{cmin} = 20kW$  et le besoin minimum d'utilité froide est égal à  $Q_{fmin} = 60kW$ .

En résumé, la méthode que nous avons élaborée permet facilement d'identifier l'endroit où se trouve le pincement du système, et de déterminer les besoins minimums d'énergie à fournir par les utilités.



### 3.6 Grande courbe composite

Elle représente la variation des quantités de chaleur échangée dans chaque intervalle de température ainsi que les énergies à fournir par les utilités. De plus, la courbe montre qu'il n'y a aucun flux de chaleur qui passe à travers le pincement. Sur la **figure 3.5 (b)**, le pincement correspond à l'intersection de la grande courbe composite avec l'axe des ordonnées T. Elle est construite directement à partir de l'algorithme de Linnhoff.

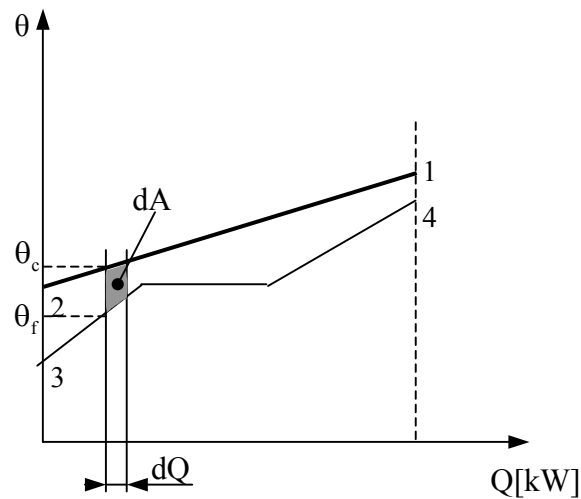


**Figure 3.5** : Diagramme des C.C et G.C.C en températures décalées

### 3.7 Courbes composites exergetique

Les courbes composites exergetiques sont tracées de même manière que les courbes composites mais en remplaçant la variable température T par la variable facteur de Carnot :  $\theta = 1 - \frac{T_0}{T}$ .

Considérons la **figure 3.6** montrant la variation des facteurs de Carnot  $\theta_c$  pour les fluides chauds (gras) et  $\theta_f$  pour les fluides froids en fonction de la chaleur échangée Q.



**Figure 3.6 :** Diagramme des courbes composites exergetiques

D'après la figure, l'élément de surface peut s'exprimer par la relation suivante :

$$dA = (\theta_c - \theta_f).dQ = \left[ \frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_c} \right].T_0.dQ$$

(3-7)

d'autre part, la variation totale d'entropie est donnée par :

$$dS = \left[ -\frac{1}{T_c} + \frac{1}{T_f} \right].dQ$$

(3-8)

En comparant les équations (3-7) et (3-8) on a :

$$dS.T_0 = dA$$

(3-9)

Cette dernière relation montre que l'élément de surface  $dA$  est proportionnel à la destruction d'exergie au cours du transfert. Donc, l'aire comprise entre les deux courbes composite est proportionnelle aux irréversibilités lors de l'échange thermique.

En résumé cette représentation graphique permet de visualiser directement les irréversibilités au sein du système étudié. Par conséquent, elle indique la zone où nous devrions faire porter nos efforts si nous voulons améliorer le rendement du système.

### 3.8 Règle de base de l'optimisation

La méthode d'intégration thermique permet donc de mettre en évidence les irréversibilités par construction des courbes composites. L'optimisation consiste donc à chercher à minimiser la surface entre ces deux courbes en faisant varier les paramètres clés du système (débit, température et pression) ou en changeant la configuration globale du système.

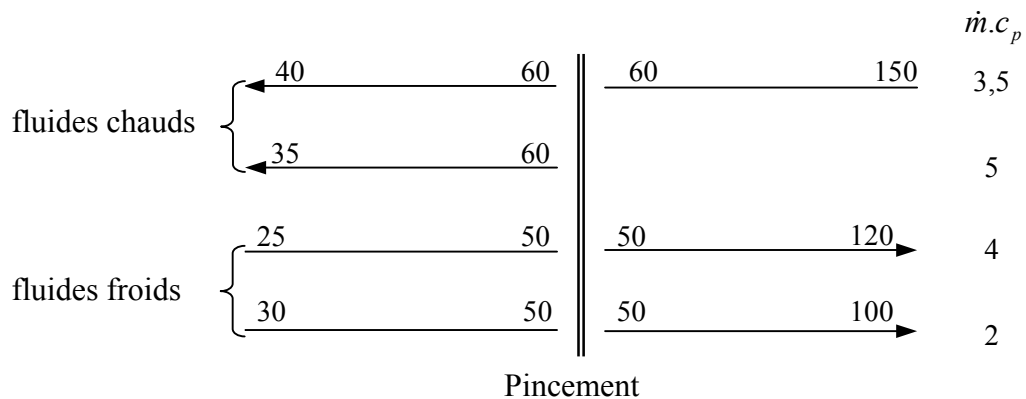
La méthode est dite graphique car elle fournit des informations visuelles permettant au concepteur de repérer facilement les zones où il y a beaucoup d'irréversibilités.

### 3.9 Conception du réseau d'échangeurs

Jusqu'à présent, nous avons utilisé la méthode d'intégration thermique afin de mettre en évidence le pincement et afin de déterminer l'énergie minimale à fournir au système. Une fois le système optimisé, nous allons passer à l'étape de construction des échangeurs.

Cette phase consiste à trouver le réseau d'échangeurs de chaleur qui permet d'atteindre l'objectif de consommation minimale d'énergie.

Pour concevoir le réseau d'échangeurs de chaleur qui correspond à la configuration où l'énergie est minimale, on utilise une grille sur laquelle on représente les fluides (*figure 3.7*). Pour illustrer cela, nous allons prendre le cas du génie des procédés présenté sur la figure ci-dessous :



**Figure 3.7 :** Représentation des fluides du réseau d'échangeurs de chaleur

Les fluides sont symbolisés par des lignes horizontales. Les fluides froids sont orientés de la gauche vers la droite et les fluides chauds de la droite vers la gauche. A l'extrémité droite de la figure ( $\dot{m}.c_p$ ) représente le débit calorifique de chaque fluide. Le pincement sépare le système en deux zones indépendantes.

Il faut ici rappeler les règles de base à respecter pour minimiser l'appoint à fournir au système, qui sont légèrement différentes pour un procédé que celles utilisées pour les systèmes énergétiques :

- Ne pas transférer de la chaleur à travers le pincement.
- Ne pas utiliser d'utilité chaude pour réchauffer un fluide froid au-dessous du pincement.
- Ne pas utiliser d'utilité froide pour refroidir un fluide chaud au-dessus du pincement.

Nous allons maintenant créer le réseau d'échangeurs de chaleur. Comme le pincement divise le système en deux zones, les échangeurs de chaleur au-dessus du pincement et au-dessous du pincement doivent être créés séparément. Par ailleurs, il faut commencer la construction au niveau du pincement, et s'en écarter progressivement, ce qui permet de reconnaître les fluides importants dans la zone la plus contrainte du problème.

La *figure 3.7* montre deux fluides chauds et deux fluides froids au-dessous du pincement

mais il y a qu'un seul fluide chaud et deux fluides froids au-dessus du pincement.

La seconde règle implique qu'au niveau de l'intervalle situé juste au-dessus du pincement, tous les fluides chauds doivent être refroidis par les fluides froids sans aucune utilité froide. Afin de respecter cette règle, le nombre de fluides froids doit être supérieur ou égal au nombre de fluides chauds pour créer les échangeurs de chaleur.

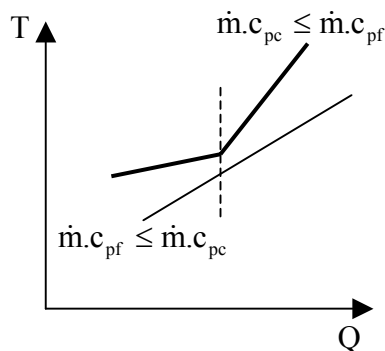
De même pour la troisième règle, au-dessous du pincement, tous les fluides froids doivent être chauffés par les fluides chauds sans aucune utilité chaude. C'est-à-dire que le nombre de fluides chauds doit être supérieur ou égal au nombre de fluides froids, (**figure 3.8** (a)). Les échangeurs de chaleur sont représentés par des lignes verticales reliant deux cercles qui forment le couple de fluides appariés (**figure 3.8**).

Dans le cas de la **figure 3.8** (b) ces règles ne sont pas respectées (nombre de fluides chauds < nombre de fluides froids), dans ce cas il faudra partager le fluide chaud en deux veines parallèles.



(a) **Figure 3.8** : Appariement des échangeurs au niveau du pincement (b)

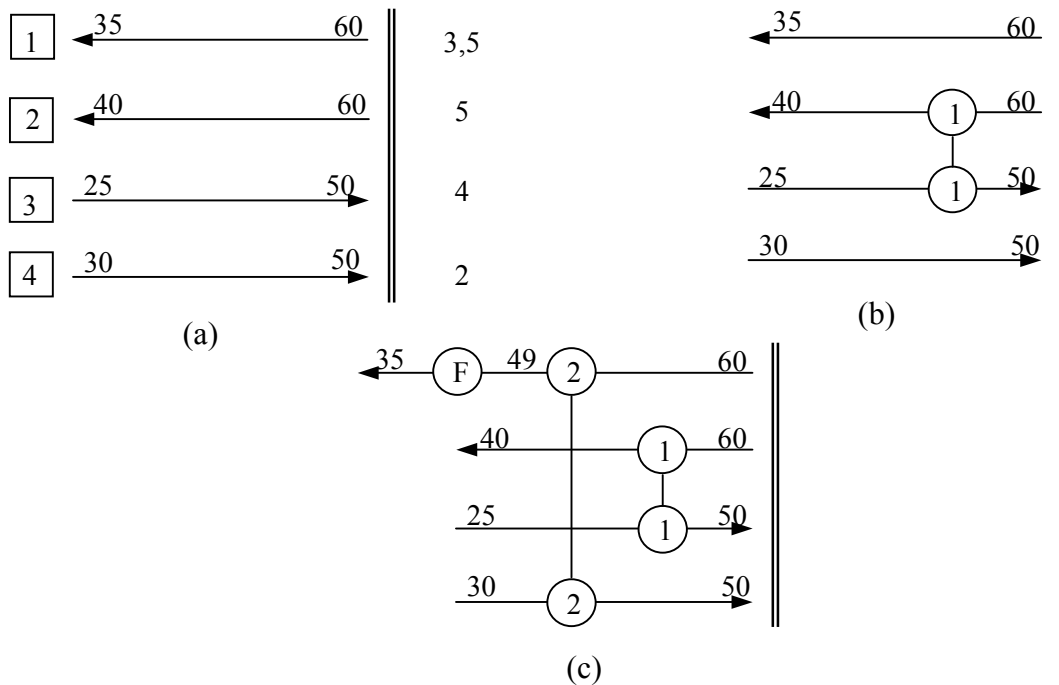
Par ailleurs, la figure ci-dessous montre que pour optimiser le couplage des fluides dans le cas d'un système énergétique il faut que la condition  $\dot{m}.c_{pc} \leq \dot{m}.c_{pf}$  au-dessus du pincement (respectivement  $\dot{m}.c_{pf} \leq \dot{m}.c_{pc}$  au-dessous du pincement), qui est aussi vraie en général pour le cas de l'optimisation d'un procédé, soit vérifiée échangeur par échangeur c'est-à-dire par couple de fluides qui sont appariés.



**Figure 3.9**

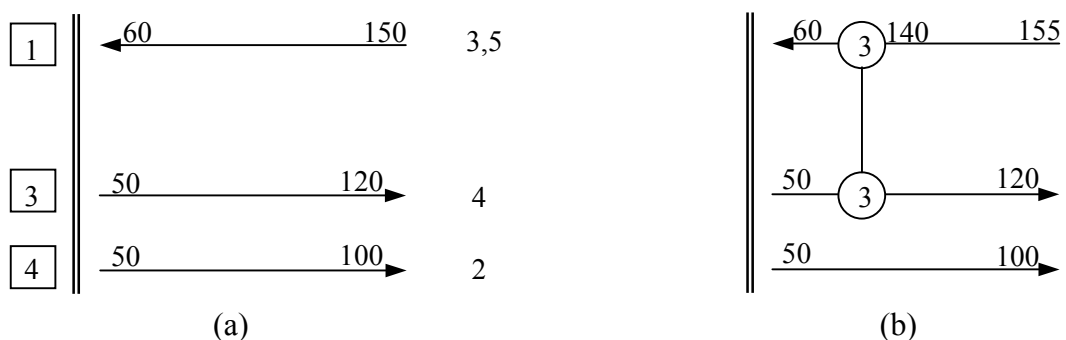
Reprenons l'exemple de la **figure 3.7**, les fluides qui se trouvent au-dessous du pincement sont représentés par la **figure 3.10** (a). D'après cette figure, pour respecter les règles sur les débits calorifiques, les fluides 2 et 3 doivent être appariés, cela crée l'échangeur 1 (**figure 3.10** (b)). De même, ces règles sont toujours vérifiées quand on apparie les fluides 1 et 4,

donc on peut créer l'échangeur 2. La **figure 3.10** (c) montre la structure du réseau d'échangeurs au-dessous du pincement. On remarque que le fluide 4 n'a pas pu épuiser toute la chaleur disponible dans le fluide 1, donc cet excédent de chaleur doit être évacué par une utilité froide. Les utilités sont représentées par cercle avec un « F » si elles sont froides et « C » si elles sont chaudes.



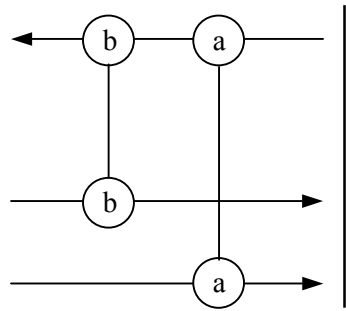
**Figure 3.10** : Construction du réseau d'échangeurs au-dessous du pincement

La **figure 3.11** (a) montre les fluides au-dessus du pincement. Il n'y a qu'un seul fluide chaud et deux fluides froids. Comme le débit calorifique du fluide 1 est plus grand que le débit calorifique du fluide 4, seul les fluides 1 et 3 respectent la contrainte sur les débits  $\dot{m}.c_{pc} \leq \dot{m}.c_{pf}$ . On doit créer l'échangeur 3 (**figure 3.11** (b)).



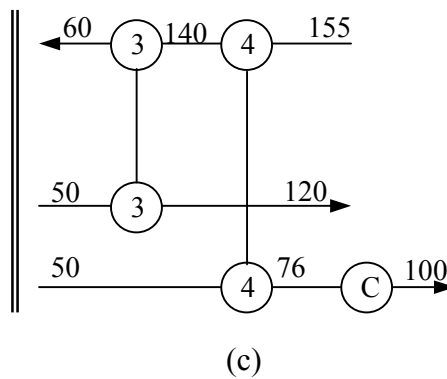
**Figure 3.11** : Début de la construction du réseau d'échangeurs

Les règles sur les débits calorifiques ne concernent que pour les échangeurs « pincés », c'est à dire que l'une de ces extrémités a une différence de température égale à  $\Delta T_{pinc}$ . Prenons par exemple le cas de la figure ci-dessous, l'échangeur (a) est un échangeur « pincé » mais l'échangeur (b) ne l'est pas.



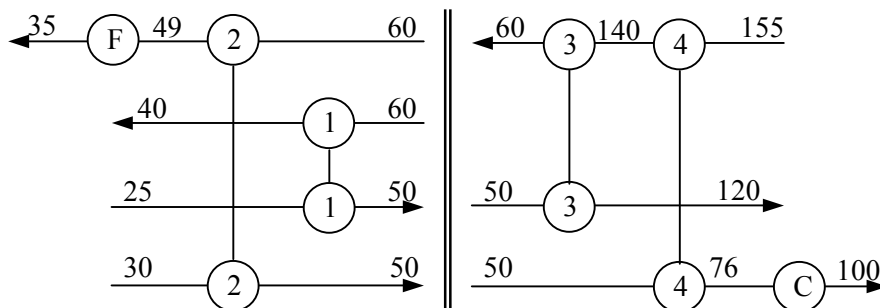
**Figure 3.12**

Dans notre exemple, pour épuiser toute la chaleur disponible dans le fluide 1, l'échangeur 4 peut être créé même si celui-ci ne respecte pas les règles sur les débits comme représenté sur la **figure 3.11 (c)**.



**Figure 3.11** : Fin de la construction du réseau d'échangeurs au-dessus du pincement

La structure complète du réseau d'échangeur est représentée par la figure ci-dessous.



**Figure 3.13** : Structure du réseau d'échangeurs

### 3.10 Conclusion

Pour conclure, la méthode d'optimisation que nous avons présentée est une méthode efficace si l'on veut optimiser un système thermodynamique dans le but de réduire la consommation d'énergie. Cette étape d'optimisation est faite sans connaître à priori la

configuration du réseau d'échangeurs de chaleur. Elle est basée sur des règles simples à exprimer à l'aide des courbes composites.

La méthode propose une représentation graphique qui permet de visualiser directement les irréversibilités du système étudié. Elle ne donne pas la solution optimale automatiquement mais elle guide le concepteur pour identifier les zones où à améliorer de manière à réduire les irréversibilités.

Après avoir optimiser le système, l'intégration thermique permet également de construire le réseau d'échangeurs de chaleur, et donc de trouver la solution pratique qui réalise le point optimal obtenu.

Dans la suite de notre travail, nous allons appliquer cette méthode à un système de récupération de la chaleur à la sortie des gaz d'échappement d'une turbine à gaz pour alimenter un cycle vapeur. Comme outil d'optimisation, nous utiliserons bien sûr la méthode du pincement en la mettant en œuvre avec THERMOPTIM.

## **4 Application de la méthode avec THERMOPTIM**

### **4.1 Démarches à suivre**

L'application de la méthode d'optimisation sur THERMOPTIM peut être divisée en deux grandes étapes :

- 1- Décrire le système sans faire d'hypothèse a priori sur les appariements entre échangeurs, et réduire les consommations d'énergie pour avoir la meilleure performance.

Procédure :

- Faire varier par simulation les paramètres clés du système (débit, température, niveau de pression) afin d'améliorer le rendement.
- Vérifier par la méthode du pincement que l'on n'introduit pas de besoins additionnels de chaleur à haute température et que l'on minimise le rejet à basse température.
- Les outils graphiques comme les courbes composites, les courbes composites exergétiques et la courbe des facteurs de Carnot (CEFC) permettent de visualiser la position du pincement ainsi que les irréversibilités qui existent au sein du système.

- 2- Une fois le système optimisé, établir la configuration du réseau d'échangeurs pour l'appariement des fluides présents dans le système.

Procédure :

- Effectuer l'appariement des fluides en partant des zones les plus contraintes : le pincement et respecter les règles sur
- Continuer l'étude au reste du système en s'écartant du pincement.

## 4.2 Ecran d'optimisation

THERMOPTIM propose les outils nécessaires à l'optimisation qui sont accessibles à partir du simulateur dans le menu « spécial / outils d'optimisation » *figure 4.1*. Il comprend quatre tables principales :

- Table des fluides : elle renferme tous les fluides mis en jeu dans les transfos du type échange dans lesquelles l'option « fluide de méthode de pincement » est sélectionnée.
- Table des intervalles : elle contient la liste des intervalles établis par la méthode.
- Table des blocs d'échange : elle montre les blocs d'échanges qui sont définis pour aider à appairer les fluides dans les échangeurs de chaleurs.
- Table des types observés : si on a coché « observé » dans l'écran de points ou de transfos, on pourrait les afficher dans cette table.

*Figure 4.1* : Ecran d'optimisation

Nous allons maintenant appliquer la méthode d'intégration systémique sur un exemple de système thermique en utilisant les outils d'optimisation de THERMOPTIM.



### 4.3 Description du problème

#### 4.3.1 Générateurs de vapeur

Les générateurs de vapeur désignent les appareils fonctionnant sans combustion, c'est à dire des appareils où la chaleur n'est pas fournie par une combustion.

Parmi eux nous nous intéressons ici particulièrement aux appareils destinés à récupérer de chaleur sur des effluents thermiques. C'est ce que nous appellerons générateur de vapeur récupérateur (GVR) ou chaudière de récupération. Un GVR remplit trois fonctions :

- Chauffer l'eau à la température de vaporisation à la pression correspondante
- Vaporiser l'eau
- Surchauffer l'eau

Plus précisément, le problème que nous souhaitons résoudre est défini comme suit.

100 Kg/s de gaz d'échappement sortent à 500 °C d'une turbine à gaz. Leur composition est la suivante :

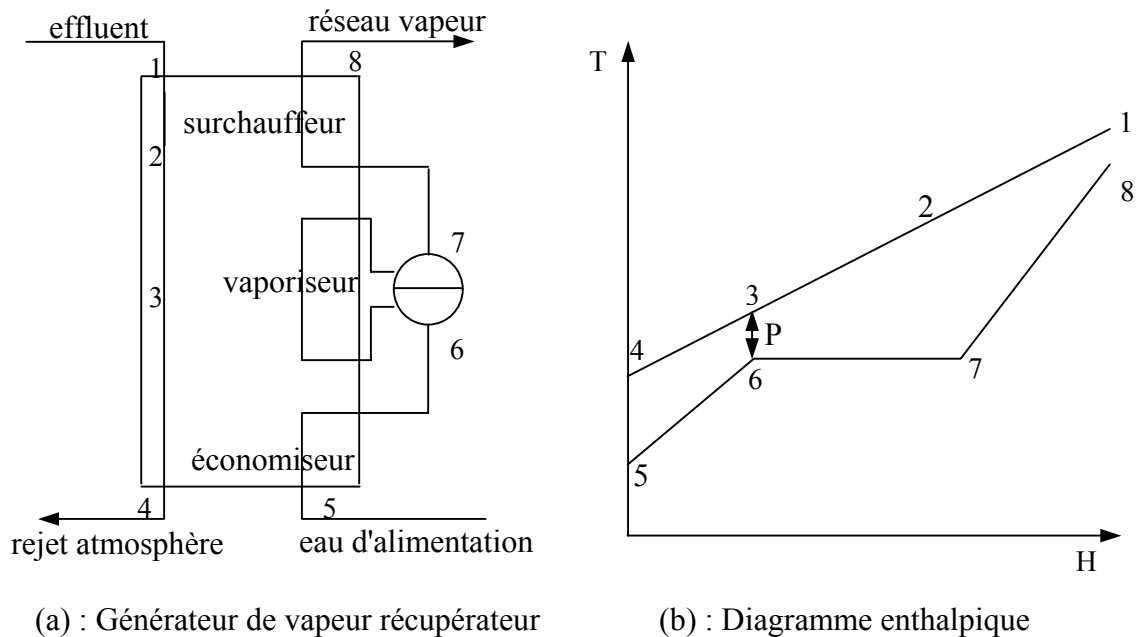
Nom du composant	Fraction molaire	Fraction massique
CO <sub>2</sub>	0,041	0,065
H <sub>2</sub> O	0,155	0,101
O <sub>2</sub>	0,106	0,123
N <sub>2</sub>	0,699	0,711

*Tableau 4.1*

On désire concevoir un GVR capable d'alimenter un cycle à vapeur avec une ou deux turbine(s) de rendement isentropique égal à 0,8. La pression de condensation est de 0,03 bar et la température de saturation est alors 24,1 °C. On examinera des GVR à un et deux niveaux de pression. La température maximale du cycle est inférieure de 50 K à celle des gaz d'échappement, et nous considérons que la technologie limite la pression maximale d'entrée de la turbine à 100 bars.

Les rendements isentropiques des pompes sont de 0,95, et la température de surchauffe du cycle à basse pression est fixée à 275 °C. On n'étudiera qu'un cycle de Rankine simple. La température minimale de rejet des gaz est de 75 °C.

La figure ci-dessous montre le schéma de fonctionnement et le diagramme enthalpique d'un GVR :



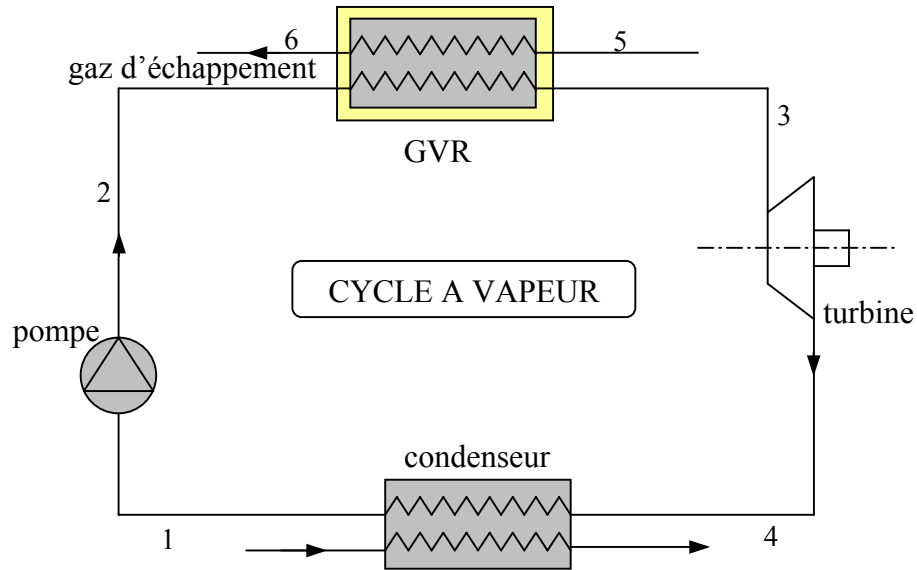
**Figure 4.2** : Schéma de fonctionnement d'un GVR

D'après le diagramme, le point P est le point où l'écart de température entre les deux fluides est le plus petit, appelé pincement. Dans le cas d'un GVR, le dimensionnement des échangeurs dépend de la valeur de ce pincement.

#### 4.4 Etude d'un GVR à un niveau de pression

Dans le cas d'une récupération d'énergie sur des effluents, l'efficacité de la récupération dépend à la fois du niveau de température des gaz d'échappement et du niveau de pression du cycle à vapeur.

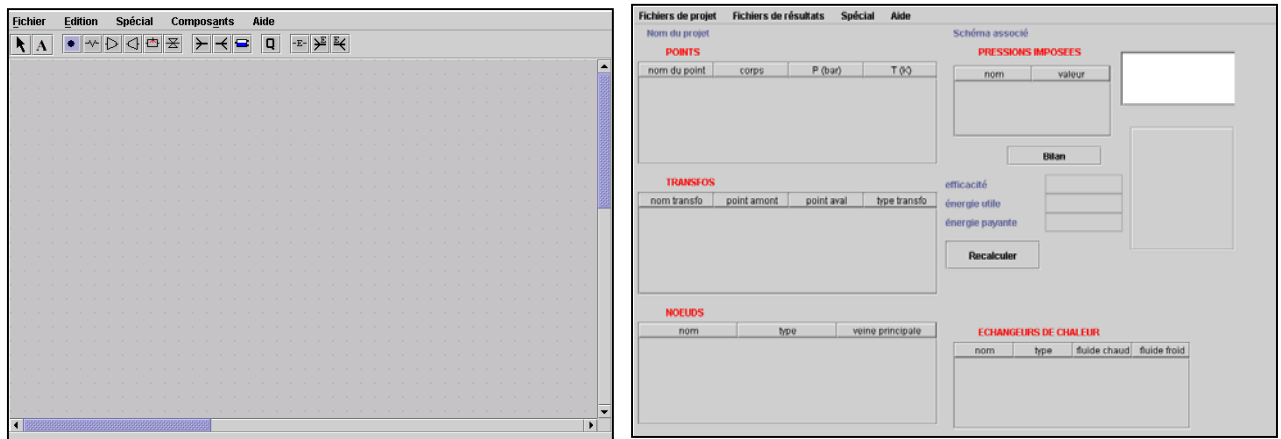
Le schéma du cycle est le suivant :



**Figure 4.3** : Schéma d'un cycle combiné à un niveau de pression

#### 4.5 Utilisation de THERMOPTIM

Quand on lance THERMOPTIM, deux écrans s'ouvrent au démarrage : l'éditeur de schéma et le simulateur (**figure 4.4**).



(a) : Écran de l'éditeur de schéma

**Figure 4.4**

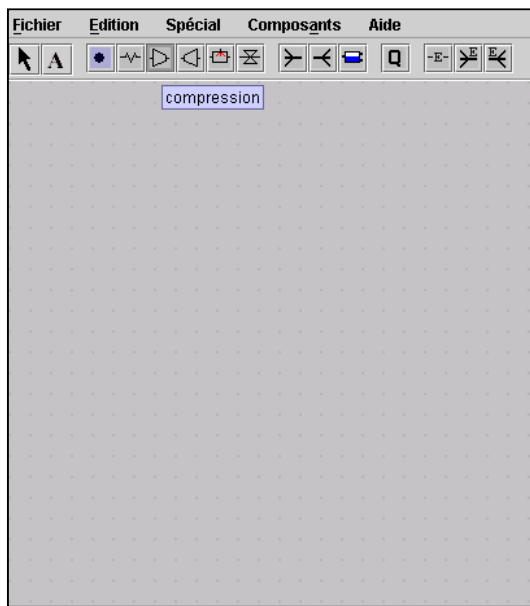
(b) : Écran du simulateur

**L'éditeur de schéma** permet de tracer le cycle thermodynamique qu'on veut étudier. Le haut de l'écran comporte une palette présentant les différents composants : échangeur de chaleur, compresseur, organe de détente, chambre de combustion, mélangeur, diviseur.

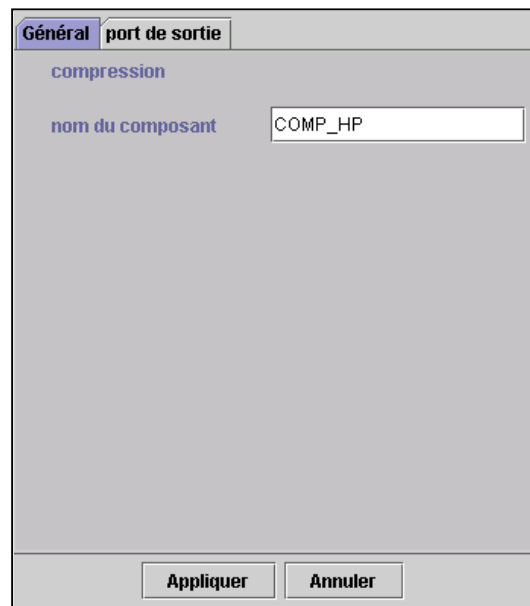
**Le simulateur** permet de paramétrer et de résoudre le modèle créé dans l'éditeur de schéma. Il existe donc une interconnexion entre l'éditeur de schéma et le simulateur.

### 4.5.1 Création du modèle

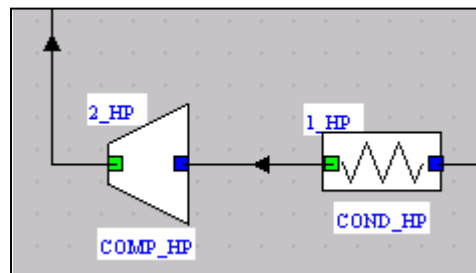
Pour créer un modèle dans l'éditeur de schéma, il suffit de cliquer sur l'un des composants qui se trouve en haut de l'écran par exemple « composant compression » pour un compresseur (*figure 4.5a*). Pour cela, THERMOPTIM demande de définir le nom du composant sélectionné, le nom du point de sortie et du corps ainsi que la valeur débit qui traverse le composant (*figure 4.5b*). Après avoir construit tous les composants du système, on les connecte à partir des liens vectoriels représentant la canalisation des fluides (*figure 4.5c*). Automatiquement, certaines informations sont transmises de l'amont vers l'aval.



(a)



(b)



(c)

### 4.5.2 Paramétrage du modèle

Figure 4.5

Une fois le modèle créé, il faut transférer dans le simulateur les composants du schéma en utilisant l'interface Schéma/Simulateur dans le menu spécial de l'éditeur. Le simulateur crée les types primitifs (points, transfos, nœuds, échangeurs de chaleur) avec un paramétrage par défaut de leurs propriétés thermodynamiques. C'est à partir de ces types primitifs qu'on peut paramétrer chaque élément du simulateur. On peut modifier les valeurs par défaut en fonction des données du problème en double-cliquant, soit sur le composant de l'éditeur de schéma, soit sur la ligne d'une table du simulateur.

## 4.6 Construction d'un GVR à un niveau de pression dans THERMOPTIM

La construction du cycle à vapeur et la ligne gaz se fait comme suit :

En suivant les instructions qui ont été dites auparavant il sera plus simple de construire le cycle à vapeur dans l'éditeur de schéma.

Pour créer le compresseur, choisissez le composant « compression » ensuite cliquez sur le plan de travail à l'endroit où vous voulez mettre ce composant, un écran s'affiche. Entrez le nom du composant COMP\_HP par exemple, puis cliquez sur « port de sortie », marquez 2\_HP pour le nom du point, après double cliquez sur la case de nom du corps et sélectionnez eau dans les vapeurs condensables. Enfin entrez une valeur de débit puis cliquez sur « appliquer ».

En faisant de la même manière pour les autres composants du système vous arriverez à créer le modèle du cycle à vapeur. Ensuite connectez les différents composants à partir des liens vectoriels. Pour cela, il faut cliquer sur le petit carré vert du compresseur, maintenir la souris appuyée et la glisser sur le petit carré bleu de l'économiseur, puis relâcher. Un lien vectoriel est créé. On effectue de la sorte pour la connexion des autres composants et on obtient la figure ci-dessous. Comme par défaut les composants sont orientés de gauche à droite, il se peut que les liens se croisent, dans ce cas sélectionnez un composant puis cliquez sur le menu « édition » et choisissez « miroir vertical » ou vous pouvez taper directement sur F1, le composant est retourné. Enfin insérez un commentaire en sélectionnant « A » sur la palette de l'éditeur.

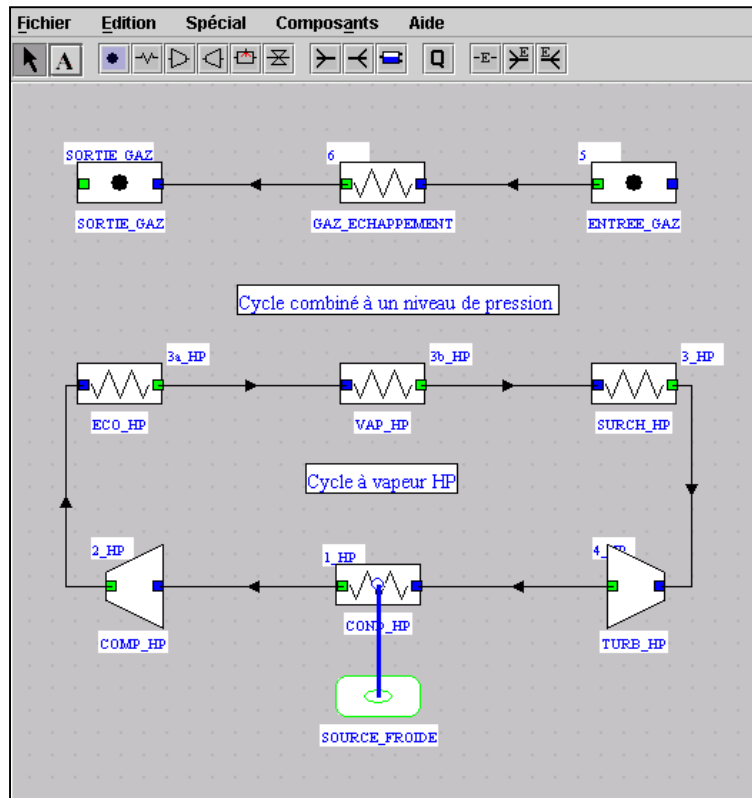
Pour créer la ligne de gaz d'échappement, il suffit de sélectionner le composant échange et deux transfos points puis entrer les informations requises.

Maintenant vous pouvez enregistrer le schéma créé en lui donnant un nom par exemple « optim1NP.dia »

### Remarque

Le débit ne doit être entré qu'une fois. C'est à dire, après avoir créé le composant, on ne peut pas changer la valeur du débit. Par contre, pour afficher les propriétés du composant, il faut sélectionner celui-ci, puis cliquer sur le menu « édition » et sélectionner « afficher les propriétés » ou appuyer directement sur la touche F4.

Finalement vous obtenez le schéma suivant :



**Figure 4.6** : Schéma du cycle combiné à un niveau de pression

A partir du menu « spécial », ouvrez l'« interface Schéma / Simulateur » et cliquez sur « mettre à jour la table des éléments ». A gauche de l'écran montre les éléments construits dans l'éditeur avec une croix. Ensuite cliquez sur « mettre à jour le simulateur à partir du schéma » (**figure 4.7**) et entrez un nom pour le projet. Ainsi, vous obtenez automatiquement 8 points et 6 transfos dans le simulateur (**figure 4.8**).

composant	type	simulateur	Schéma	sélectionné
COMP_HP	compression		X	<input checked="" type="checkbox"/>
ECO_HP	échange		X	<input checked="" type="checkbox"/>
VAP_HP	échange		X	<input checked="" type="checkbox"/>
SURCH_HP	échange		X	<input checked="" type="checkbox"/>
TURB_HP	détente		X	<input checked="" type="checkbox"/>
COND_HP	échange		X	<input checked="" type="checkbox"/>
ENTREE_G...	transfo-point		X	<input checked="" type="checkbox"/>
GAZ_ECHA...	échange		X	<input checked="" type="checkbox"/>
SORTIE_GAZ	transfo-point		X	<input checked="" type="checkbox"/>
SOURCE_F...	source exte...		X	<input checked="" type="checkbox"/>

Exporter    Quitter

Désélectionner tous les éléments

Mettre à jour la table des éléments

Mettre à jour le schéma à partir du simulateur

Mettre à jour le simulateur à partir du schéma

Localiser le composant sélectionné

**Figure 4.7** : Ecran de l'interface simulateur

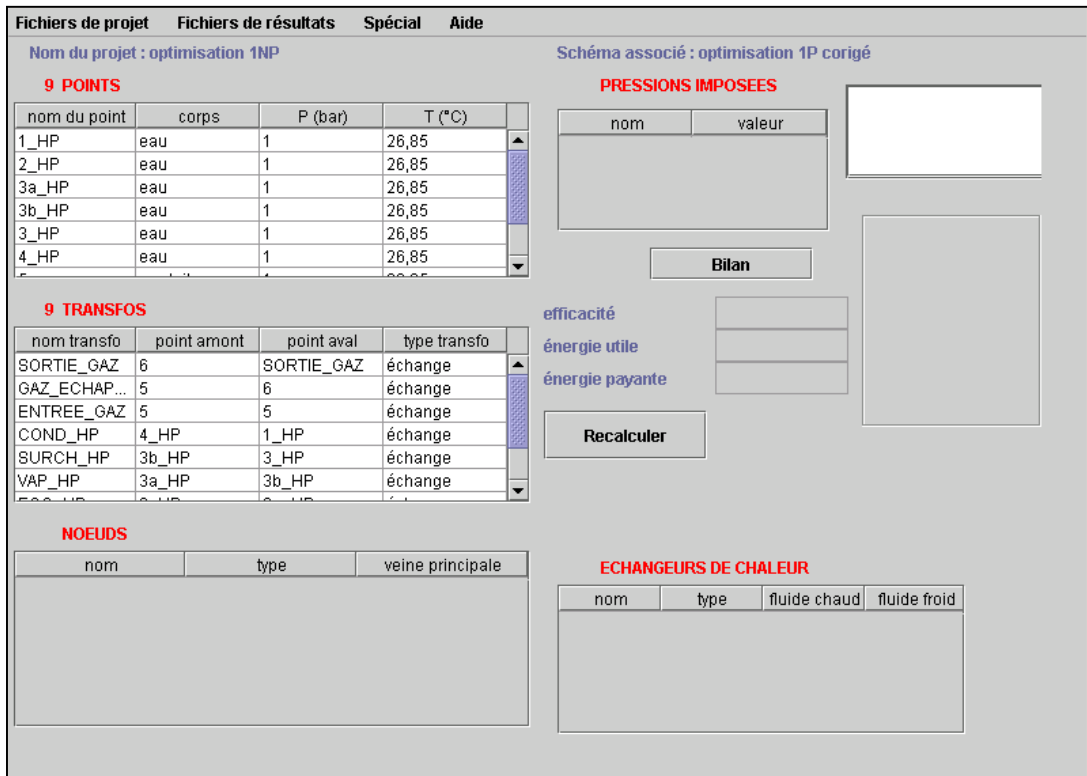


Figure 4.8

Maintenant vous pouvez paramétrer le modèle. Pour paramétrer un point double-cliquez sur le point correspondant de l'éditeur de schéma et entrez au moins deux variables d'état pour définir complètement l'état du fluide en ce point puis cliquez sur calculer (figure 4.9).

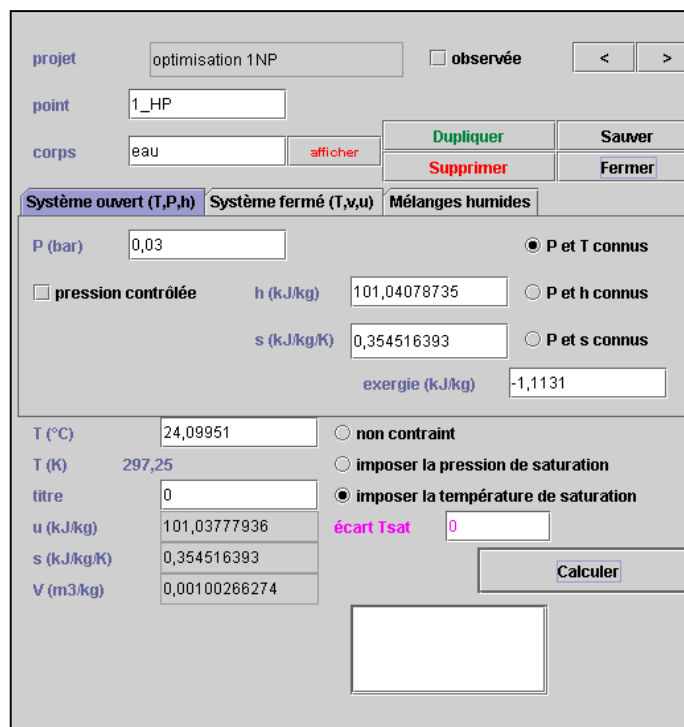


Figure 4.9 : Ecran de calcul des points

Pour paramétrer une transfo double-cliquez sur un composant. Si le point amont et le point aval sont connus vous pouvez directement cliquer sur calculer, la transfo identifie alors les valeurs des paramètres pour que l'évolution choisie conduise bien à l'état du point aval tel qu'il est défini. Dans d'autre cas vous devez entrer les paramètres connus de la transfo et cliquez sur calculer, la transfo calcul l'état du fluide à la fin de l'évolution et met à jour le point aval (*figure 4.10*).

Vous devez opérer de telle manière pour tous les autres points et transformations du système.

The screenshot shows a software interface for calculating transformations. It includes the following elements:

- transfo:** COMP\_HP, type: compression
- type énergie:** utile
- point amont (1\_HP):** T (°C) 24,09951, P (bar) 0,03, h (kJ/kg) 101,04, titre 0
- point aval (2\_HP):** T (°C) 24,25, P (bar) 30, h (kJ/kg) 104,43, titre 0
- Calculated values:** débit 10, m ΔH 33,93, Q 0
- Options:**
  - système fermé / système ouvert (selected)
  - adiabatique / non adiabatique (selected)
  - référence isentropique / référence polytropique (selected)
  - rend. isentropique 0,95
  - exposant polytropique 5 280,13005
  - rapport de pression (>= 1) 1 000
  - calculé / imposé (selected)
- Buttons:** Sauver, Supprimer, Fermer, Afficher, Calculer

**Figure 4.10 :** Ecran de calcul des transfos

Pour pouvoir déterminer les énergies payante et utile ainsi que de calculer l'efficacité énergétique du système, il faut choisir sur chaque composant le type d'énergie que l'on souhaite lui donner. Cette opération se fait en double cliquant dans le champ « type énergie » du composant correspondant. Par exemple, pour la TURB\_HP, vous devez choisir énergie utile comme type d'énergie.

Finalement dans le simulateur, cliquer sur recalculer, THERMOPTIM affiche le bilan global du système (*figure 4.11*).



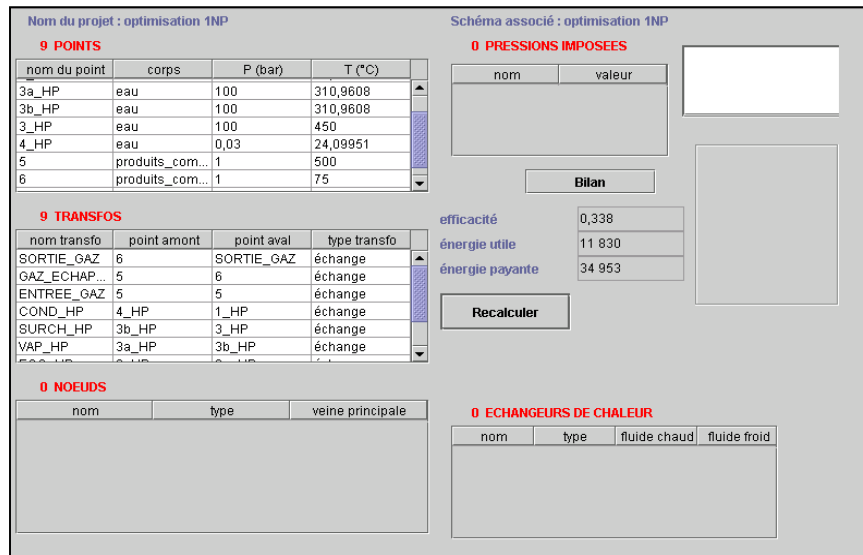
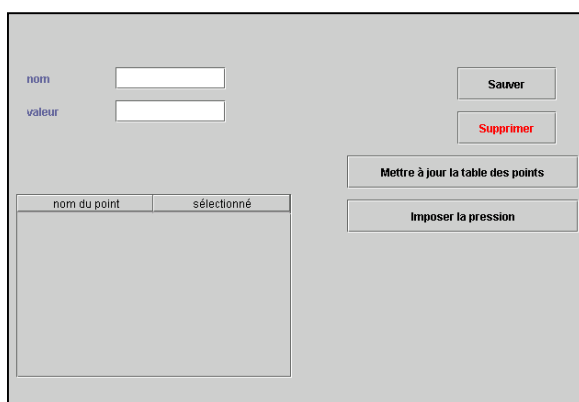


Figure 4.11

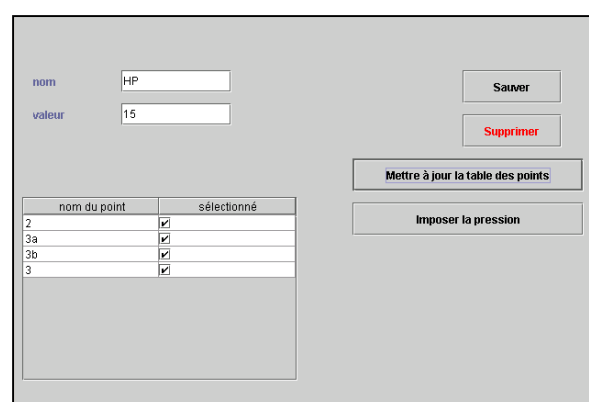
Remarque

Pour les pressions, on peut les paramétrer une par une en entrant à chaque point sa valeur (figure 4.9). Attention, elle ne se propage pas toute seule dans le cycle. Il existe une autre façon plus efficace de procéder, en particulier du fait que seul un nombre restreint de pression est mis en jeu. Pour cela, dans l'écran du simulateur, double cliquez sur la table des pressions imposées, l'écran ci-dessous apparaît (figure 4.12a). Donnez un nom HP et une valeur 15 pour une pression de 15 bar puis sauvez. Afin de pouvoir contrôler la pression, ouvrez le point 2\_HP et cochez l'option « pression contrôlée » puis double-cliquez dans le champ qui se trouve juste en bas et choisissez une pression. Effectuez de la même façon pour les points 3a\_HP, 3b\_HP et 3\_HP. Réouvrir la table des pressions imposées et cliquez sur « mettre à jour la table des points » après cliquez sur « imposer la pression » (figure 4.12b) et sauvez.

Par la suite, en changeant la pression via l'écran de la figure 4.12, on peut changer facilement la valeur de HP pour tous les points du cycle concernés.



(a)



(b)

Figure 4.12 : Ecran des pressions imposées

Pour pouvoir faire varier le débit du cycle à vapeur, simplement ouvrez la transfo COMP\_HP, cochez l'option « débit imposé » et entrez une valeur de débit. Cette valeur se propage automatiquement dans tous les autres transfos du cycle.

#### 4.7 Méthode d'optimisation

Choisissez maintenant les fluides qui doivent être considérés pour l'application de la méthode de pincement. Les fluides sélectionnés sont les fluides chauds ou disponibilités, qui doivent être refroidis, et les fluides froids ou besoins qui doivent être réchauffés. A partir du simulateur, ouvrez l'écran de l'ECO\_HP, sélectionnez l'option « fluide méthode du pincement » et entrez la valeur du « pincement minimum ». Celle-ci dépendra de l'état du fluide, par exemple 8 K dans le cas des liquides, 6 K pour les échanges diphasiques, et 16 K pour les gaz. Puis, ouvrez successivement l'écran du VAP\_HP, SURCH\_HP et du GAZ\_ECHAPPEMENT et faites de même.

Fixez la température de rejet des gaz à 75 °C. Ensuite, imposez la haute pression et choisissez le débit d'eau et cliquez plusieurs fois sur « recalculer » jusqu'à ce que les valeurs du bilan se stabilisent dans le simulateur.

Dans le menu « spécial » du simulateur, cliquez sur « outils d'optimisation » l'écran suivant apparaît :

**Méthode d'optimisation** Graphes

**4 fluides** Exporter

nom	Tinf (°C)	Tsup (°C)
GAZ_ECHAPPEMENT	75	500
SURCH_HP	310,9608	450
VAP_HP	310,9608	311,0608
ECO_HP	24,42133	310,9608

**0 Blocs d'échange** Exporter

nom	type	veine principale
-----	------	------------------

**7 intervalles** Exporter

intervalle n°	Tinf (°C)	Tsup (°C)	Nb de fluid...	m ΔH
1	458	492	1	-3 924
2	318,96	458	2	-10 887,89
3	314,96	318,96	1	-461,85
4	314,06	314,96	2	-63,15
5	313,96	314,06	3	13 189,87
6	67	313,96	2	-17 328,75

Afficher les types observés

nom	type	débit / P (bar)	m ΔH / T (°C)
-----	------	-----------------	---------------

DT LPM: 11  
T utilités chaudes (°C): 726,85  
T utilités froides (°C): 26,85  
T0 exerjge (°C): 15  
besoins totaux: [ ]  
apport de chaleur: 0  
extraction de chaleur: 14 097,015

Itérer Stop  
nombre maximum de recalculs: 30  
valeur de test: 0,01

efficacité: 0,338  
énergie utile: 10 600,4  
énergie payante: 31 319,9  
Fermer

Figure 4.13 : Ecran de la méthode d'optimisation

Cliquez sur méthode d'optimisation et choisissez la ligne de menu « mettre à jour le problème et minimiser l'appoint ».

Les valeurs de l'extraction et l'apport de chaleur apparaissent dans la partie inférieure droite de l'écran (○) *figure 4.13*.

THERMOPTIM cale les deux courbes en les pinçant au maximum. En fonction de la position du pincement, on peut très bien avoir des rejets et besoins complémentaires en même temps.

Ajustez le débit de manière à supprimer les besoins et itérez jusqu'à trouver la valeur maximum de débit ne nécessitant pas d'apport. Comme c'est le pincement qui impose la position des deux courbes, il reste encore des rejets.

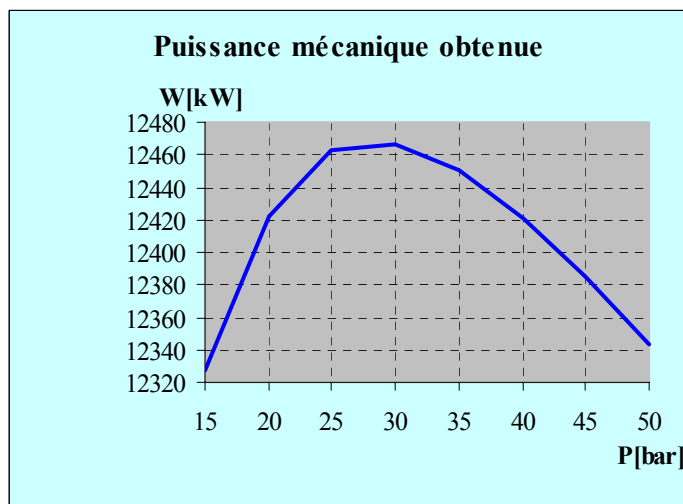
Pour changer le débit, on doit retourner dans le simulateur et ouvrir la transfo COM\_HP et recalculer le système.

Enfin, pour tracer les CEFC, choisissez « tracer les courbes des Facteurs de Carnot » dans le menu graphes.

Répétez les étapes précédentes pour différentes valeurs de pression. Ainsi, on peut représenter dans le tableau suivant la variation de la puissance en fonction de la pression HP.

Pression [bar]	Puissance [kW]
15	12328
20	12422
25	12463
30	12465
35	12453
40	12421
45	12387
50	12340

**Tableau 4.2**



**Figure 4.14**

La figure ci-dessus montre qu'il existe un extremum pour une pression de 30 bar qui correspond à une puissance nette produite du cycle à vapeur de 12465 kW. On obtient une efficacité du cycle égale à 25,41% avec un débit de 12,58 kg/s. Nous appelons efficacité, le rapport entre l'énergie payante et l'énergie utile. Dans notre système, l'énergie payante est en toute rigueur l'énergie libérée dans la chambre de combustion en amont de la turbine à gaz de laquelle sortent les fumées que nous cherchons à exploiter. Ne souhaitant pas modéliser cette partie du système, nous calculons une efficacité de récupération de la chaleur disponible dans la veine de gaz entre 500°C et 75°C, c'est à dire numériquement 49050 kW. L'énergie utile est l'énergie mécanique produite par les turbines vapeur diminuée de l'énergie mécanique des pompes à eau.

Expliquons l'origine de cet optimum :

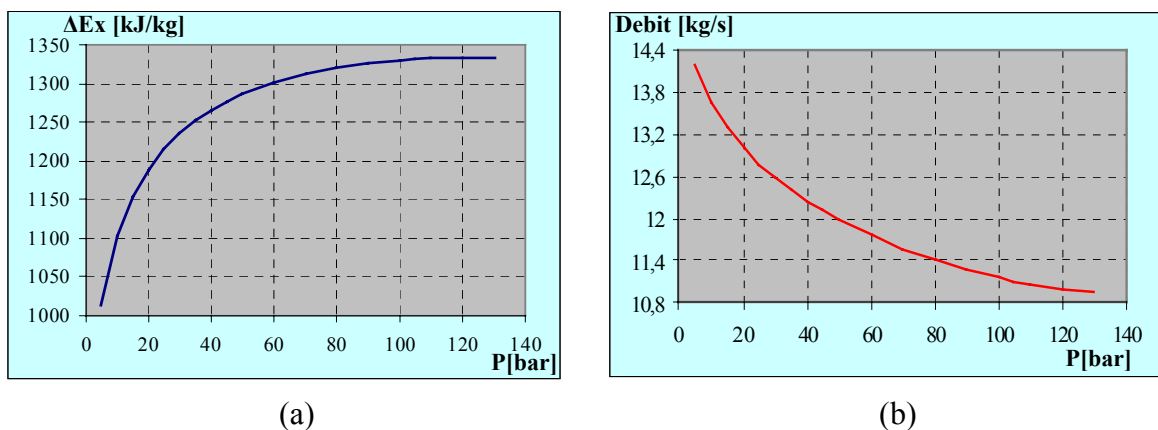
La *figure 4.17* représente les courbes composites pour deux pressions de vapeur HP

différentes. Pour la figure (b) (pression 100 bar) on obtient un débit maximal de 11,1 kg/s. En comparant les deux figures, on voit clairement que la meilleure récupération d'énergie est obtenue pour une pression de 5 bar correspondant à une température de rejet de 100 °C contre 200 °C pour le cycle à pression de 100 bar.

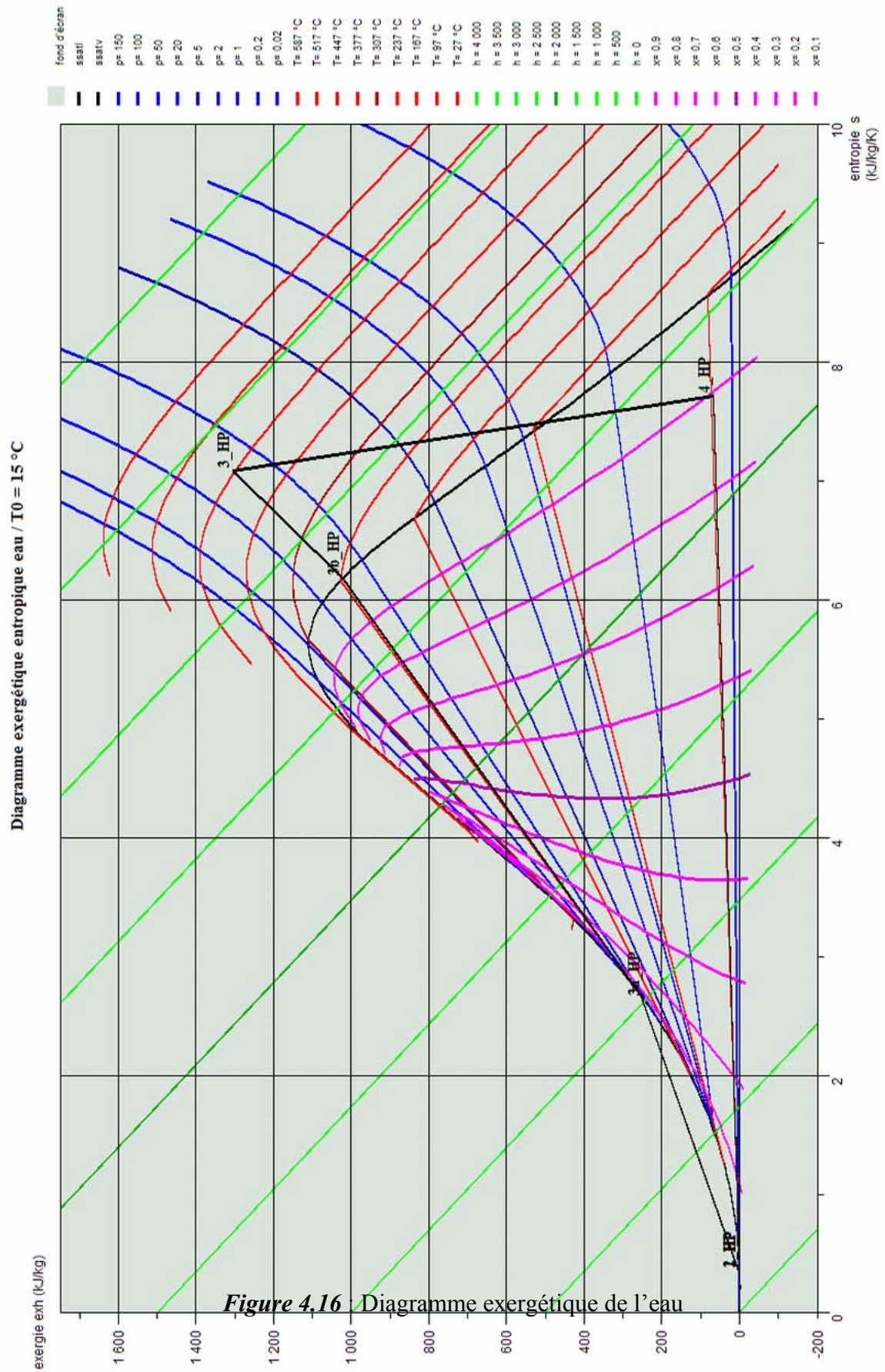
La **figure 4.16** représente le diagramme exergetique-entropique de l'eau tracé par THERMOPTIM. D'après cette figure, l'exergie massique finale après détente dans la turbine est quasiment invariante quelle que soit la pression de départ car l'isobare 0,03 bar est quasiment horizontale. L'exergie massique initiale à 450 °C pour différente valeur de pression, est représentée dans la même figure. Le travail mécanique que l'on récupère à la turbine est égal au débit de vapeur multiplié par la différence entre l'exergie massique initiale et l'exergie massique finale, il varie donc comme l'exergie massique initiale.

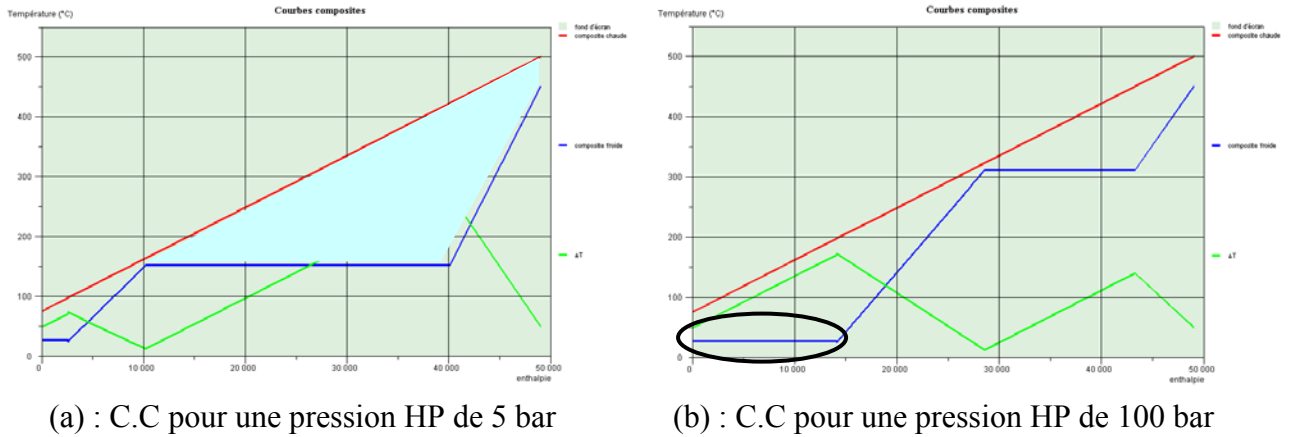
La **figure 4.15** (a) montre la variation de la différence d'exergie au niveau de la turbine lorsque la pression de vapeur HP croît. Le maximum est à la pression de 120 bar. Par contre, la **figure 4.15** (b) représente l'évolution du débit maximal obtenu pour ces valeurs de pressions. En effet, pour une pression de 5 bar, on a un débit maximal de 14,2 kg/s mais l'exergie massique récupérée est faible, donc le rendement obtenu est faible. Bien qu'on obtienne un bon refroidissement de la veine de gaz, le GVR présente beaucoup d'irréversibilités ce qui diminue l'exergie reçue par l'eau, comme le montre la **figure 4.17** (a). Inversement pour une pression de 100 bar, on est au maximum d'exergie massique mais le débit est petit, donc le rendement est aussi faible. L'exergie dans le fluide (eau) est importante c'est pourquoi les courbes composites sont rapprochées. Cependant, la température de rejet est très haute car le débit d'eau est faible.

Il existe entre ces valeurs de pression un optimum où le rendement du cycle est maximal comme le montre la **figure 4.14**.



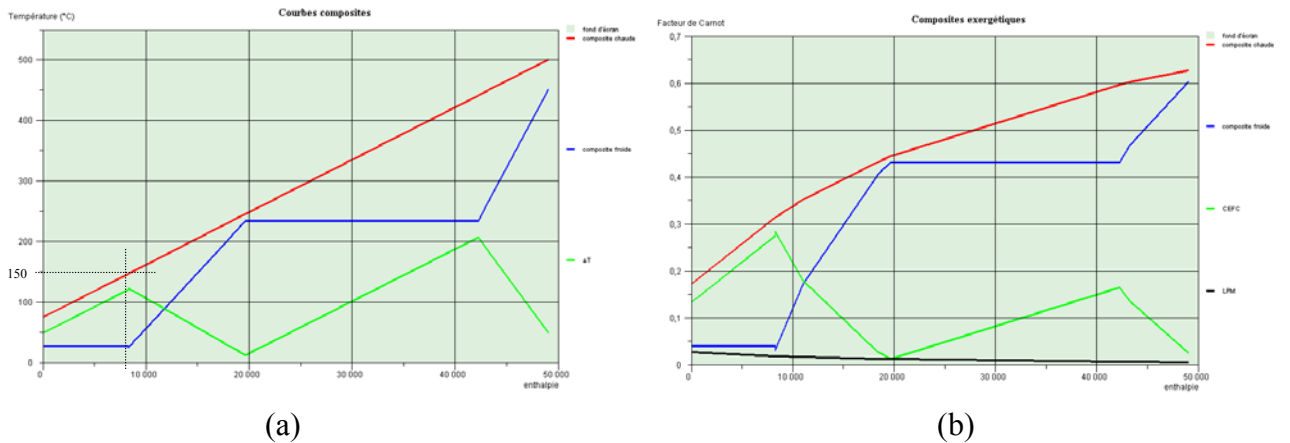
**Figure 4.15**





**Figure 4.17**

Pour cet optimum de puissance, les figures ci-dessous représentent le diagramme des courbes composites obtenu par THERMOPTIM.



**Figure 4.18** : Diagramme des courbes composites pour une pression de 30 bar

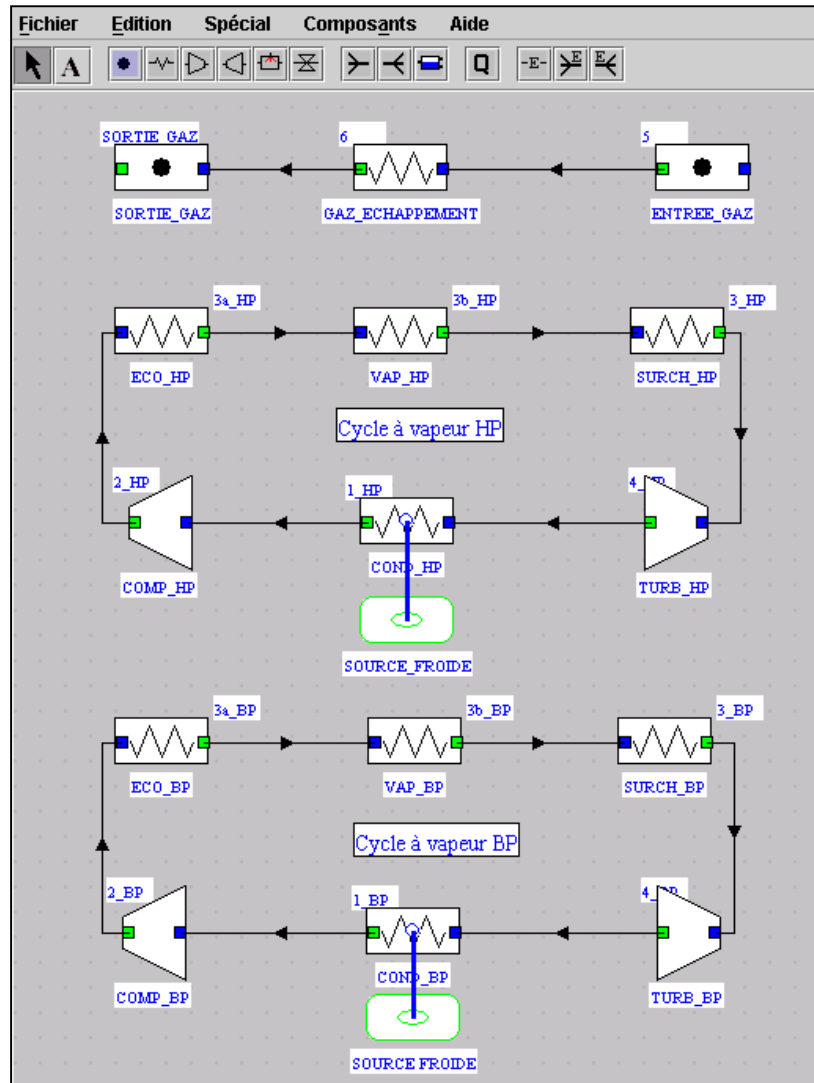
Le diagramme des courbes composites d'un GVR à un niveau de pression obtenu par THERMOPTIM est représenté par dans la **figure 4.18** (a). Elle montre nettement que la récupération d'énergie dans le cas d'un GVR à un niveau de pression ne permet pas de refroidir complètement la veine de gaz chaud : il y a un rejet de chaleur que l'on doit évacuer par un fluide de refroidissement externe ou bien laisser partir dans les fumées en les rejetant vers 150 °C. Ceci vient du fait comme nous l'avons dit plus haut de l'existence du pincement. La figure de droite représente les courbes composites exergetiques. Comme nous l'avons déjà dit, l'aire comprise entre les deux courbes de la **figure 4.18** (b) correspond à l'exergie détruite c'est à dire aux irréversibilités. Dans le cas d'un GVR à un niveau de pression, ces irréversibilités limitent l'efficacité du cycle.

Pour améliorer l'efficacité de la récupération d'énergie, on utilise un GVR à 2 niveaux de pression. Ceci permet non seulement d'augmenter les performances du système mais aussi de refroidir au mieux la température de rejet du gaz d'échappement.



## 4.8 Etude d'un GVR à deux niveaux de pression

Dans le cas du cycle à deux niveaux de pression, on doit ajouter un cycle à basse pression. Pour cela, il faut créer un autre cycle à vapeur dans THERMOPTIM. La construction de ce cycle dans THERMOPTIM se fait comme précédemment. Après avoir créé tous les composants BP on obtient le schéma suivant :



**Figure 4.19** : Schéma du cycle combiné à deux niveaux de pression

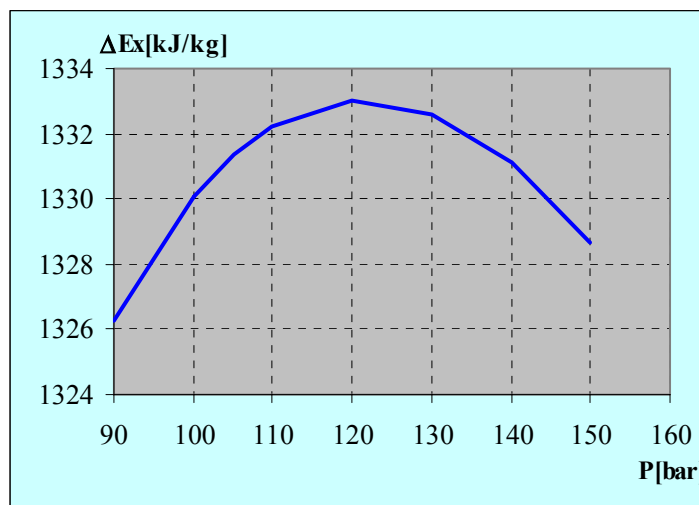
Il est nécessaire de transférer dans le simulateur les nouveaux éléments créés. Dans ce cas utilisez l'interface Schéma / Simulateur pour créer les composants dans le simulateur.

Paramétrez le cycle BP en fonction des données du problème. Pour cela, ouvrez successivement les points, puis les transfos, par exemple vous pouvez commencer par le point 1\_BP, et entrez les valeurs.

Pour contrôler la pression BP, double-cliquez dans la table des « pressions imposées » du simulateur et entrez un nom BP. Ouvrez ensuite les points 2\_BP, 3a\_BP, 3b\_BP et 3\_BP et choisissez BP dans le champ « pression contrôlée ».

Enfin sélectionnez les fluides qui doivent être considérés pour la méthode de pincement dans le circuit BP.

Pour le cycle HP, on choisit la pression 100 bar pour maximiser l'exergie dans la vapeur à 450°C (voir plus haut et **figure 4.16** (a)) puisque nous disposons d'un second cycle BP qui sert à épuiser la chaleur des fumées rejetée par le cycle à un niveau de pression. Si on pouvait monter la pression un peu plus on aurait encore intérêt puisque l'exergie massique de l'eau augmenterait encore, mais comme on est limité par les contraintes technologiques on ne peut pas aller au-delà de 100 bar. Il ne serait pas nécessaire de monter beaucoup plus haut en pression car l'exergie massique diminue à 450°C pour une pression supérieure à 120 bar (**figure 4.20**).



**Figure 4.20**

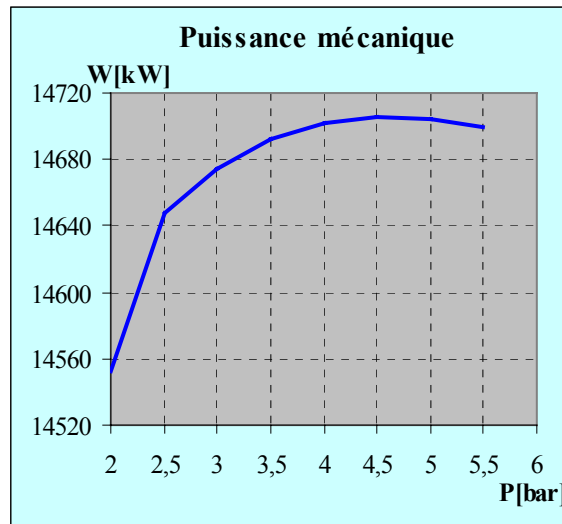
Pour cette valeur pression, cherchez la valeur maximum du débit HP qui ne nécessite pas d'apport de chaleur. Pour ce faire, annulez la valeur du débit dans le cycle BP et ajustez le débit HP. Après quelques itérations, vous allez trouver un débit HP de 11,16 kg/s. Le fait de maximiser le débit HP est proportionnel à maximiser le travail mécanique obtenu au niveau du cycle HP.

Le débit et la pression HP étant déterminés, il ne reste plus qu'à chercher ceux du cycle BP. Pour le cycle BP, la démarche étant la même que précédemment, c'est à dire imposer une pression BP et déterminer la valeur maximum de débit du cycle BP tout en vérifiant par la méthode d'optimisation de THERMOPTIM que l'on n'a pas d'apport de chaleur. Pour différentes valeurs de pression nous obtenons le tableau suivant :



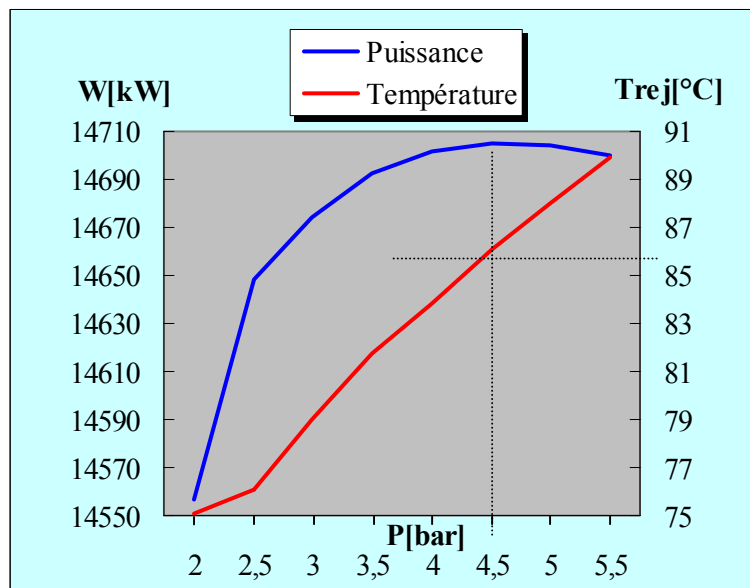
Pression BP [bar]	Puissance [kW]
2	14553
2,5	14648
3	14674
3,5	14692
4	14702
4,5	14705
5	14704
5,5	14700

**Tableau 4.3**



**Figure 4.21**

La **figure 4.21** montre que l'optimum de puissance est obtenu pour une pression BP de 4,5 bar et un débit de 4,423 kg/s. L'efficacité du cycle vaut 30 % pour une puissance utile de 14705 kW.

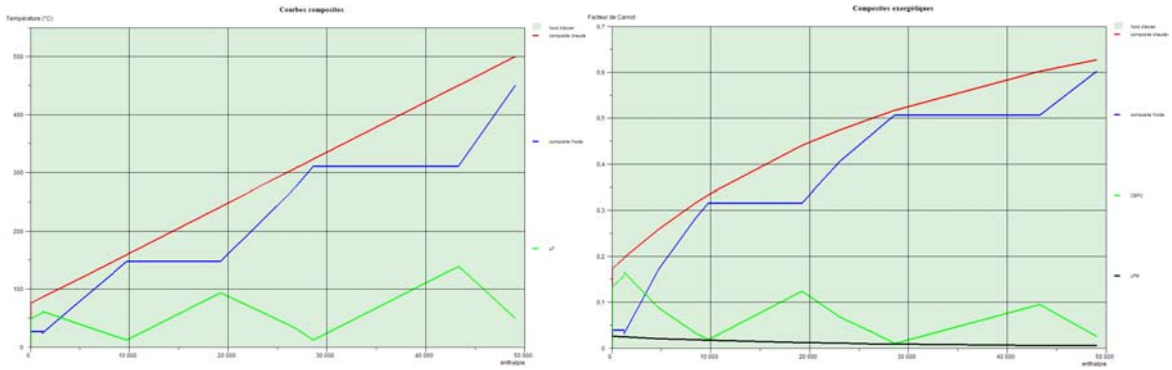


**Figure 4.22**

La **figure 4.22** montre les évolutions de la puissance mécanique d'une part, et de la température de rejet d'autre part pour différentes valeurs de pression BP. Cette température est égale à 86 °C pour l'optimum obtenu, c'est à dire à la pression de 4,5 bar. Elle montre que chercher à refroidir plus les gaz dégraderait le rendement.

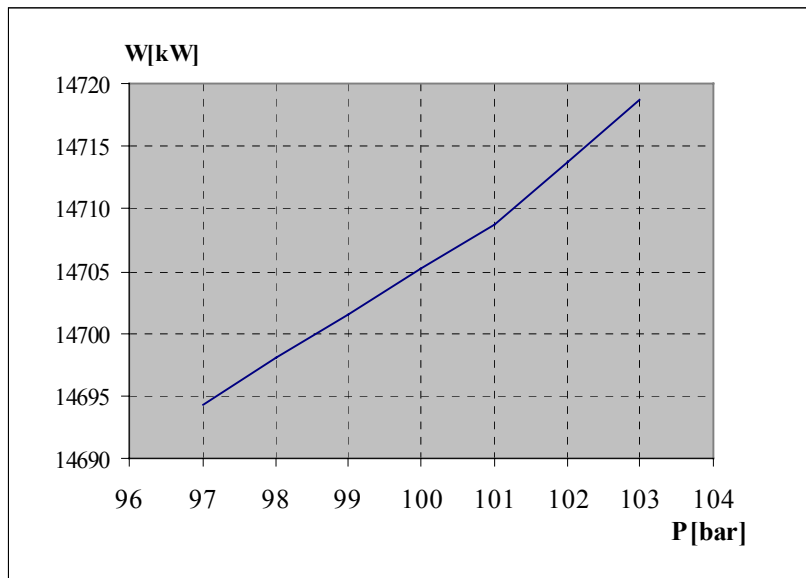
La figure ci-dessous représente les courbes composites et les courbes composites exergetiques. On voit qu'il reste encore un petit rejet de chaleur à cause de l'existence du pincement inférieur.

D'après les figures, il existe deux pincements, l'un à la température de 311 °C et l'autre à la température de 148 °C.



**Figure 4.23** : Diagramme des courbes composites pour une pression BP de 4,5 bar

NB : La figure ci-dessous confirme le raisonnement fait sur la fixation de la pression HP à 100 bar, car elle montre que la puissance nette du cycle à deux niveaux de pression augmente bien avec la pression HP. Pour chaque pression HP étudiée ici, le débit HP est optimisé, ainsi que la pression et le débit BP.



**Figure 4.24**

Après avoir tracé les courbes composites vous pouvez exporter les intervalles de la méthode d'optimisation en cliquant sur « exporter » dans la table des intervalles. Ainsi les intervalles sont exportés automatiquement dans le dossier « pinch » du fichier d'installation de THERMOPTIM. Ouvrez le document « interv » dans « pinch » à partir d'un tableur comme Excel par exemple et vous obtenez le tableau suivant :

ETUDE DETAILLEE DES INTERVALLES						
intervalle n°	1			Tinf=	Tsup=	DH=
fluides sélectionnés	1			723,15	773,15	-5 770,59
nom	mCp	mDH				
GAZ_ECHAPPEMENT	-115,41	-5 770,59				
intervalle n°	2			Tinf=	Tsup=	DH=

fluides sélectionnés	2			584,21	723,15	-10 302,69
nom	mCp	mDH				
GAZ_ECHAPPEMENT	-115,41	-16 035,23				
SURCH_HP	41,26	5 732,54				
intervalle n°	3			Tinf=	Tsup=	DH=
fluides sélectionnés	3			584,11	584,21	14 667,52
nom	mCp	mDH				
GAZ_ECHAPPEMENT	-115,41	-11,54				
SURCH_HP	41,26	4,13				
VAP_HP	146 749,40	14 674,94				
intervalle n°	4			Tinf=	Tsup=	DH=
fluides sélectionnés	2			548,15	584,11	-2 341,07
nom	mCp	mDH				
GAZ_ECHAPPEMENT	-115,41	-4 150,30				
ECO_HP	50,31	1 809,23				
intervalle n°	5			Tinf=	Tsup=	DH=
fluides sélectionnés	3			421,17	548,15	-7 056,37
nom	mCp	mDH				
SURCH_BP	9,53	1 210,30				
GAZ_ECHAPPEMENT	-115,41	-14 655,32				
ECO_HP	50,31	6 388,65				
intervalle n°	6			Tinf=	Tsup=	DH=
fluides sélectionnés	4			421,07	421,17	9 448,39
nom	mCp	mDH				
SURCH_BP	9,53	0,95				
VAP_BP	94 539,42	9 453,94				
GAZ_ECHAPPEMENT	-115,41	-11,54				
ECO_HP	50,31	5,03				
intervalle n°	7			Tinf=	Tsup=	DH=
fluides sélectionnés	3			348,15	421,07	-3 376,63
nom	mCp	mDH				
ECO_BP	18,79	1 370,33				
GAZ_ECHAPPEMENT	-115,41	-8 415,51				
ECO_HP	50,31	3 668,55				
intervalle n°	8			Tinf=	Tsup=	DH=
fluides sélectionnés	2			297,57	348,15	3 495,19
nom	mCp	mDH				
ECO_BP	18,79	950,52				
ECO_HP	50,31	2 544,67				
intervalle n°	9			Tinf=	Tsup=	DH=
fluides sélectionnés	1			297,28	297,57	5,48
nom	mCp	mDH				
ECO_BP	18,79	5,48				

**Tableau 4.4** : Intervalles de températures réelles

Chaque intervalle comprend :

- les débits calorifiques (mCp) et les bilans enthalpiques (mDH) des fluides sélectionnés,
- les bornes de températures inférieure ( $T_{inf}$ ) et supérieure ( $T_{sup}$ ) de l'intervalle,
- le bilan enthalpique net (DH) défini comme étant la somme des disponibilités (mDH négatif) et des besoins enthalpiques de l'intervalle considéré.

Remarque

Dans THERMOPTIM, les intervalles sont créés en températures décalées avant le tracé des courbes composites et en températures réelles après avoir tracé les courbes composites.

#### 4.9 Construction des échangeurs de chaleur

L'intégration thermique permet non seulement de déterminer la consommation minimale d'énergie mais aussi d'aider le concepteur comment apparier les fluides présents dans le système. Dans THERMOPTIM, Il existe un outil appelé blocs d'échanges qu'on utilise pour faciliter la construction de ces échangeurs.

La procédure d'appariement des fluides est réalisée en respectant les règles de la méthode d'intégration thermique.

Voyons d'abord ce qui se passe au niveau du pincement supérieur (311°C)

- Au-dessus du pincement les fluides présents sont :

nom transfo	mCp	
GAZ_ECHAPPEM...	-115.4118588235...	■
SURCH_HP	41.25937145783...	■
VAP_HP	146749.4	■

**Figure 4.25**

On est en présence de deux fluides froids et un fluide chaud. La contrainte sur les débits n'est respectée que quand on apparie le GAZ\_ECHAPPEMENT avec le VAP\_HP :  $115,4 < 146749,4$ . L'échangeur du SURCH\_HP est placé en amont.

- Au-dessous du pincement on a :

nom transfo	mCp	
GAZ_ECHAPPEM...	-115.4118588235...	■
ECO_HP	50.31114927131...	■

**Figure 4.26**

On voit bien que les contraintes sont aussi respectées :  $50,3 < 115,4$ . Un échangeur est créé pour l'ECO\_HP.

Passons maintenant au niveau du pincement inférieur (148 °C)

- Au-dessus du pincement les fluides présents sont :

nom transfo	mCp	
SURCH_BP	9.531238336871...	■
VAP_BP	94539.42274714...	■
GAZ_ECHAPPEM...	-115.4118588235...	■
ECO_HP	50.31114927131...	■

**Figure 4.27**

Dans cet intervalle on a un fluide chaud et quatre fluides froids. Seul le fluide VAP\_BP respecte la contrainte sur les débits ( $115,4 < 94539,4$ ). Donc, l'échangeur VAP\_BP peut être créé. Les deux autres fluides sont placés en amont.

- Au-dessous du pincement les fluides sont :

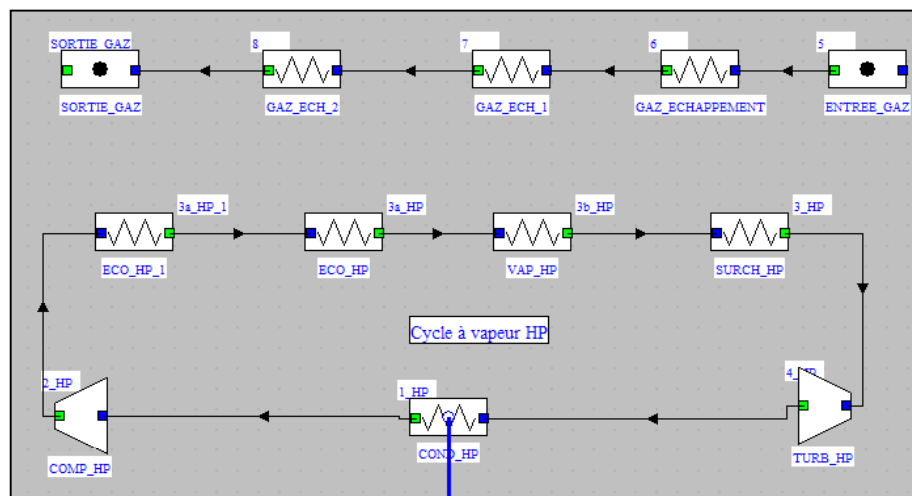
nom transfo	mCp	
ECO_BP	18.79296847554...	■
GAZ_ECHAPPEM...	-115.4118588235...	■
ECO_HP	50.31114927131...	■

**Figure 4.28**

On voit bien chaque fluide froid respecte la contrainte sur les débits calorifiques :  $18,8 < 115,4$  et  $50,3 < 115,4$ . Comme il n'y a qu'un seul fluide chaud (nombre de fluides chauds < nombres de fluides froids) donc il est nécessaire de scinder en deux ce fluide.

Par ailleurs, la **figure 4.27** et la **figure 4.28** montrent que le fluide ECO\_BP traverse le pincement par conséquent il faut aussi diviser en deux ce fluide.

Il est évident que toutes ces informations sont obtenues par l'analyse des fluides qui se trouvent au niveau des pincements. Maintenant, nous pouvons commencer à appairer les fluides dans les échangeurs de chaleur. Les blocs d'échange de THERMOPTIM aident l'utilisateur à la construction des échangeurs. Nous avons dit plus haut que le fluide ECO\_BP doit être découpé en deux, donc il faut créer une autre transfo échange pour ce fluide appelé ECO\_HP\_1. De même, la ligne gaz chaud doit être scindée en trois fluides puisqu'elle traverse les deux pincements. Il faut ajouter deux transfos échanges dans l'éditeur de schéma (GAZ\_ECH\_1, GAZ\_ECH\_2). Ensuite, il est nécessaire de transférer ces nouveaux composants dans le simulateur soit en double cliquant sur chaque transfo soit en utilisant l'interface Schéma/Simulateur. La ligne gaz et le cycle HP sont modifiés comme représentés la figure suivante :



**Figure 4.29**

Remarquons d'abord qu'il ne pas nécessaire de connaître les températures des points intermédiaires des transfos créés récemment.

Commencez par créer les blocs d'échange dans l'écran d'optimisation en double-cliquant sur la table des « Bloc d'échange ». L'écran ci-dessous apparaît :

**Figure 4.30** : Ecran des blocs d'échanges

Ensuite, donnez un nom au bloc, par exemple Bloc 1, puis double-cliquez dans le champ « veine principale » et sélectionnez GAZ\_ECHAPPEMENT dans la liste des transfos proposées. C'est le fluide chaud qui doit chauffer les fluides froids au-dessus du pincement supérieur (**figure 4.25**). L'échangeur SURCH\_HP est placé en amont de l'échangeur du VAP\_HP. Cliquez sur « ajouter un élément » et choisissez d'abord le fluide SURCH\_HP et ajoutez ensuite le fluide VAP\_HP. Comme les deux échangeurs sont placés en série, sélectionnez « série » en haut à gauche de l'écran des blocs d'échange, puis choisissez « contrainte supérieure ». Etant donné que la température amont (500 °C) de la veine principale (gaz chaud) et les températures amont et avale des fluides froids sont imposées, THERMOPTIM calcul la température de sortie de la veine principale et affiche les températures intermédiaires de chaque échangeur créé. Pour cela cliquez sur « ajuster la transfo principale » puis « tester le bloc » pour créer le bloc d'échange. Vous obtenez la figure ci-dessous. Vous pouvez ensuite sauver le bloc d'échange.

bloc     veine principale      < >   

parallèle  
 série     actif       

contrainte supérieure  
 contrainte inférieure     compatible       

T amont     T aval

nom transfo	n°	T amont (°C)	T aval (°C)	T princ. ava...	m princ
SURCH_HP	1	310,96	450	452,33	100
VAP_HP	2	310,96	310,96	327,84	100

       ordre élément

**Figure 4.31** : Construction du bloc 1

Passons maintenant à créer le bloc qui se trouve entre les deux pincements. Cliquez dans le champ « bloc d'échange » de la méthode d'optimisation de THERMOPTIM et choisissez GAZ\_ECH\_1 comme veine principale. Ajoutez les trois fluides (ECO\_HP, SURCH\_BP, VAP\_BP) en les mettant en série et sélectionnez « contrainte supérieure ». Si vous ajustez le bloc, un message s'affiche car la température amont de la veine principale, calculée par construction du premier échangeur du bloc, est trop faible pour chauffer le fluide SURCH\_BP. Donc, il faut que les échangeurs du bloc soient mis en parallèles. De même, un message s'affiche si on parallélise les trois échangeurs. La seule façon de créer est de mettre en parallèle les fluides ECO\_HP et SURCH\_BP et placer l'échangeur du fluide VAP\_BP en aval (**figure 4.32**).

bloc     veine principale      < >   

parallèle  
 série     actif       

contrainte supérieure  
 contrainte inférieure     compatible       

T amont     T aval

nom transfo	n°	T amont (°C)	T aval (°C)	T princ. ava...	m princ
ECO_HP	1	147,92	310,96	242,65	87,73
SURCH_BP	2	147,92	275	242,65	12,27

       ordre élément

**Figure 4.32** : Construction du bloc 2

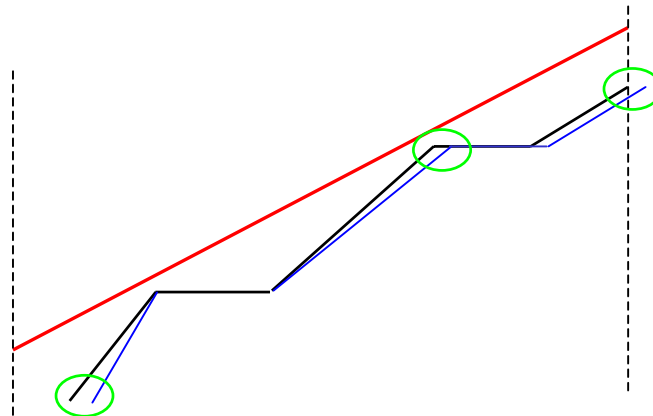
Remarque

Dans un bloc, tous les échangeurs doivent être placés soit en parallèle soit en série mais non pas les deux à la fois.

Pour l'échangeur du fluide VAP\_BP il faut créer un autre bloc nommé Bloc 3 et choisissez GAZ\_ECH\_2 pour la veine principale. Ajoutez le fluide VAP\_BP et sélectionnez « série » puis « contrainte supérieure ». Lorsque vous équilibrez ce bloc un message s'affiche «



ajustement impossible,  $mC_p$  principal trop faible ». En effet, lorsque qu'on a effectué l'optimisation sur THERMOPTIM, on était parti d'un système où l'échangeur de chaleur de la ligne gaz était en un seul bloc (voir figures 6 et 19). Pendant les étapes d'optimisation précédentes, nous avons découpé cet échangeur en plusieurs morceaux. Nous avons fait de même avec l'économiseur HP. Dans ses calculs, THERMOPTIM cale les courbes composites pour respecter le pincement minimum. Dans le cas d'un système à deux niveaux de pression, on a obtenu les débits HP et BP de telle sorte que les deux pincements sont effectivement minimaux, avant découpage des échangeurs. Durant la phase de construction des échangeurs, on a vu que la ligne de gaz et l'économiseur HP traversaient les pincements, c'est pourquoi on les a divisés. Or, si on découpe l'économiseur HP et on recalcule le système avec les même débits ensuite après avoir minimisé l'appoint, on trouve que l'apport de chaleur n'est pas nul. Ceci vient du fait que THERMOPTIM trace ses courbes composites en supposant le  $C_p$  constant sur l'intervalle de température des transformations prises en compte dans la méthode, il prend évidemment le  $C_p$  moyen sur cet intervalle. Comme le  $C_p$  moyen sur l'économiseur non découpé diffère légèrement de ceux des deux morceaux en lequel il est découpé autour du pincement inférieur (*figure 4.33*), les pentes des courbes changent légèrement, et surtout une petite quantité de chaleur des besoins passe d'un côté à l'autre du pincement BP. Donc le pincement B se décale et le pincement supérieur est obligé d'augmenter, ce qui impose l'apparition d'un apport de chaleur. A noter que la température de rejet des gaz augmente au passage. Pour annuler cet apport, il faut ramener le pincement HP à sa valeur minimale en réduisant le débit BP. Cette réduction augmente la pente de la composite froide en dessous du pincement BP et augmente donc un peu la température de rejet des gaz. Il est donc nécessaire de réajuster le débit BP après découpage. Après quelque itération nous obtenons un débit BP de 4,23 kg/s.

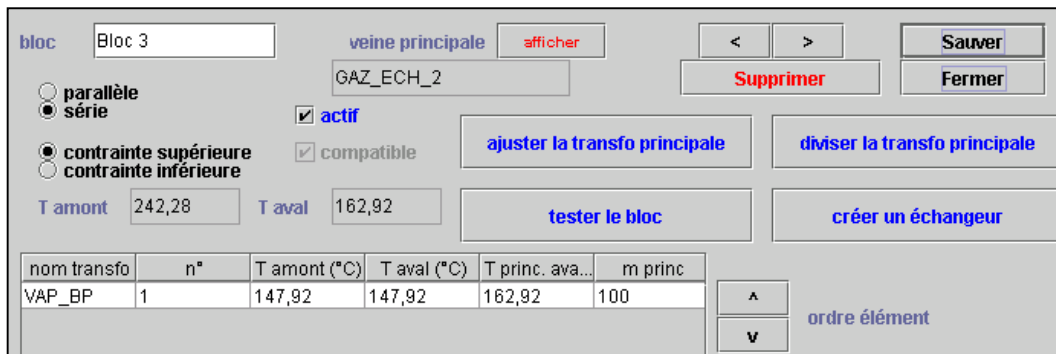


**Figure 4.33**

La courbe noire est la composite froide avant découpage de l'économiseur. La courbe bleue est celle après découpage.

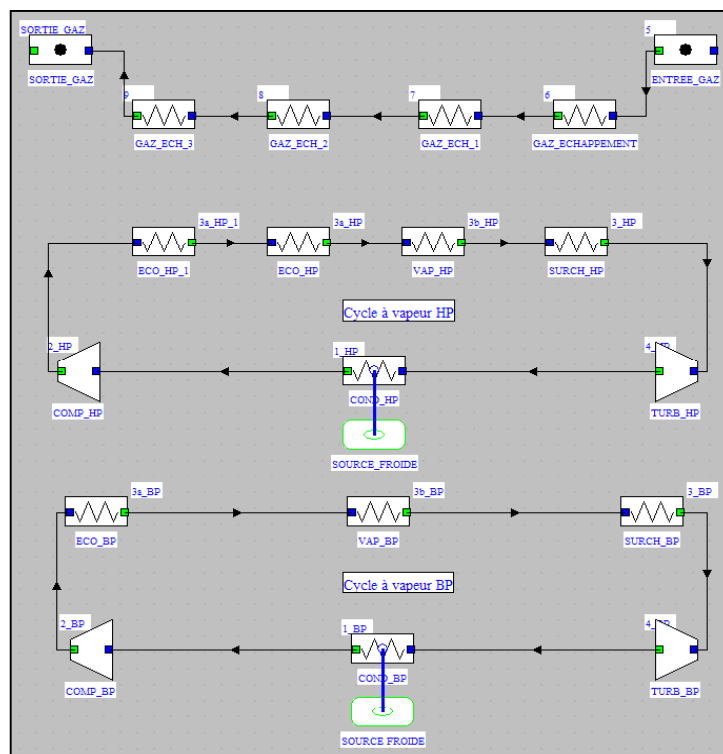
De façon similaire, le découpage de l'échangeur de chaleur de la ligne gaz déforme légèrement la composite chaude. Dans ce cas la déformation tend à augmenter l'écart entre les composites et ne pose pas de problème dans l'équilibrage des blocs, c'est une petite marge en quelque sorte. Dans notre cas, elle ne suffit pas à compenser le déplacement de la composite froide.

Nous pouvons maintenant revenir à la construction des blocs. Pour cela, ouvrez le Bloc 1 et ajustez-le. Faites de même pour le Bloc 2 et puis sauvez. Pour le Bloc 3, vous obtenez la figure ci-dessous :



**Figure 4.34** : Construction du bloc 3

La création du dernier bloc est opérée de la même manière que précédemment mais il faut ajouter une transfo pour la ligne gaz. Pour cela, revenez dans l'éditeur de schéma et ajoutez une transfo échange appelée GAZ\_ECH\_3 puis transférez-la dans le simulateur



(figure 4.35).

Ouvrez ensuite l'écran de la méthode d'optimisation et double-cliquez dans le champ « blocs d'échange » et créez le bloc 4 puis sauvez (*figure 4.36*).

nom transfo	n°	T amont (°C)	T aval (°C)	T princ. ava...	m princ
ECO_HP_1	1	24,42	147,92	91,11	72,36
ECO_BP	2	24,13	147,92	91,11	27,64

**Figure 4.36** : Construction du bloc 4

Une fois que tous les blocs d'échanges sont créés vous pouvez maintenant les diviser en sous bloc. Cette opération est réalisée dans l'écran des blocs d'échange en cliquant sur « diviser la transfo principale ». L'écran suivant apparaît :

**Figure 4.37** : Ecran de division des blocs

Dans ce cas, si le bloc est en série ou en parallèle, la veine principale est divisée selon le nombre d'échangeurs créés dans le bloc. Par exemple, pour diviser le bloc 1 du cas précédent en cliquant sur « diviser la transfo principale » puis sur « diviser » THERMOPTIM crée automatiquement les sous blocs et les affiche dans la table des blocs d'échange (*figure 4.38* (a)). Vous pouvez aussi diviser et créer des nœuds s'il est nécessaire, c'est le cas du bloc 2 qui comporte des échangeurs en parallèles. THERMOPTIM divise le bloc en sous bloc et crée automatiquement les diviseurs et les mélangeurs dans la table des nœuds du simulateur (*figure 4.38* (b)).

Pour le bloc 3 il n'est pas nécessaire de diviser le bloc car il ne comporte qu'un seul échangeur.

nom	type	veine principale
Bloc 1	série	GAZ_ECHAPPEM...
Bloc 2	parallèle	GAZ_ECH_1
Bloc 3	série	GAZ_ECH_2
GAZ_ECHAPPEM...	série	GAZ_ECHAPPEM...
GAZ_ECHAPPEM...	série	GAZ_ECHAPPEM...
GAZ_ECH_1_0	série	GAZ_ECH_1_0

(a)

nom	type	veine principale
MIX_GAZ_ECH_1	mélangeur	GAZ_ECH_2
DIV_GAZ_ECH_1	diviseur	GAZ_ECHAPPEMENT

(b)

**Figure 4.38**

A partir de maintenant vous pouvez construire les échangeurs de chaleur. Double-cliquez dans la table des blocs d'échange sur les blocs et les sous blocs ne contenant qu'un seul échangeur. Ensuite, appuyez sur « créer un échangeur », THERMOPTIM construit automatiquement les échangeurs de chaleur et les met dans le simulateur (*figure 4.39*).

nom	type	fluide chaud	fluide froid
GAZ_ECH...	contre-cou...	GAZ_ECH...	SURCH_HP
GAZ_ECH...	contre-cou...	GAZ_ECH...	VAP_HP
GAZ_ECH...	contre-cou...	GAZ_ECH...	ECO_HP
GAZ_ECH...	contre-cou...	GAZ_ECH...	SURCH_BP
Bloc 3	contre-cour...	GAZ_ECH_2	VAP_BP

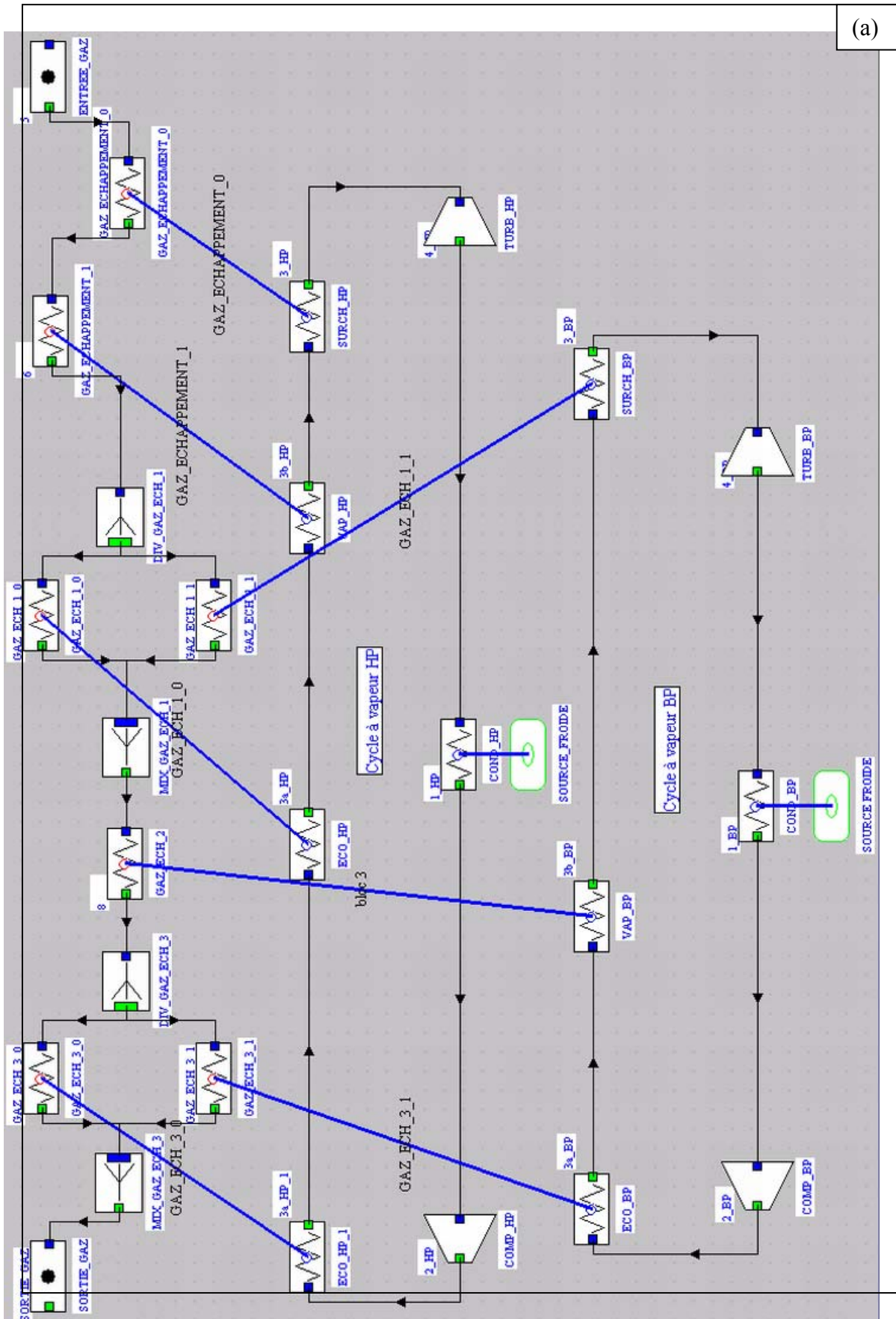
**Figure 4.39** : Table des échangeurs

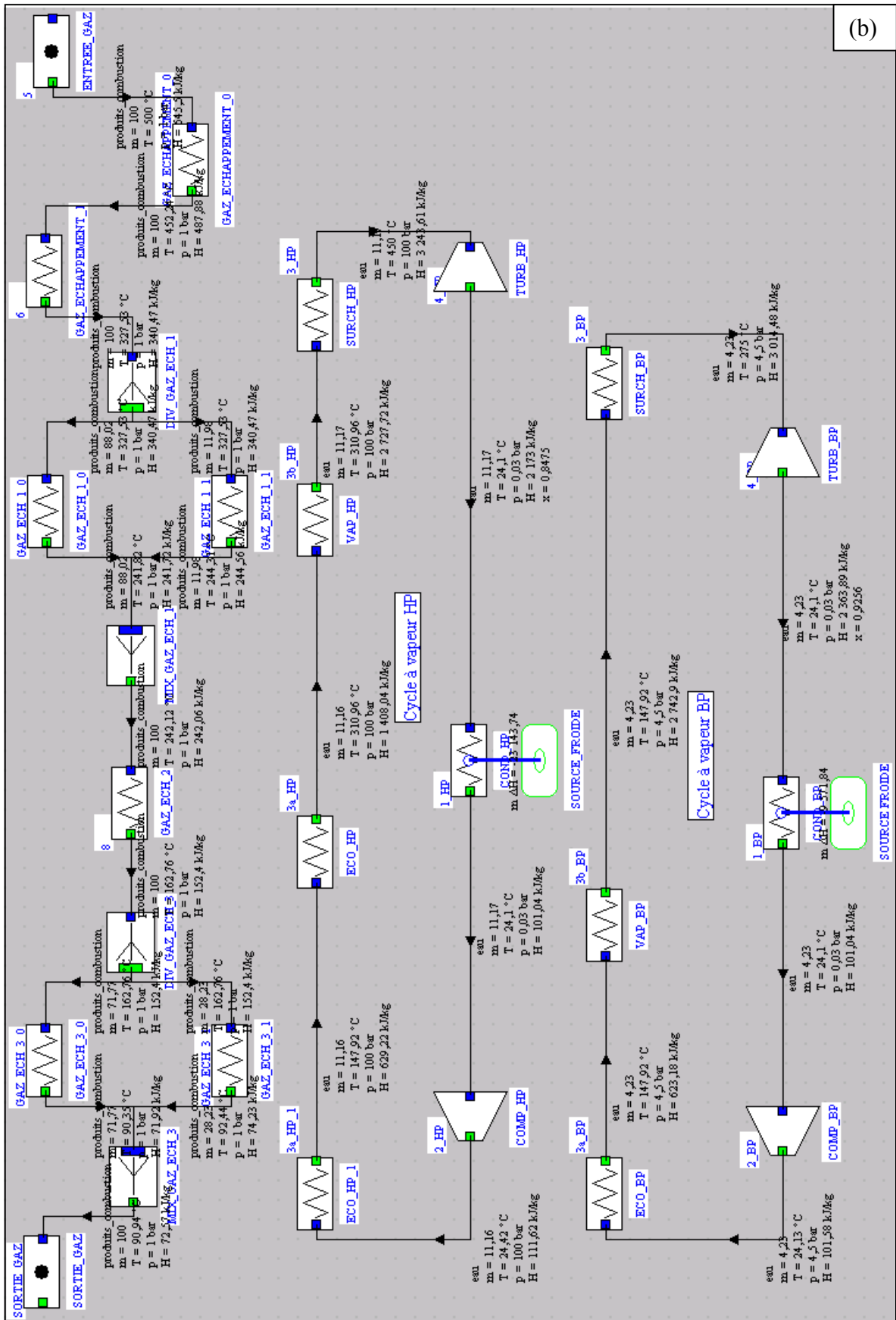
Remarques

Pendant la création de l'échangeur, l'écran correspondant à celui-ci est affiché (*figure 4.40*). Pour que l'échangeur soit calculable il faut imposer cinq contraintes. Dans notre cas, les débits, les températures d'entrée des deux fluides et la température de sortie du fluide froid sont connus, il reste à déterminer la température de sortie de la ligne gaz. Imposez les deux débits ainsi que les trois températures et cliquez sur « calculer ».

**Figure 4.40** : Ecran des échangeurs de chaleur

Dans l'éditeur de schéma, les composants correspondant aux échangeurs récemment construits ne sont pas automatiquement créés dans l'éditeur de schéma. Vous devez ouvrir l'interface Schéma/Simulateur et cliquez sur l'option « mettre à jour le schéma à partir du simulateur ».





#### 4.10 Comparaison d'un GVR à un niveau de pression et à deux niveaux de pression

Les pertes dans le GVR et celles à l'échappement sont liées. Grâce à l'utilisation de l'outil d'optimisation de THERMOPTIM, nous avons pu identifier les irréversibilités qui existent dans un GVR à un niveau de pression. Lors de l'étude d'un GVR à un et à deux niveaux de pression, nous avons constaté que le GVR à deux niveaux de pression permet de réduire cette perte.

Le tableau ci-dessous montre la comparaison des bilans énergétiques dans un GVR à un et à deux niveaux de pression.

GVR	1 niveau de pression	2 niveaux de pression
Energie payante $E_p$ [kW]	49050	49050
Energie utile $E_u$ [kW]	12465	14705
Efficacité $\eta[\%] = \frac{E_u}{E_p}$	25,4	30

**Tableau 4.5** : tableau de comparaison

D'après ce tableau, la puissance produite nette pour un GVR à deux niveaux de pression est supérieure par rapport au GVR à un seul niveau de pression. Cette augmentation correspond à plus de 17,8%.

En résumé, l'amélioration des performances des cycles est obtenue en utilisant plusieurs cycles à vapeur à des niveaux de pression différents.