

THERMOPTIM®

PRISE EN MAIN

EXEMPLE D'UN CYCLE A VAPEUR

VERSION JAVA 2.5

© R. GICQUEL MARS 2020

SOMMAIRE

PRISE EN MAIN DE THERMOPTIM	3
NOTIONS DE BASE	3
CALCUL D'UN CYCLE DE CENTRALE A VAPEUR	4
CREATION DU SCHEMA	2
CREATION DES ELEMENTS DU SIMULATEUR.....	4
PARAMETRAGE DES POINTS	5
PARAMETRAGE DES TRANSFOS	6
TRACE DU CYCLE SUR DIAGRAMME THERMODYNAMIQUE	9
AMELIORATIONS DU TRACE DES CYCLES	10
<i>Liaison des points par des lignes d'iso-valeurs</i>	<i>10</i>
<i>Changement de la couleur du cycle</i>	<i>10</i>
<i>Superposition de plusieurs cycles sur un diagramme.....</i>	<i>11</i>
CHANGEMENT DE TYPE DE DIAGRAMME	11
DIMENSIONNEMENT DU CONDENSEUR	12
AMELIORATIONS DU CYCLE	16
CYCLE AVEC RESURCHAUFFE.....	16
CYCLE AVEC PRELEVEMENT.....	16
MODIFICATION DU MODELE.....	17
ETUDES PARAMETRIQUES SUR LES NIVEAUX DE PRESSION.....	18

© R. GICQUEL 1997 - 2020. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans autorisation est illicite, et constitue une contrefaçon sanctionnée par le Code de la propriété intellectuelle.

Avertissement : les informations contenues dans ce document peuvent faire l'objet de modifications sans préavis, et n'ont en aucune manière un caractère contractuel.

PRISE EN MAIN DE THERMOPTIM

L'objectif de la première partie de cette notice est de permettre à un utilisateur de se familiariser rapidement (en moins d'une demi-heure) avec THERMOPTIM, en utilisant les éléments de base du progiciel.

Une fois cette prise en main effectuée, il devient plus facile d'aborder l'étude de problèmes plus complexes, notamment ceux qui mettent en jeu des nœuds ou des échangeurs, qui sont illustrés par les variantes du cycle simple présentées ici. Pour de plus amples explications, on se reportera au manuel de référence du progiciel.

Signalons aussi l'existence d'un ensemble de modules de formation en ligne sonorisés¹, appelés DIAPASON pour Diaporamas Pédagogiques Animés et Sonorisés, ensemble consacré à la découverte et à la prise en mains de ThermoOptim. Vous y trouverez un exemple analogue à celui qui est traité ici, avec un paramétrage différent, et des liens vers un site de formation aux systèmes énergétiques avec de nombreuses explications technologiques et des variantes de ce cycle.

Enfin, les explorations dirigées² de modèles de cycles réalisés avec ThermoOptim peuvent être très utiles pour démarrer avec le progiciel, car elles proposent toute une série de modélisations de difficultés progressives. Elles ont été développées comme compléments aux MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur³.

NOTIONS DE BASE

L'étude d'un système thermodynamique peut être décomposée en cinq étapes fondamentales :

- 1) l'analyse de la structure (ou de l'architecture) de la technologie considérée, qui met en évidence ses principaux éléments fonctionnels (compresseurs, échangeurs de chaleur, turbines...) et leurs connexions.
- 2) pour chaque composant, l'identification du ou des fluides thermodynamiques qui entrent en jeu : par exemple, le fluide comprimé dans une turbine à gaz est de l'air, qui brûle avec un combustible dans la chambre de combustion, pour former des gaz brûlés, eux-mêmes détendus dans la turbine.
- 3) pour chaque élément, il faut bien déterminer si elles se font en système ouvert ou fermé. Rappelons que ce qui les différencie, c'est respectivement la présence ou l'absence d'un transfert de masse aux frontières
- 4) pour chaque élément, la détermination précise des transformations qu'y subissent les différents fluides identifiés, et le calcul de leurs évolutions.
- 5) l'établissement du bilan global du système considéré par assemblage des différents modèles des éléments fonctionnels, compte tenu des connexions internes.

THERMOPTIM a été conçu pour faciliter le calcul de cycles thermodynamiques complexes, mais il ne peut se substituer à l'utilisateur pour effectuer l'analyse détaillée du système considéré, ce qui correspond aux trois premières étapes ci-dessus.

Avant de commencer à entrer son projet dans le progiciel, l'utilisateur doit avoir effectué ce travail, faute de quoi il risque de commettre des erreurs de représentation.

Une fois cette analyse réalisée, chacun des composants peut être facilement décrit grâce aux points, transformations et échangeurs présentés ci-dessous, qui sont regroupés sous forme d'un projet faisant éventuellement appel à des nœuds.

¹ : <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/seances-disponibles.html>

² <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/explor-scenar.html>

³ <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/CTC.html>

THERMOPTIM définit trois catégories de **corps** : des gaz idéaux purs, des gaz idéaux composés, et des vapeurs condensables (sans mélanges). Les gaz parfaits correspondent au cas particulier de gaz idéaux dont la capacité thermique massique est indépendante de la température. ThermoOptim accepte une autre catégorie de corps, dits externes, définis par l'utilisateur, mais qui apparaissent dans ses écrans (voir note spécifique à ce sujet).

Le corps peut être pur, auquel cas ses propriétés sont prédéfinies dans le logiciel, ou composé. Dans ce cas (qui n'est possible que pour un gaz), l'utilisateur doit définir la composition à partir des autres gaz présents dans la base, en indiquant, pour chacun d'entre eux, son nom et sa fraction molaire ou massique. Les propriétés du corps composé sont alors automatiquement déterminées à partir de celles de ses constituants.

Un **point** désigne une particule d'un corps et permet de déterminer ses variables d'état intensives : pression, température, capacités thermiques massiques, enthalpie, entropie, énergie interne, exergie, titre. Un point est identifié par son nom et celui du corps qui lui est associé. Pour le calculer, il faut :

- soit entrer au moins deux de ses variables d'état, généralement la pression et la température pour les systèmes ouverts, et le volume et la température pour les systèmes fermés,
- soit les déterminer automatiquement en utilisant par exemple l'une des transformations définies ci-dessous.

Les **transformations** (appelées transfos dans THERMOPTIM) correspondent à des évolutions thermodynamiques subies par un corps entre deux états. Une transfo associe donc deux points tels que définis précédemment, un point amont et un point aval. De plus, elle spécifie le débit massique mis en jeu, et permet donc de calculer les variables d'état extensives, et notamment de déterminer la variation d'énergie mise en jeu.

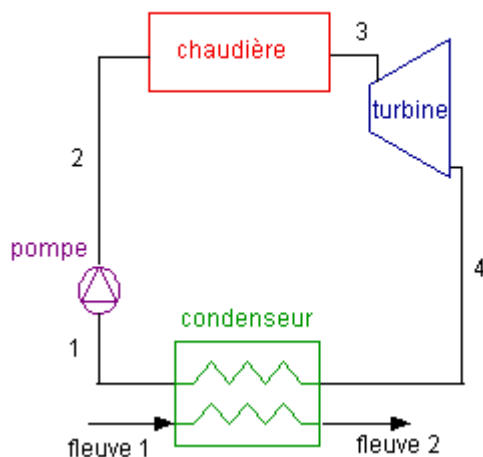
Les transformations peuvent être de plusieurs types : compressions, détente, combustions, laminages, échanges de chaleur, et transformations humides (ce dernier cas recouvre sept catégories d'évolutions différentes). Leur paramétrage fait appel à différentes caractéristiques selon les cas, comme par exemple, pour une compression, le rendement isentropique et le rapport de compression.

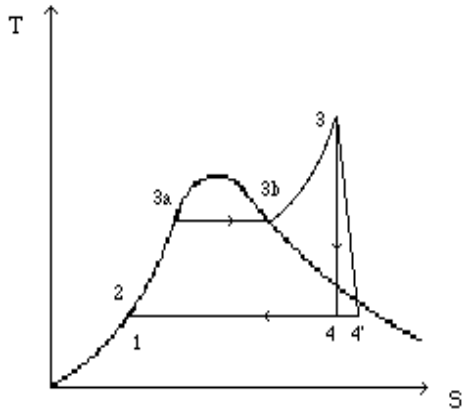
Un cycle peut être décrit comme un ensemble de points reliés par des transformations. Dans la mesure où le débit massique de fluide est le même dans toutes les transfos, des transfos et des points suffisent pour cela, le réseau de fluide étant implicitement défini par les connexions internes. Si ce n'est pas le cas, il peut être nécessaire de compléter la description du réseau en utilisant les nœuds décrits dans la documentation.

CALCUL D'UN CYCLE DE CENTRALE A VAPEUR

On se propose d'étudier le cycle d'une centrale thermique à vapeur, et de le représenter sur un diagramme entropique.

Schéma d'une centrale à vapeur





Cycle de Hirn

Au point 1, un débit de 1kg/s d'eau est à l'état liquide, à une température d'environ 20 °C, sous une faible pression (0,023 bar). Une pompe, de rendement isentropique égal à 1, met cette eau en pression à 165 bars (point 2).

L'eau sous pression est ensuite chauffée à pression constante dans une chaudière à flamme (fuel, charbon, gaz naturel). L'échauffement comporte trois étapes :

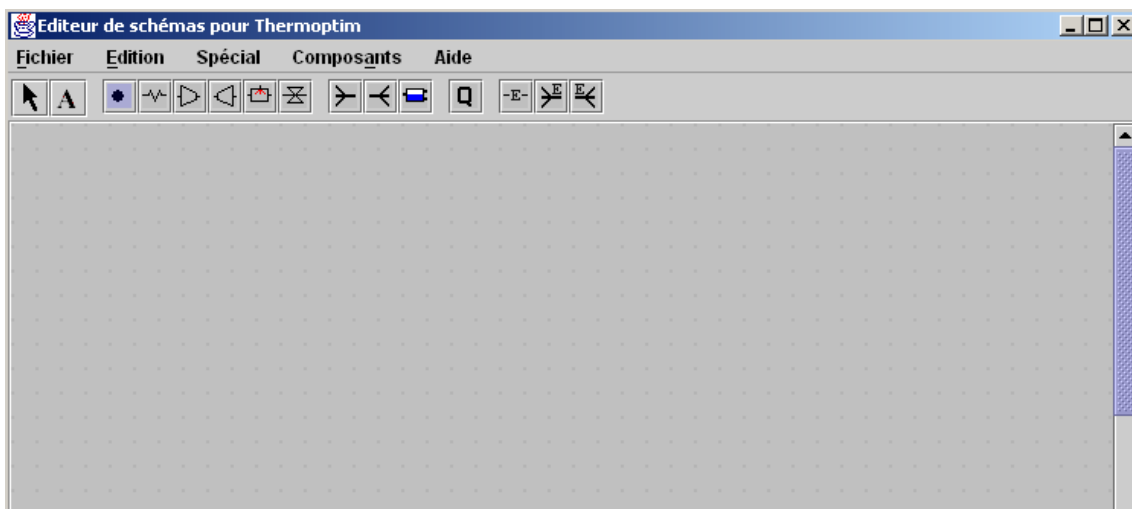
- chauffage du liquide dans l'économiseur, de 20°C à environ 355°C, température de début d'ébullition à 165 bars : évolution (2-3a) sur le diagramme entropique
- vaporisation à température constante 355°C dans le vaporiseur : évolution (3a-3b)
- surchauffe de 355°C à 560°C dans le surchauffeur : évolution (3b-3).

La vapeur est ensuite détendue dans une turbine de rendement isentropique égal à 0,85, jusqu'à la pression de 0,023 bar évolution (3-4).





Le mélange liquide-vapeur est enfin condensé jusqu'à l'état liquide dans un condenseur, échangeur entre le cycle et la source froide, par exemple l'eau d'un fleuve. Le cycle est ainsi refermé.

CREATION DU SCHEMA

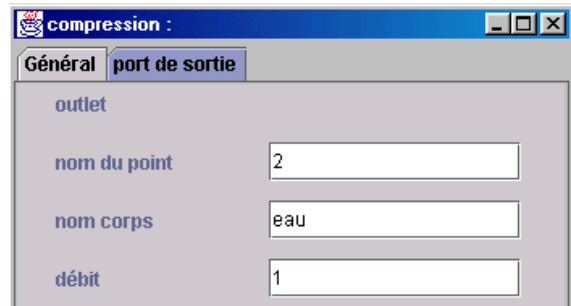
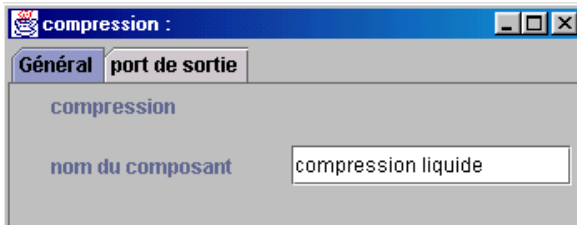
Ouvrez THERMOPTIM. L'écran de l'éditeur de schémas vous est présenté :



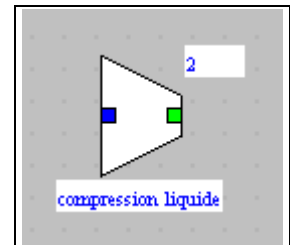
Il comporte une palette présentant les différents composants représentables (échanges de chaleur, compresseurs, organes de détente, chambres de combustion, mélangeurs, diviseurs...), et un panneau de travail où l'on place ces composants et où on les interconnecte par des liens vectoriels.

Le schéma de la centrale à vapeur indique sans ambiguïté les composants à sélectionner : la pompe, qui est un type de compresseur , la chaudière, que l'on représentera ici en fait par trois transformations de type échange de chaleur , afin de distinguer les différentes phases d'échauffement de l'eau (dans l'économiseur, le vaporiseur et le surchauffeur), la turbine, qui est un organe de détente , et le condenseur, qui est du type échange .

Commencez par sélectionner le compresseur et placez-le sur le panneau de travail. Une fenêtre à onglets de définition du composant vous est proposée. Commencez par entrer son nom :

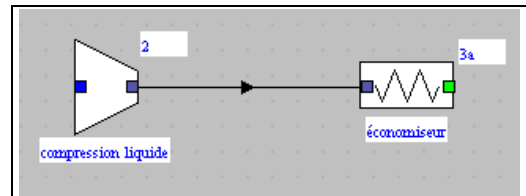


Cliquez ensuite sur l'onglet du port de sortie, et entrez le nom du point de sortie (2), le nom du corps (eau), et le débit (1 kg/s). Cliquez ensuite sur le bouton "Appliquer" pour valider les deux onglets. Le composant apparaît à l'écran.

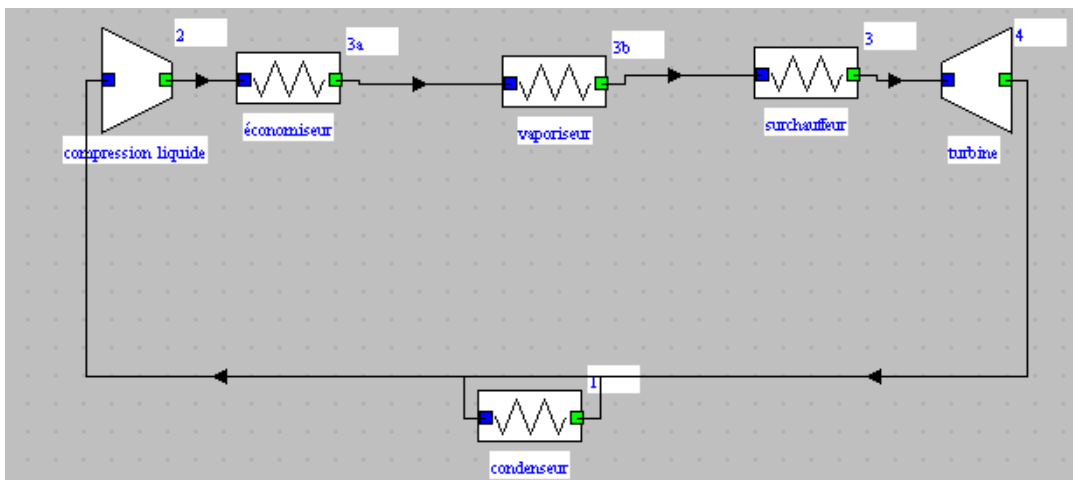


Créez ensuite de manière similaire l'économiseur comme composant "échange", mais sans entrer le nom du corps, qui sera automatiquement propagé lors de la connexion.

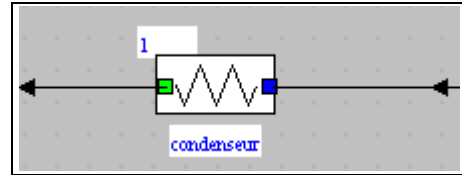
Vous pouvez alors commencer à connecter entre eux ces composants. Pour cela, cliquez sur le port de sortie (vert) de l'un d'entre eux (par exemple le compresseur), et faites glisser la souris jusqu'au port d'entrée du composant auquel il doit être relié (ici l'économiseur), et relâchez le clic. Un lien orienté apparaît alors.




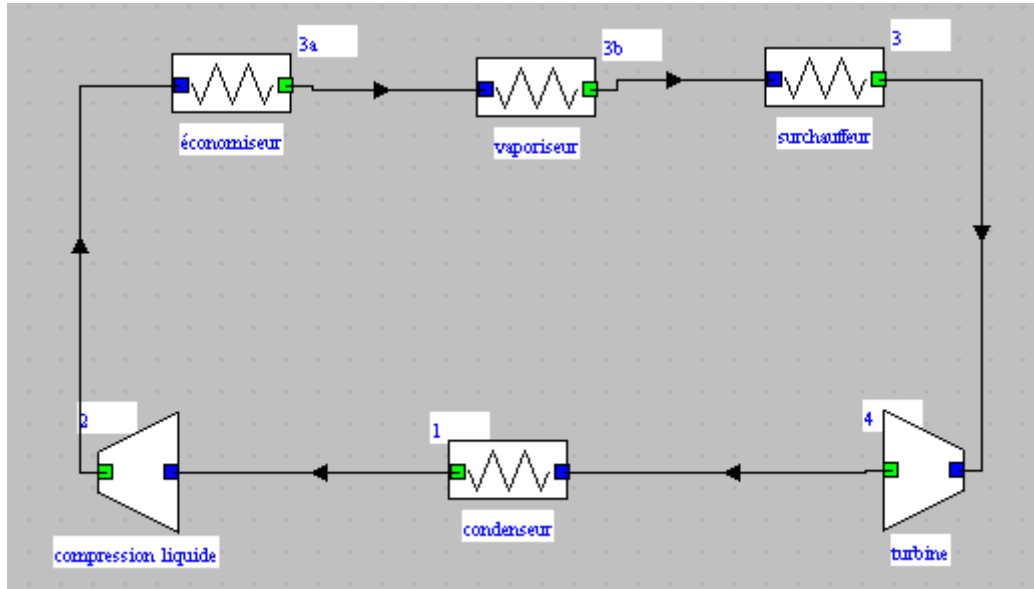
Entrez ensuite de manière similaire les deux autres parties de la chaudière, la turbine et le condenseur, et connectez les différents composants. Vous obtenez le résultat suivant :



Au niveau du condenseur, les liens s'entrecroisent, étant donné que, par défaut, les composants sont orientés de droite à gauche. Pour obtenir un meilleur effet visuel, sélectionnez le condenseur, et activez la ligne "Miroir vertical" du menu Edition ou tapez sur la touche F1. Le composant s'oriente alors de droite à gauche :



Le schéma précédent est cependant encore déséquilibré, avec cinq composants en haut, et un seul en bas. Il peut être préférable d'aligner le condenseur, la pompe et la turbine, ce qui conduit à orienter aussi ces deux derniers composants de droite à gauche. Le résultat obtenu est le suivant (on a de plus rajouté un commentaire  pour désigner le schéma) :



En utilisant les flèches du clavier, vous pouvez affiner le schéma en déplaçant légèrement les composants qui ne sont pas bien alignés, comme le vaporiseur ou le condenseur.

A ce stade, la description qualitative du cycle est terminée. Pour faciliter l'archivage de vos schémas, vous pouvez leur associer un nom et un descriptif, en sélectionnant la ligne "Descriptif" du menu Fichier :

nom
cycle vapeur
Descriptif
cycle à vapeur simple pour prise en mains de ThermoOptim

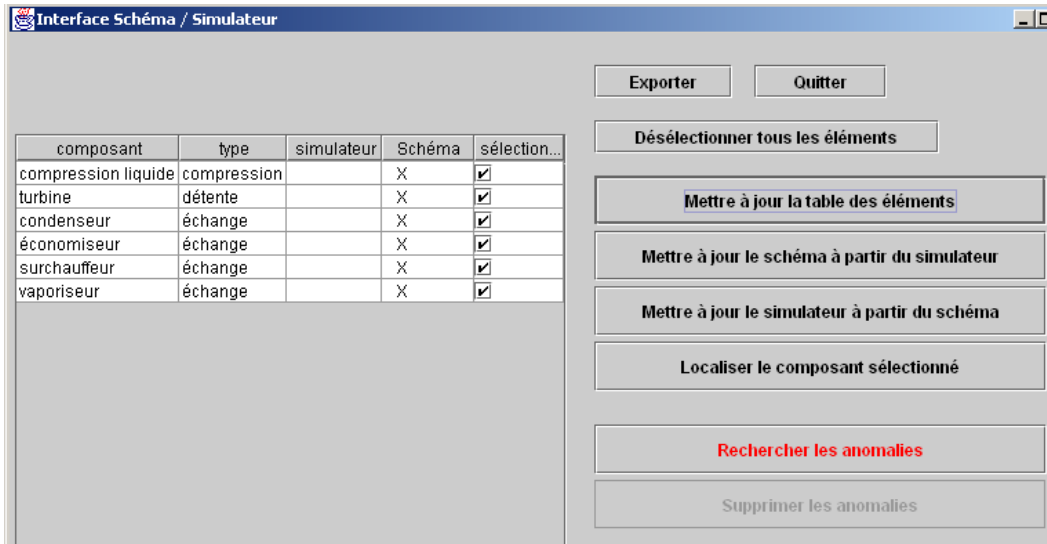
Sauvez ensuite votre schéma en lui donnant un nom avec l'extension .dia : "vap_simple.dia" par exemple.

En connectant les composants, vous avez propagé certaines informations de l'amont vers l'aval, de telle sorte que tous les noms et les corps des ports d'entrée sont initialisés automatiquement, comme vous pouvez le vérifier en sélectionnant un composant et en faisant afficher ses propriétés (F4 ou menu Edition).

Un autre point à noter est que l'entrée du nom du corps peut être faite de deux manières : soit directement, soit en double-cliquant dans le champ du nom, ce qui ouvre la liste structurée des corps disponibles dans la base, auquel cas vous choisissez celui que vous désirez.

CREATION DES ELEMENTS DU SIMULATEUR

Pour créer les éléments du simulateur, le plus simple est d'utiliser l'interface qui le relie à l'éditeur de schémas, et qui peut être ouverte à partir du menu Spécial de l'éditeur de schémas. Cliquez alors sur le bouton "Mettre à jour la table des éléments". L'écran suivant est affiché :



Dans la table de gauche, apparaît la liste des composants que vous avez créés. En face de chacun d'eux, un "X" marque la case "schéma", alors que la case "simulateur" est vide. La colonne de droite indique quels sont les composants sélectionnés, c'est-à-dire ceux qui doivent être pris en compte lors des opérations réalisées à partir de l'interface. Par défaut, tous les composants sont sélectionnés, mais un bouton vous permet de les désélectionner tous si vous le désirez. Autrement, en double-cliquant sur une ligne de la table, vous la sélectionnez ou la désélectionnez.

Pour transférer dans le simulateur l'ensemble des composants, cliquez sur le bouton "Mettre à jour le simulateur à partir du schéma". Un nom vous est demandé pour le projet. Entrez par exemple "cycle à vapeur simple". Une fois le transfert réalisé, l'écran de projet apparaît comme suit :

THERMOPTIM Java. Copyright R. Gicquel 1999-2005

Fichiers de projet Fichiers de résultats Spécial Aide

Nom du projet : cycle vapeur simple Schéma associé : cycle vapeur

6 POINTS

nom du point	corps	P (bar)	T (°C)
1	eau	1	26,85
2	eau	1	26,85
3	eau	1	26,85
4	eau	1	26,85
3a	eau	1	26,85
3b	eau	1	26,85

6 TRANSFOS

nom transfo	point amont	point aval	type transfo
vaporiseur	3a	3b	échange
surchauffeur	3b	3	échange
économiseur	2	3a	échange
condenseur	4	1	échange
compression l...	1	2	compression
turbine	3	4	détente

NOEUDS

nom	type	veine principale

PRESSIONS IMPOSEES

nom	valeur

Bilan

efficacité

énergie utile

énergie payante

Recalculer

unité de débit

ECHANGEURS DE CHALEUR

nom	type	fluide chaud	fluide froid

Si jamais les composants sont insuffisamment définis dans l'éditeur de schémas, ils ne sont pas transférés et sont coloriés en jaune. Thermoptim cherche à avertir l'utilisateur en cas de problème en lui adressant un message, mais il est possible qu'une erreur subsiste. Dans ce cas, sélectionnez un par un ceux qui posent problème, choisissez la ligne "Affichez les propriétés" dans le menu Edition, et passez en revue les différents onglets pour voir si une information ne manque pas. Si un champ n'est pas éditable, il vous faudra déconnecter le composant pour le libérer. Vous le reconnecterez une fois le problème corrigé.

Six points et six transfos ont été créés, avec un paramétrage par défaut (1 bar et 300 K pour les points). Pour terminer la création du modèle, vous devez maintenant ouvrir chacun des écrans des points et transfos créés, et les paramétrer pour qu'ils correspondent bien au cas qui vous intéresse. Vous pouvez le faire soit à partir de l'écran de projet ci-dessus, soit à partir de l'éditeur de schémas, en double-cliquant sur les composants pour accéder aux transfos, et sur les liens pour accéder aux points (vous pouvez bien sûr aussi les ouvrir à partir des écrans des transfos).

PARAMETRAGE DES POINTS

Entrez l'état du corps au point 1. On connaît sa pression (0,023 bar), et on sait qu'il se trouve à la température de saturation, à l'état liquide.

Pour trouver sa température, il suffit de sélectionner "imposer la température de saturation" (par défaut, le titre vaut 0, ce qui correspond à l'état liquide).

projet	cycle vapeur extraction et réchauffe		<input type="checkbox"/> observée	<	>
point	1				
corps	eau	afficher	Dupliquer	Sauver	
	<input type="checkbox"/> mélange externe	Supprimer	Fermer		
Système ouvert (T,P,h) Système fermé (T,v,u) Mélanges humides					
P (bar)	0,023		<input checked="" type="radio"/> P et T connus		
<input type="checkbox"/> pression contrôlée	h (kJ/kg)	82,83661159	<input type="radio"/> P et h connus		
	s (kJ/kg/K)	0,292821436	<input type="radio"/> P et s connus		
	exergie (kJ/kg)	-9,4461			
T (°C)	19,74562	<input type="radio"/> non contraint			
T (K)	292,9	<input type="radio"/> imposer la pression de saturation			
titre	0	<input checked="" type="radio"/> imposer la température de saturation			
u (kJ/kg)	82,83430774	écart Tsat	0		
s (kJ/kg/K)	0,292821436				
V (m ³ /kg)	0,00100167242				
Calculer					

Les autres variables intensives peuvent alors être calculées en cliquant sur le bouton "Calculer".

Le point 1 est maintenant défini. Pour paramétrer les autres points, opérez comme suit.

Pour le point (2), indiquez la seule information connue à son sujet, sa pression $p = 165$ bar. En l'état actuel du calcul du cycle, on ignore sa température ou son enthalpie.

Le point 3a correspondant au début d'ébullition à 165 bar. Il suffit pour cela d'entrer la pression, et d'imposer la température de saturation, avec un titre égal à 0. L'état du point 3a étant totalement défini, les autres variables peuvent être calculées.

De la même manière, le point 3b peut être défini comme étant à la pression de 165 bar, à la température de saturation, avec un titre égal à 1.

Le point 3 quant à lui est à la température de 560 °C et à la pression de 165 bar. Il peut aussi être calculé.

Le dernier point à paramétrer est le point 4. Seule sa pression est connue : 0,023 bar.

PARAMETRAGE DES TRANSFOS

Commencez par exemple par la compression liquide entre les points 1 et 2. Vous avez le choix entre plusieurs modes de compression : adiabatique ou polytropique, et pour les systèmes ouverts ou pour les systèmes fermés. Pour les premiers, le rapport de compression est celui des pressions, pour les seconds, celui des volumes. Il peut être calculé, comme ici, ou imposé.

Choisissez par exemple ici : adiabatique, référence isentropique, de rendement isentropique égal à 1, et systèmes ouverts.

Sélectionnez "Imposer le rendement et calculer la transfo", puis cliquez sur le bouton "Calculer". L'état du point 2 est calculé, ainsi que la variation d'enthalpie correspondante. La valeur du taux de compression est affichée (ici environ 7 174).

transfo	compression liquide	type	compression	<	>	Sauver
type énergie	utile	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit	1	<input type="radio"/> système fermé	<input type="checkbox"/> observée
point amont	1	affichage	m ΔH	16,46	<input checked="" type="radio"/> système ouvert	Calculer
T (°C)	19,74562	Q	0	<input checked="" type="radio"/> adiabatique <input type="radio"/> non adiabatique <input checked="" type="radio"/> référence isentropique <input type="radio"/> référence polytropique		
P (bar)	0,023	rend. isentropique	1	<input checked="" type="radio"/> calculé <input type="radio"/> imposé <input type="radio"/> mécaniquement équilibrée avec		
h (kJ/kg)	82,84	exposant polytropique	1 214,24576	Imposer le rendement et calculer la transfo <input checked="" type="radio"/> Calculer le rendement, le point aval étant connu <input type="radio"/>		
titre	0	rapport de pression (>= 1)	7 173,91			
point aval	2	affichage				
T (°C)	20					
P (bar)	165					
h (kJ/kg)	99,3					
titre	0					

Pour l'économiseur (2-3a), le vaporiseur (3a-3b), et le surchauffeur (3b-3), l'état des points amont et aval est connu, et le calcul est très simple. Vérifiez simplement que le mode de calcul (en bas à droite de l'écran) est bien "Calculer le Delta H, le point aval étant connu", et cliquez sur "Calculer". De plus, étant donné que la chaudière est l'énergie payante injectée dans le cycle, spécifiez ce type en double-cliquant dans le champ "type d'énergie" situé en haut à gauche de l'écran pour changer la valeur par défaut qui est "autre".

Vous pouvez maintenant définir la détente (3-4).

L'écran qui vous est proposé est le même que pour une compression. Choisissez le type de détente (ici adiabatique, référence isentropique, de rendement isentropique 0,85), et calculez la transfo. Le titre exact du point 4 et l'enthalpie de détente sont alors déterminés.

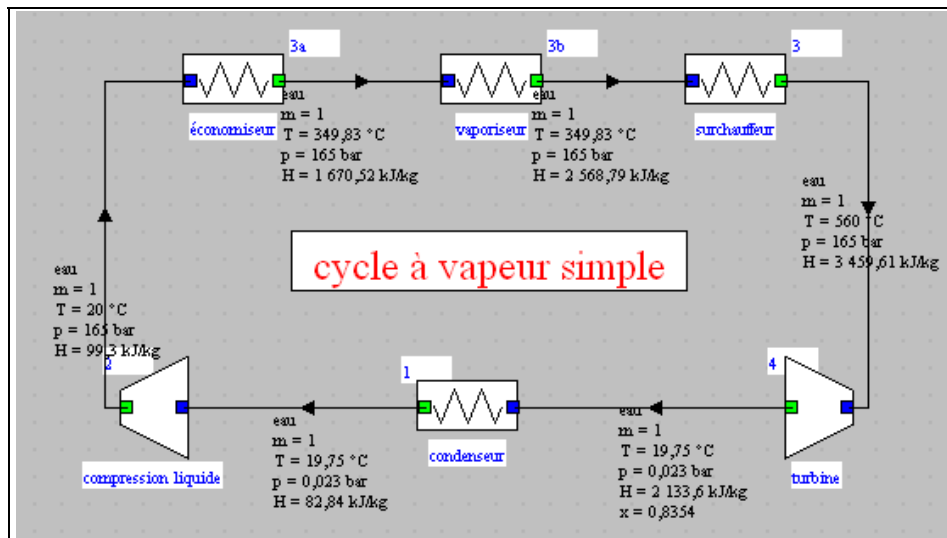
transfo	turbine	type	détente	<	>	Sauver
type énergie	utile	<input type="checkbox"/> débit imposé	débit	1	<input type="radio"/> système fermé	<input type="checkbox"/> observée
point amont	3	affichage	m ΔH	-1 326,01	<input checked="" type="radio"/> système ouvert	Calculer
T (°C)	560	Q	0	<input checked="" type="radio"/> adiabatique <input type="radio"/> non adiabatique <input checked="" type="radio"/> référence isentropique <input type="radio"/> référence polytropique		
P (bar)	165	rend. isentropique	0,85	<input checked="" type="radio"/> calculé <input type="radio"/> imposé <input type="checkbox"/> mécaniquement équilibrée avec		
h (kJ/kg)	3 459,61	exposant polytropique	1,14453	Imposer le rendement et calculer la transfo <input checked="" type="radio"/> Calculer le rendement, le point aval étant connu <input type="radio"/>		
titre	1	rapport de détente (>= 1)	7 173,91			
point aval	4	affichage				
T (°C)	19,75					
P (bar)	0,023					
h (kJ/kg)	2 133,6					
titre	0,83537					

Calculez le condenseur, comme vous l'avez fait pour les autres transfos "échange".

A ce stade, le modèle est totalement défini, et vous pouvez en dresser le bilan en cliquant sur le bouton Recalculer du simulateur, situé au centre de l'écran de projet. L'énergie payante, l'énergie utile et le rendement du cycle sont alors calculés. Sauvez-le dans un fichier avec l'extension .prj, par exemple "vap_simple.prj".

Bilan	
efficacité	0,39
énergie utile	1 310
énergie payante	3 360

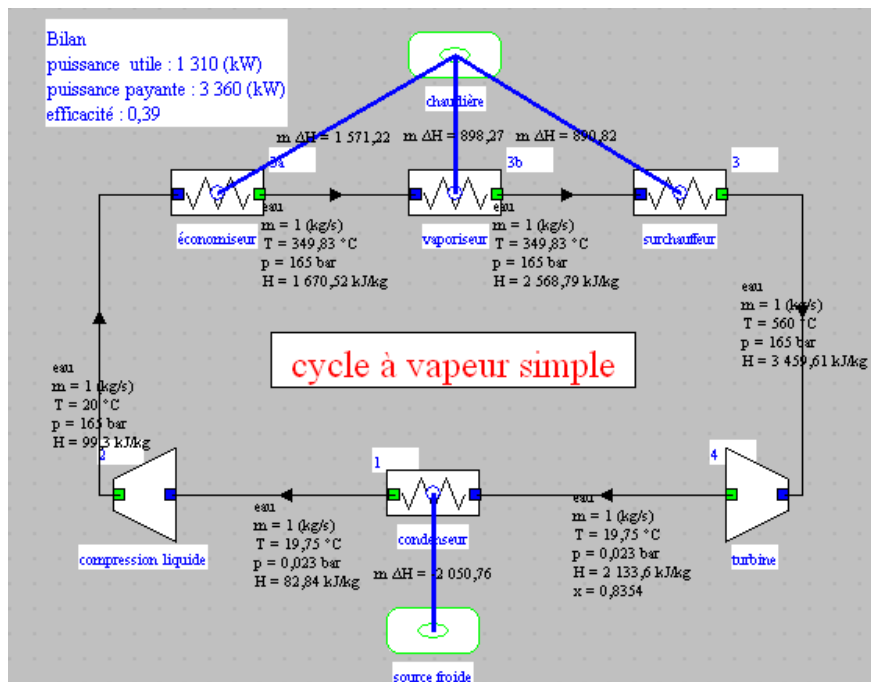
Vous pouvez visualiser les résultats obtenus en activant la ligne "Afficher les valeurs" du menu Spécial de l'éditeur de schémas :



Pour améliorer encore la représentation, vous pouvez insérer deux composants de type "source externe"



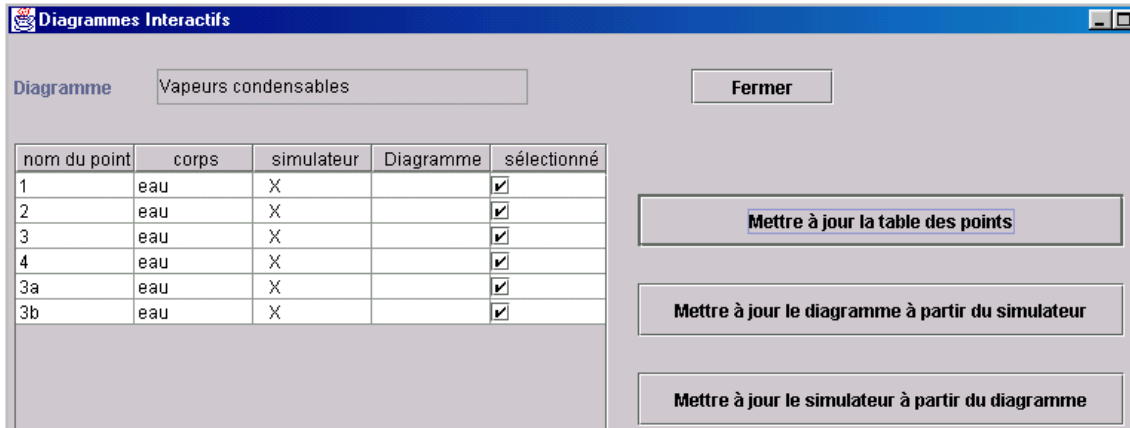
, l'un correspondant à la chaudière, et l'autre à la source froide, ainsi qu'un composant de type "Bilan" qui vous permet de reporter directement sur le schéma les éléments du bilan (ce dernier composant n'est accessible qu'à partir du menu "Composants"). De plus, vous pouvez spécifier l'unité de débit à prendre en compte, par exemple le kg/s, grâce au menu déroulant situé en bas à droite du simulateur. Les enthalpies échangées avec les sources externes sont affichées.



TRACE DU CYCLE SUR DIAGRAMME THERMODYNAMIQUE

Le tracé du cycle sur diagramme thermodynamique peut être réalisé de la manière suivante : les diagrammes interactifs sont accessibles par la ligne "Diagramme Interactifs" du menu "Spécial" de l'écran du simulateur, qui ouvre une interface similaire à celle qui relie le simulateur et l'éditeur de schémas. Double-cliquez dans le champ situé en haut à gauche pour choisir le type de diagramme souhaité (ici "Vapeurs condensables"), et choisissez l'eau comme corps. Choisissez le type de diagramme que vous désirez dans le menu "Graphe" (ici (T,s)).

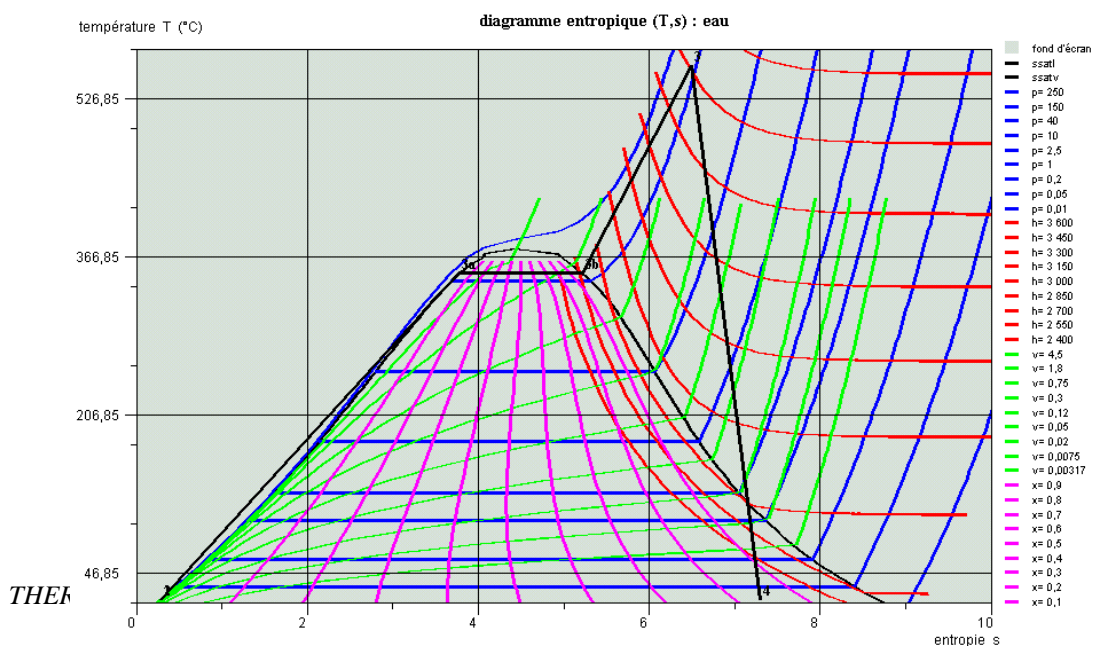
Ensuite, revenez à l'interface et cliquez sur le bouton "Mettre à jour la table des points", ce qui vous donne le résultat suivant :



L'interface entre le simulateur et les diagrammes interactifs comprend plusieurs champs et boutons, ainsi qu'une table principale montrant les différents points, soit qui existent dans le projet, soit qui ont été définis comme points de cycle dans le diagramme (ici il n'y en a pas).

Les deux premières colonnes indiquent le nom et le corps des points. Si un point est défini dans le simulateur, un "X" apparaît dans la troisième colonne, s'il appartient à un cycle du diagramme, un "X" est affiché dans la quatrième.

Cliquez sur le bouton "Mettre à jour le diagramme à partir du simulateur" pour transférer les valeurs des points sélectionnés depuis le simulateur vers le diagramme, puis cliquez sur "Points reliés" dans le menu "Cycle" du diagramme. Les points sont transférés en essayant de les ordonner aussi bien que possible, mais il peut être nécessaire de les réordonner pour obtenir un tracé relié correct. L'éditeur de points de cycle du diagramme permet de le faire dans ce cas comme nous allons le voir.



AMELIORATIONS DU TRACE DES CYCLES

Un certain nombre d'améliorations ont été récemment apportées au tracé de cycles par la version 1.3 :

- d'abord, il est possible de relier des points par diverses lignes d'iso-valeurs (isobares, isentropes...)
- ensuite, la couleur de chaque cycle peut être modifiée selon le souhait de l'utilisateur
- enfin, il est possible de superposer plusieurs cycles sur le même diagramme

Liaison des points par des lignes d'iso-valeurs

Le tracé du cycle dans le diagramme entropique n'est pas tout à fait satisfaisant parce que Thermoptim relie par une ligne droite brisée les différents points, et qu'il ne referme pas de lui-même le cycle.

Vous pouvez améliorer manuellement ce tracé en opérant de la manière suivante: ouvrez l'éditeur de points de cycles, accessible depuis le menu "Cycle" du diagramme. Les différents points sont affichés ci-dessous.

nom du point	température T (°C)	pression P	enthalpie h	entropie s	volume v	titre x
1	19,74562	0,023	82,83661	0,292821	0,00100167	0
2	19,99591	165	99,29743	0,292809	0,000994375	0
3a	349,82707	165	1 670,51999	3,77803	0,00173903	0
3b	349,82707	165	2 568,79443	5,22016	0,00883163	1
3	560	165	3 459,61452	6,49548	0,0209757	1
4	19,74562	0,023	2 133,6008	7,29439	49,04255	0,835368

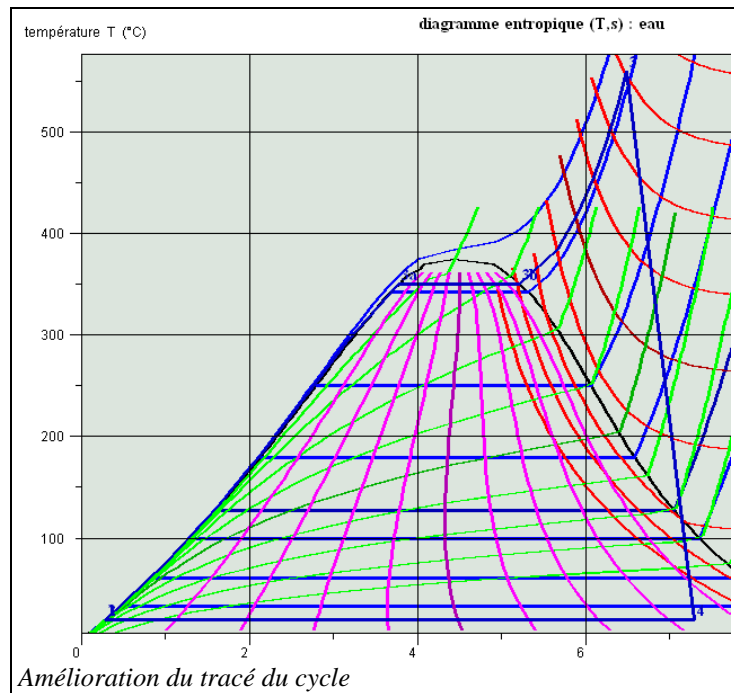
Points de l'éditeur de cycles

Commencez par fermer le cycle en sélectionnant la première ligne et en cliquant sur "Insérer", puis sélectionnez la dernière ligne, celle du point 4, cliquez sur "Copier", positionnez-vous sur la nouvelle ligne que vous avez insérée, et cliquez sur "Coller". Cliquez sur "Valider" : le cycle est mis à jour sur le diagramme.

Il est maintenant possible de connecter les points 2 et 3a par une isobare : sélectionnez les deux lignes 2 et 3 en même temps, et cliquez sur "Insérer". Un écran de sélection des différentes courbes d'iso-valeurs est proposé. Choisissez "isobare". On vous demande alors de fournir le nombre de points que vous désirez insérer, en vous en proposant 5. Entrez "OK". 5 nouveaux points sont créés dans l'éditeur de points de cycles. Répétez l'opération entre les points 3b et 3, puis cliquez sur "Valider" : le tracé suit maintenant l'isobare 165 bars.

De la même manière, vous pouvez connecter les points 3 et 4 par une isentrope. Dans le diagramme entropique, cela n'aura pas d'effet sensible, mais le tracé sera amélioré dans les autres types de diagrammes.

Si vous désirez sauver ce cycle, ouvrez l'éditeur de points de cycles, entrez le titre et le descriptif que vous souhaitez et sauvez le cycle.



Changement de la couleur du cycle

Il est possible de choisir la couleur du cycle de la même manière que vous le faites pour les courbes du diagramme. La ligne de menu "Gestionnaire de cycle" du menu "Cycle" vous permet d'ouvrir l'écran ci-contre. Si vous cliquez sur "Mettre à jour la table des cycles", tous les cycles déjà chargés sont affichés.

Sur la figure, deux cycles sont chargés : le cycle par défaut qui est "actif", et un second qui a été chargé à partir d'un fichier.

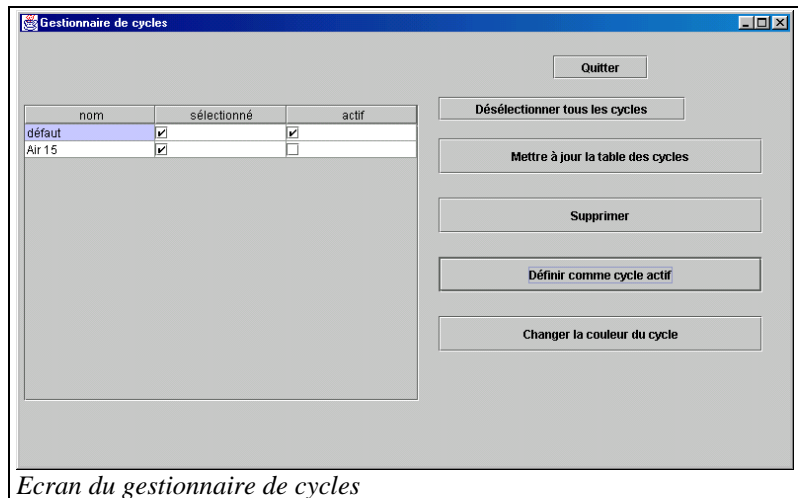
Le titre du cycle tel qu'il a été défini dans l'éditeur de points de cycle est affiché comme nom.

Vous sélectionnez le cycle actif en choisissant sa ligne et en cliquant sur "Définir comme cycle actif". Le cycle actif a les propriétés suivantes :

- il est connecté au simulateur
- c'est celui sur lequel opèrent les lignes du menu "Cycle", c'est-à-dire qu'il peut être effacé, sauvé, que ses points peuvent être édités dans l'éditeur de points de cycles...

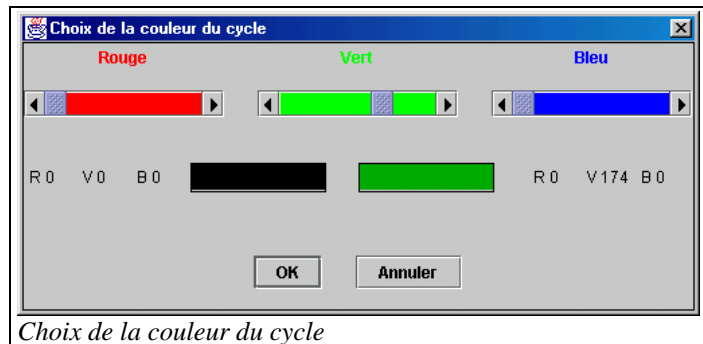
Si vous double-cliquez sur une ligne, vous changez son statut dans la colonne "sélectionné": s'il est coché, le cycle est tracé sur le diagramme, sinon il ne l'est pas.

Vous pouvez désélectionner tous les cycles en cliquant sur "Désélectionner tous les cycles". Vous pouvez supprimer un cycle de la liste en sélectionnant sa ligne et en cliquant sur "Supprimer". Son tracé est aussi supprimé du diagramme.



Ecran du gestionnaire de cycles

Pour changer la couleur d'un cycle, sélectionnez sa ligne et cliquez sur "Changer la couleur du cycle". Un écran vous permettant de choisir sa couleur est affiché. Pour sauver la nouvelle couleur, définissez ce cycle comme le cycle actif, et sauvez-le.



Choix de la couleur du cycle

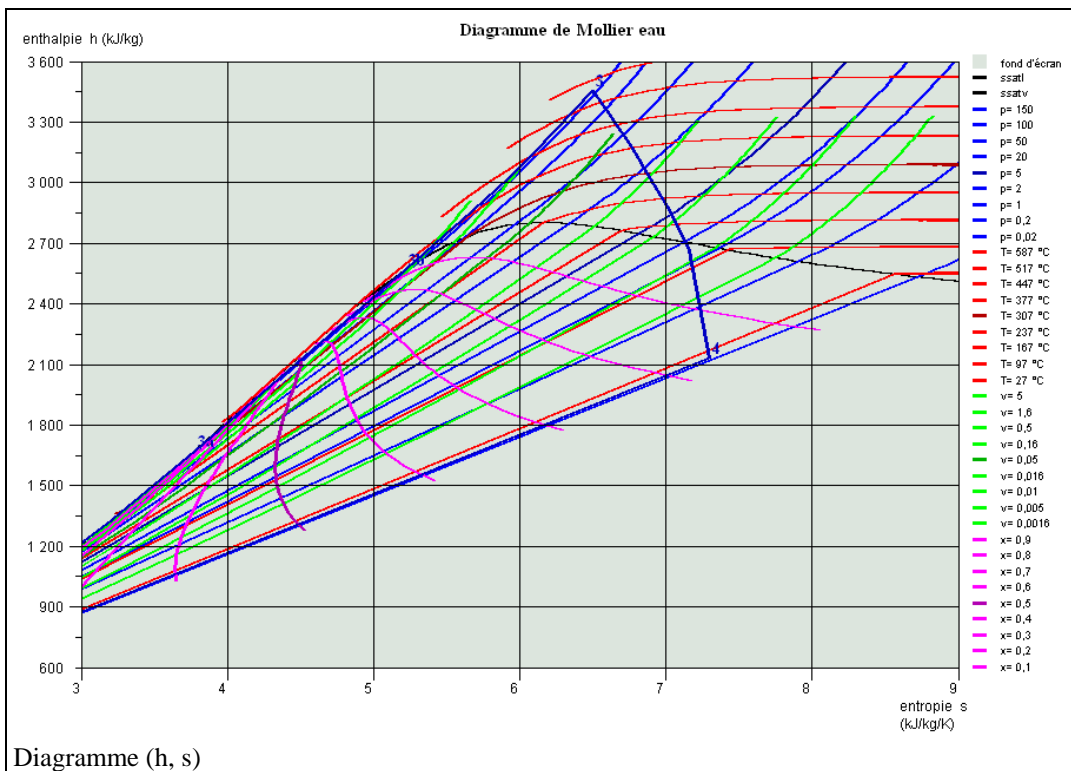
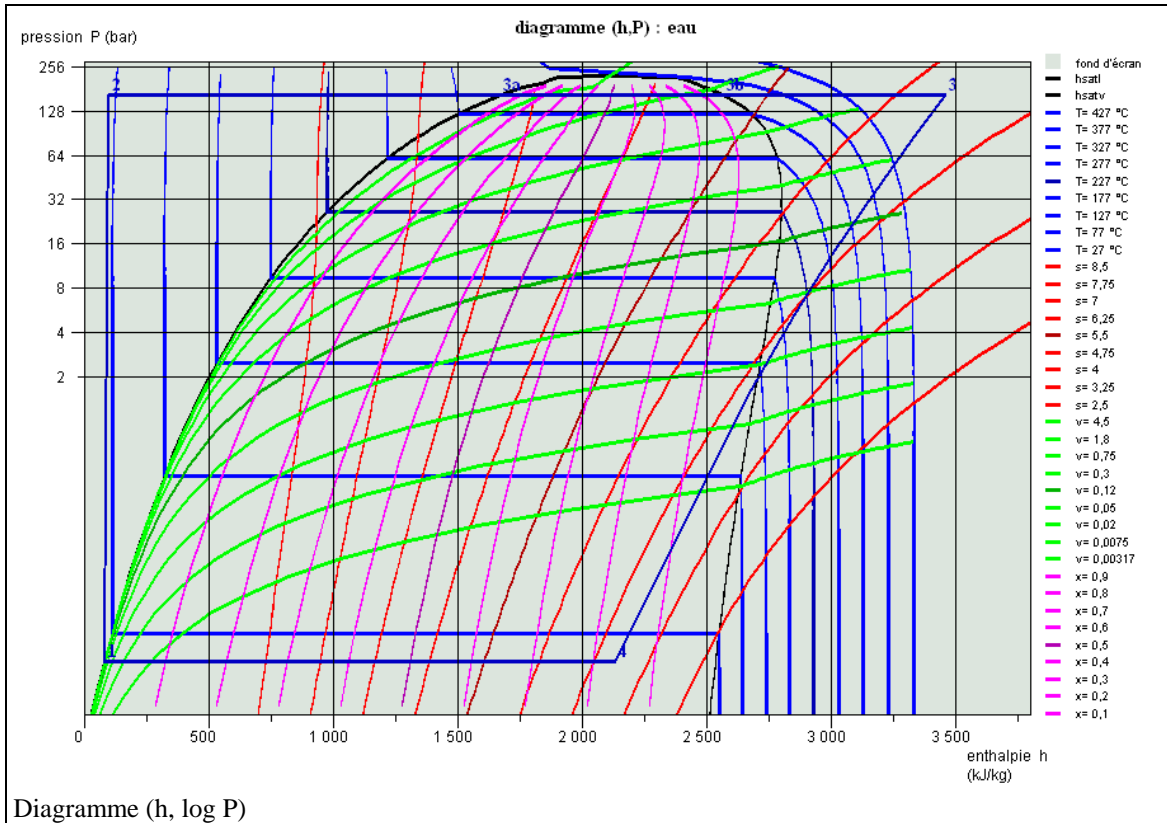
Supprimer le cycle actif revient à l'effacer à partir du menu du diagramme. Pour générer un nouveau cycle actif, vous pouvez soit définir un autre cycle comme actif, soit créer des points sur le diagramme, ouvrir l'éditeur de points de cycles et valider.

Superposition de plusieurs cycles sur un diagramme

Pour tracer plusieurs cycles sur un même diagramme, il suffit de les charger successivement à partir de différents fichiers et de les sélectionner dans le gestionnaire de cycles. Ils apparaissent automatiquement sur le diagramme.

CHANGEMENT DE TYPE DE DIAGRAMME

Vous pouvez changer de type de diagramme en sélectionnant la ligne correspondante dans le menu "Graphe" :

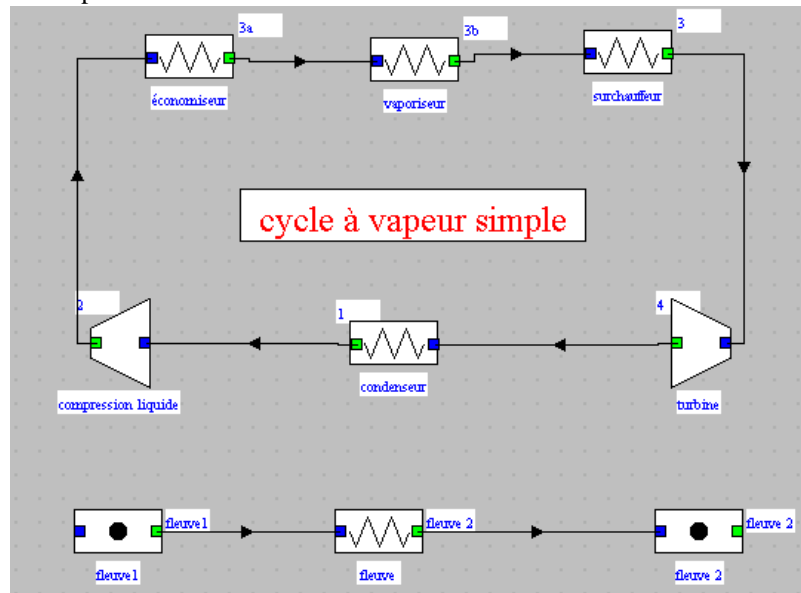


DIMENSIONNEMENT DU CONDENSEUR

Pour dimensionner le condenseur, il faut introduire un fluide de refroidissement, par exemple l'eau d'un fleuve, qui sera représenté par une entrée et une sortie de fluide, plus une transfo-échange (fleuve). Pour les entrées et sortie de fluide, en amont ("fleuve 1" à 10 °C et 1 bar) et en aval du condenseur ("fleuve 2" à T et 1 bar), le mieux est d'utiliser des transfos-points.

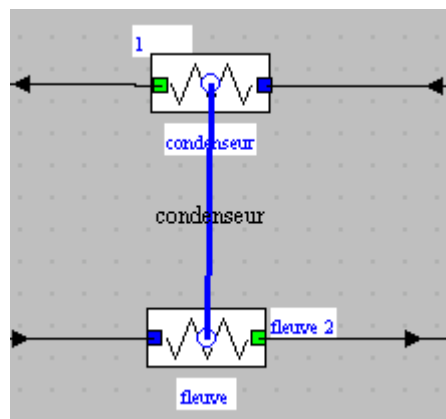
Placez ces composants sur le panneau de travail comme précédemment, puis créez les types correspondants du simulateur en entrant la valeur provisoire $T = 15 \text{ °C}$ pour "fleuve 2", et, pour les pincements minimaux, une valeur de 8 K pour la transfo fleuve (échange thermique entre liquides), et de 6 K pour le condenseur.

Le schéma a maintenant l'aspect suivant :



Pour créer l'échangeur, positionnez la souris sur le condenseur ou la transfo "fleuve". Au centre du composant apparaît un petit cercle bleu, qui est un port de connexion d'échangeur. Cliquez dessus, et, en maintenant la souris appuyée, dirigez-la au-dessus du port correspondant de l'autre composant (la transfo "fleuve" ou le condenseur).

Le nom de l'échangeur est alors demandé. Une fois que vous l'avez indiqué, l'échangeur est symbolisé par un lien entre les deux transfos :



Pour que l'échangeur soit créé dans l'environnement du simulateur, double-cliquez sur le lien. L'écran suivant est affiché :

nom	condenseur	type	contre-courant	<	>	Sauver
				liens	Supprimer	Fermer
fluide chaud			fluide froid			
	condenseur	afficher		fleuve	afficher	Calculer
Tce (°C)	19,74562	<input type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	Tfe (°C)	10	<input type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	
Tcs (°C)	19,64562	<input type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	Tfs (°C)	14,87281	<input type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	
mc	1	<input type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	mf	100,47186837	<input type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	
Cpc	20 507,64190932		Cpf	4,18882068		
DHc			DHf			
<input checked="" type="checkbox"/> non contraint			UA		<input type="checkbox"/> dimensionnement	
<input type="checkbox"/> pincement minimum			R		<input type="checkbox"/> non nominal	
<input type="checkbox"/> efficacité imposée			NUT			
epsilon			DTML			

Par défaut, il est de type contre-courant ; les valeurs des températures et des débits sont mises à jour à partir des transfos, et les chaleurs massiques moyennes dans l'échangeur évaluées.

Lorsque, comme c'est le cas dans le condenseur, la température de sortie d'un des fluides est égale à sa température d'entrée, un écart de 0,1 K est imposé.

Pour dimensionner l'échangeur, il faut maintenant préciser d'une part son type (ici, contre-courant), et d'autre part quels températures et débits doivent être calculés, les autres étant imposés.

On peut montrer (voir manuel de référence) que le problème comporte cinq degrés de liberté et que l'un des deux débits au moins doit être spécifié.

Pour les températures, on peut définir des contraintes explicites (valeur fixée) ou des contraintes implicites : on impose une valeur pour l'efficacité de l'échangeur, ou encore que le pincement soit égal à une valeur minimale.

Pour imposer une valeur de l'efficacité, il faut entrer cette valeur en face de ϵ , puis cliquer sur le bouton "efficacité imposée". Pour imposer un "pincement minimal", il suffit de cliquer sur le bouton correspondant ; par défaut, le progiciel calcule le pincement minimal comme étant égal à la demi-somme des pincements minimaux définis dans chacune des transfos que l'échangeur apparie, mais vous pouvez aussi entrer la valeur de votre choix et c'est elle qui sera prise en compte. Si vous double-cliquez dans le champ du pincement, la valeur par défaut est recalculée.

Supposons par exemple que l'on impose un pincement minimum, ainsi que les températures et le débit du condenseur, et la température d'entrée de l'eau du fleuve.

Pour dimensionner l'échangeur, sélectionnez le mode de calcul "dimensionnement", et cliquez sur le bouton "Calculer". On notera que le dimensionnement des échangeurs se fait toujours avec l'hypothèse implicite que les propriétés thermophysiques du fluide restent constantes tout au long de l'échangeur, alors que cette hypothèse n'est pas faite lors du calcul des transfos. Il en résulte que, lorsque l'on recalcule une température sur la base des équations des échangeurs, de légers écarts peuvent exister entre la valeur du module d'échange et celle de la transfo correspondante.

Pour obtenir une très bonne précision, il faut itérer en faisant plusieurs dimensionnements. Après deux ou trois calculs, vous obtenez le résultat suivant :

nom	condenseur	type	contre-courant	<	>	Sauver
				liens	Supprimer	Fermer
fluide chaud			fluide froid			
	condenseur	affiche		fleuve	affiche	Calculer
Tce (°C)	19,74562	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	Tfe (°C)	10	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	
Tcs (°C)	19,64562	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	Tfs (°C)	12,74562	<input type="checkbox"/> imposé <input checked="" type="checkbox"/> calculé	
mc	1	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	mf	178,25499	<input type="checkbox"/> imposé <input checked="" type="checkbox"/> calculé	
Cpc	20 507,6		Cpf	4,19018031		
DHc	0		DHf	0		
<input type="checkbox"/> non contraint			UA	248,50970216	<input checked="" type="checkbox"/> dimensionnement	
<input checked="" type="checkbox"/> pincement minimum	DTmin	7	R	0,0364216461	<input type="checkbox"/> non nominal	
<input type="checkbox"/> efficacité imposée	epsilon	0,281729096	NUT	0,332712364		
			DTML	0		

L'efficacité vaut $\varepsilon = 0,28$, le nombre d'unités de transfert est $NUT = 0,33$, le rapport des capacités calorifiques est $R = 0,0364$, et le produit de la surface d'échange par le coefficient d'échange est $UA = 248,5$ kW/K. Le débit d'eau du fleuve est égal à 178 kg/s. La différence de température moyenne logarithmique $DTML$ vaut 8,25 K.

L'enthalpie échangée est égale à 2 051 kW, et la température de rejet de l'eau du fleuve, que vous aviez initialisée à 15 °C, est recalculée à 12,74 °C, le pincement minimal étant égal à 6 K pour l'eau qui se condense, et 8 K pour le fleuve, ce qui conduit à une valeur de $(6 + 8)/2 = 7$ K pour l'échangeur. Si l'on impose non plus le pincement minimal, mais par exemple une efficacité égale à 0,5, le résultat est le suivant :

nom	condenseur	type	contre-courant	<	>	Sauver
				liens	Supprimer	Fermer
fluide chaud			fluide froid			
	condenseur	affiche		fleuve	affiche	Calculer
Tce (°C)	19,74562	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	Tfe (°C)	10	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	
Tcs (°C)	19,64562	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	Tfs (°C)	14,87281	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	
mc	1	<input checked="" type="checkbox"/> imposé <input type="checkbox"/> calculé	mf	100,47166304	<input type="checkbox"/> imposé <input checked="" type="checkbox"/> calculé	
Cpc	20 507,6		Cpf	4,18882068		
DHc	-2 050,76		DHf	2 050,76		
<input type="checkbox"/> non contraint			UA	293,39674489	<input checked="" type="checkbox"/> dimensionnement	
<input type="checkbox"/> pincement minimum	DTmin	7	R	0,0205220396	<input type="checkbox"/> non nominal	
<input checked="" type="checkbox"/> efficacité imposée	epsilon	0,5	NUT	0,697139886		
			DTML	6,98971627		

L'efficacité vaut $\varepsilon = 0,5$, le nombre d'unités de transfert est $NUT = 0,697$, le rapport des capacités calorifiques est $R = 0,02$, et le produit de la surface d'échange par le coefficient d'échange est $UA = 293$ kW/K. Le débit d'eau du fleuve est égal à 100 kg/s. Le $DTML$ vaut 7 K.

La température de rejet de l'eau du fleuve est maintenant égale à 14,87 °C. On notera que le pincement est inférieur à la valeur minimale indiquée dans les transfos. THERMOPTIM accepte ce résultat : c'est à l'utilisateur de s'assurer que les données qu'il entre sont cohérentes. En demandant une efficacité supérieure à celle qu'il obtient pour les conditions de pincement minimal, l'utilisateur décide de ne pas respecter cette contrainte.

En faisant varier les différents paramètres, il est ainsi possible de tester divers dimensionnements du condenseur .

Les fichiers de schéma et de projet correspondant sont respectivement vap_con.dia et vap_cond.prj.

AMELIORATIONS DU CYCLE

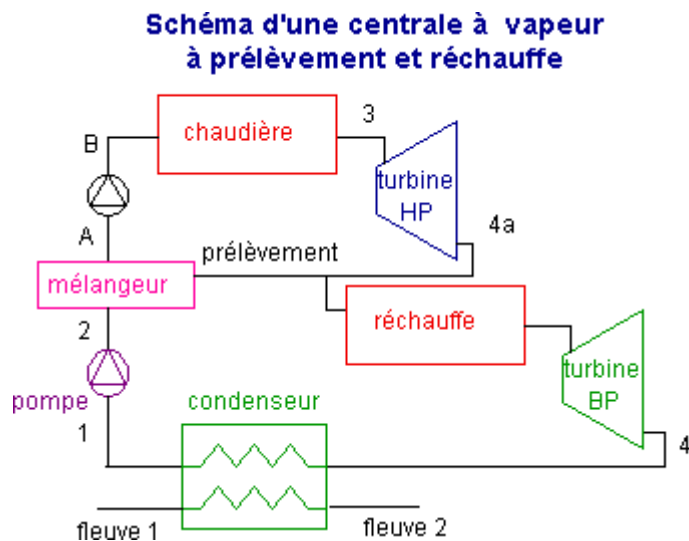
CYCLE AVEC RESURCHAUFFE

Pour améliorer le cycle de Hirn, on cherche à se rapprocher du cycle de Carnot en effectuant des resurchauffes. Dans ce cas, on commence par détendre partiellement la vapeur, puis on la refait passer dans la chaudière, où elle est réchauffée, à la nouvelle pression, jusqu'à la température maximale du cycle. Cette opération peut le cas échéant être répétée plusieurs fois, ce qui permet d'approcher une paroisotherme, et donc d'augmenter le niveau moyen de la température du cycle côté source chaude.

Il en résulte des gains de rendement de quelques pour-cent, et surtout, comme le montre le schéma de la page suivante, une augmentation du titre en fin de détente, ce qui est toujours intéressant pour prolonger la durée de vie des aubages de turbine, pour qui les gouttelettes de liquide constituent des abrasifs redoutables. Le prix à payer est cependant une complexité plus élevée, mais, comme la détente doit de toute manière être fractionnée, cette amélioration n'a pas d'incidence technologique majeure sur la centrale.

CYCLE AVEC PRELEVEMENT

Une autre manière d'améliorer le cycle est d'effectuer une régénération partielle, pour utiliser une partie de la chaleur rejetée pendant la détente pour préchauffer l'eau liquide après qu'elle ait été comprimée par la pompe.



L'enthalpie de la vapeur étant très largement supérieure à celle du liquide, du fait de la chaleur latente de vaporisation, on conçoit qu'il est possible d'assurer le préchauffage du liquide grâce à un faible prélèvement de vapeur en cours de détente.

Il importe de noter que, lorsqu'il y a prélèvement, le débit-masse de fluide qui évolue n'est pas le même dans l'ensemble de la machine. Si on prélève une fraction ε de vapeur, et pour un débit masse unitaire, le débit qui transite entre les points 4a, 3c, 4, 1 et A est égal à $(1 - \varepsilon)$, et celui qui évolue entre les points A, 3a, 3b, 3 et 4a est égal à 1.

Bien entendu, pour que l'opération soit possible, il faut que la vapeur prélevée au point P soit à une température supérieure à celle du liquide, ce qui fait qu'en pratique, on se contente d'un réchauffage partiel jusqu'au point A. On peut en particulier combiner resurchauffe et prélèvement en prélevant la vapeur juste avant la resurchauffe.

Vous allez introduire dans le cycle étudié précédemment une resurchauffe à 30 bar et un prélèvement de 15 %, et examiner l'impact que ces modifications ont sur le rendement du cycle.

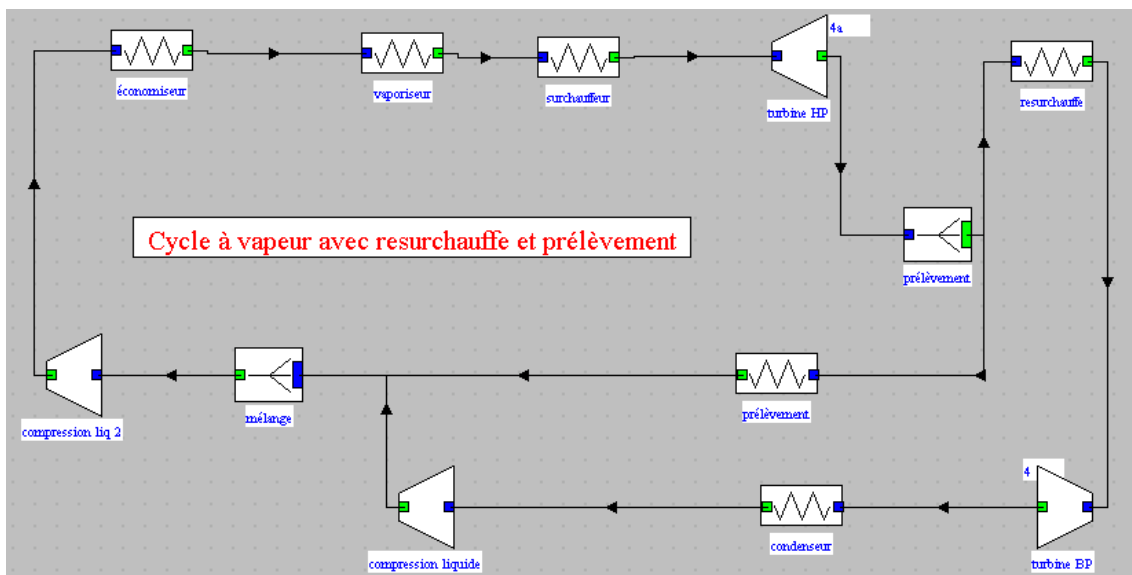
MODIFICATION DU MODELE

Pour introduire la resurchauffe, vous devez introduire deux nouvelles transfos, pour représenter la seconde détente (3c-4) (énergie utile) et la réchauffe (4a-3c) (énergie payante). Pour plus de clarté, la première détente sera renommée turbine HP, et la seconde turbine BP.

Pour introduire le prélèvement, il faut introduire un diviseur, représentant la scission de la veine principale à la fin de la première détente, et un mélangeur. De plus, il faut prévoir une mise en pression en deux temps : de 0,023 à 30 bar entre les points 1 et 2 par la première pompe, et de 30 à 165 bar entre le point A et un point B par une seconde pompe.

Le prélèvement de 15 % sera représenté par une transfo-point associant le débit 0,15 au point 4a.

Une fois les composants positionnés et nommés, vous pouvez les connecter, obtenant ainsi un schéma semblable à celui-ci :



Pour créer les types correspondants dans l'environnement du simulateur, utilisez l'interface avec l'éditeur de schémas. Le point 4a est défini par sa pression, 30 bar, la resurchauffe par la température du point 3c, égale elle aussi à 560 °C, et la turbine BP a le même rendement isentropique que la turbine HP (0,85). Une fois les composants transférés dans le simulateur, vous pouvez entrer ces paramètres.

Le mélangeur est calculé automatiquement, mais le diviseur doit savoir comment répartir le débit de la veine principale, ce qui est fait en spécifiant la valeur des facteurs de débit des différentes branches. Etant

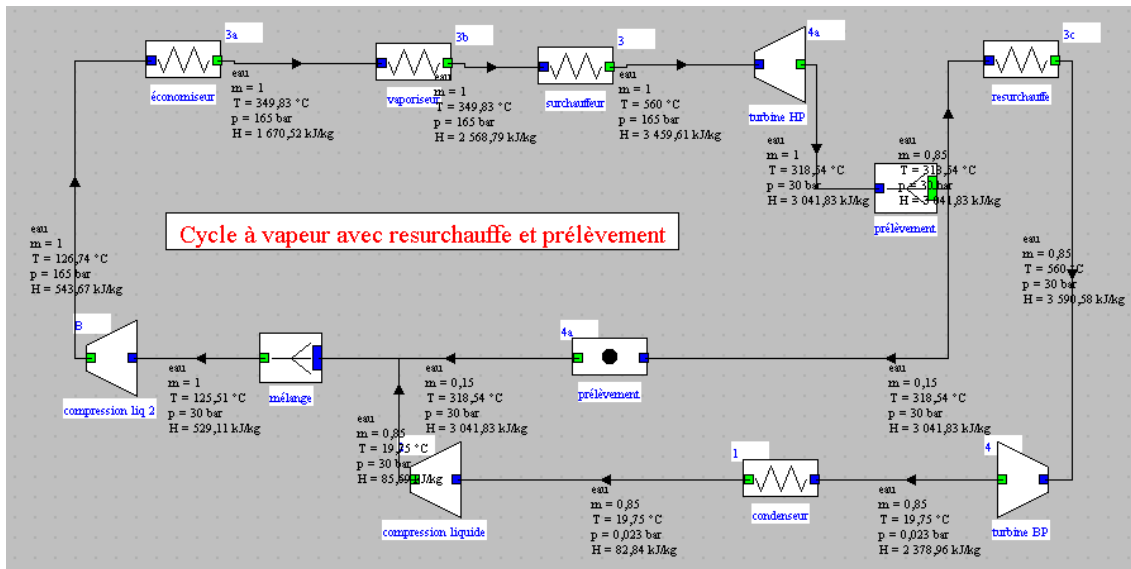
donné que le prélèvement est de 15 %, entrez 0,15 sur cette branche, et 0,85 sur l'autre représentant le condenseur.

Vous pouvez alors recalculer la turbine HP, pour obtenir l'état du point 4a, puis le diviseur, et les différents composants aval.

Vous obtenez le bilan du cycle en cliquant sur le bouton "Bilan", ce qui donne :

Bilan	
efficacité	0,422977
énergie utile	1 430,67
énergie payante	3 382,38

La puissance utile est maintenant de 1 430 kJ/kg et le rendement du cycle vaut 42,3 %. Vous pouvez aussi afficher l'ensemble des résultats sur le schéma :



Les fichiers de schéma et de projet correspondant sont respectivement vap_prel.dia et vap_prel.prj.

ETUDES PARAMETRIQUES SUR LES NIVEAUX DE PRESSION

Le cycle à vapeur étudié ci-dessus met en jeu trois niveaux de pression différents. Si l'on désire faire des études de sensibilité sur ces niveaux de pression, il est intéressant de pouvoir les faire varier simultanément dans l'ensemble des points.

On définit pour cela, dans l'environnement du simulateur, des "pressions imposées", auxquelles on associe les points concernés.

Pour créer une pression imposée, double-cliquez dans le bandeau de la table qui porte ce nom, en haut à droite de l'écran principal de projet :

pression de contrôle

nom HP

valeur 165

liens

Sauver

Supprimer

Imposer la pression

Donnez un nom (ici "HP"), et entrez la valeur correspondante de la pression puis sauvez.

Répétez l'opération pour la basse pression (0,03 bar), et la pression intermédiaire (30 bar).

Vous pouvez alors associer à chaque point du cycle une pression imposée, en sélectionnant "pression contrôlée", puis en double-cliquant dans le champ qui apparaît juste en dessous, et en sélectionnant la bonne pression dans la liste proposée :

projet ex. 3 cycle vapeur

point 3a

corps eau

liens

Dupliquer

Sauver

Supprimer

Fermer

Système ouvert (T,p,h) Système fermé (T,v,u) Gaz humides

p (bar) 165 h (kJ/kg) 1 670,51998915

pression contrôlée

HP

p et h connus

p et T connus

facteur de correction 1

Le facteur de contrôle est un facteur multiplicatif de la valeur de la pression, qui vous permet de simuler par exemple l'existence de pertes de charge.

Vous pouvez maintenant effectuer des tests de sensibilité, par exemple sur la pression MP. Si vous fixez sa valeur à 8 bar au lieu de 30, puis cliquez sur "Imposer la pression", tous les points à la pression MP sont mis à 8 bar. Vous pouvez alors recalculer l'ensemble du cycle, ce qui donne une légère amélioration du bilan :

Bilan	
efficacité	0,425272
énergie utile	1 544,47
énergie payante	3 631,71

