

THERMOPTIM®

PRISE EN MAIN

EXEMPLE D'UN CYCLE DE REFRIGERATION

VERSION JAVA 2.5

© R. GICQUEL MARS 2020

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| PRISE EN MAIN DE THERMOPTIM | 3 |
| NOTIONS DE BASE | 3 |
| CREATION DU SCHEMA | 4 |
| CREATION DES ELEMENTS DU SIMULATEUR | 7 |
| PARAMETRAGE DES POINTS | 9 |
| PARAMETRAGE DES TRANSFOS | 9 |
| TRACE DU CYCLE SUR DIAGRAMME THERMODYNAMIQUE | 11 |
| AMELIORATIONS DU TRACE DES CYCLES | 12 |
| <i>Liaison des points par des lignes d'iso-valeurs.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Changement de la couleur du cycle</i> | <i>13</i> |
| <i>Superposition de plusieurs cycles sur un diagramme</i> | <i>14</i> |
| CHANGEMENT DE TYPE DE DIAGRAMME | 14 |
| CYCLE DE REFRIGERATION BIETAGE A INJECTION TOTALE..... | 15 |

© 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 deux 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 Thermoptim. 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 Thermoptim 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.

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

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>

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.

EXEMPLE DE CYCLE DE REFRIGERATION

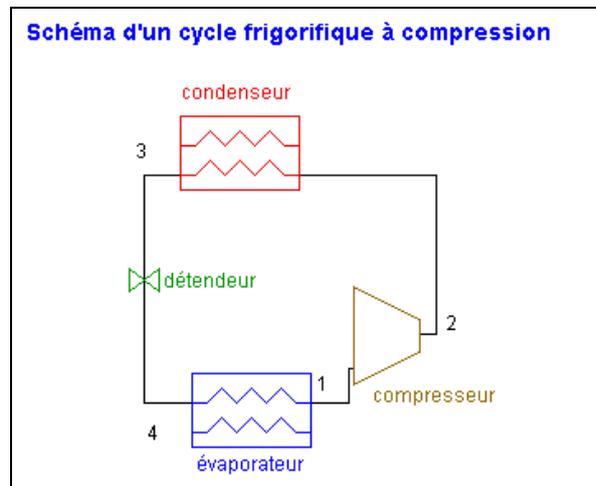
Un cycle de réfrigération par compression de R134A fonctionne entre une pression d'évaporation de 1 bar et une pression de condenseur de 12 bar.

Avant d'entrer dans le compresseur, le gaz est surchauffé de 5 K au-dessus de la température de saturation, et avant d'entrer dans le détendeur, le liquide est sous-refroidi de 5K. Le rendement isentropique du compresseur est égal à 0,75.

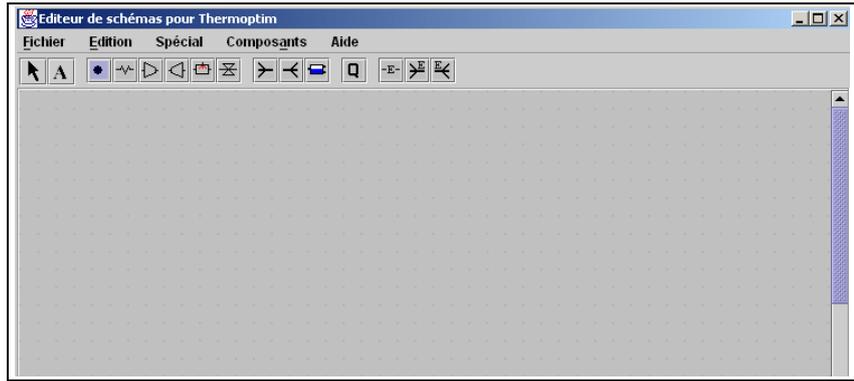
On cherche à modéliser le cycle de réfrigération et à calculer son rendement.

Création du schéma

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

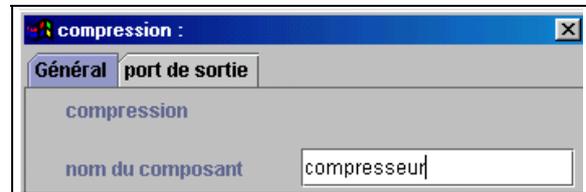


Il comporte une palette présentant les différents composants représentables (échanges de chaleur, compresseurs, organes de détente, chambres de combustion, mélangeurs, diviseurs, séparateurs, sources externes), et un panneau de travail où l'on place ces composants et où on les interconnecte par des liens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

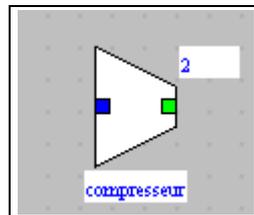


Le schéma du cycle frigorifique indique sans ambiguïté les composants à sélectionner : le compresseur , le condenseur, que l'on représentera ici en fait par deux transformations de type échange de chaleur , afin de distinguer les différentes phases de refroidissement du R134a (à l'état gazeux dans le désurchauffeur, en train de se condenser dans le condenseur), le détendeur, qui est un laminage , et l'effet frigorifique, qui est du type échange .

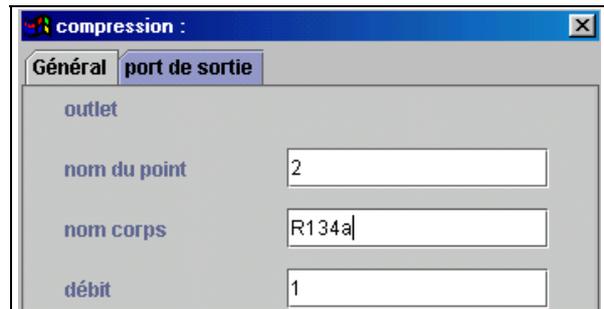
Commencez par sélectionner le compresseur et placez-le sur le panneau de travail. Une fenêtre à onglets de définition du composant vous est proposée. Commencez par entrer son nom.



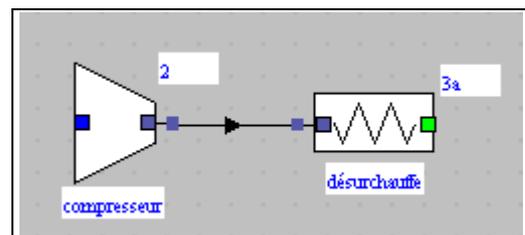
Cliquez ensuite sur l'onglet du port de sortie, et entrez le nom du point de sortie (2), le nom du corps (R134a), et le débit (1 kg/s). Cliquez ensuite sur le bouton "Appliquer" pour valider les deux onglets. Le composant apparaît à l'écran :



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

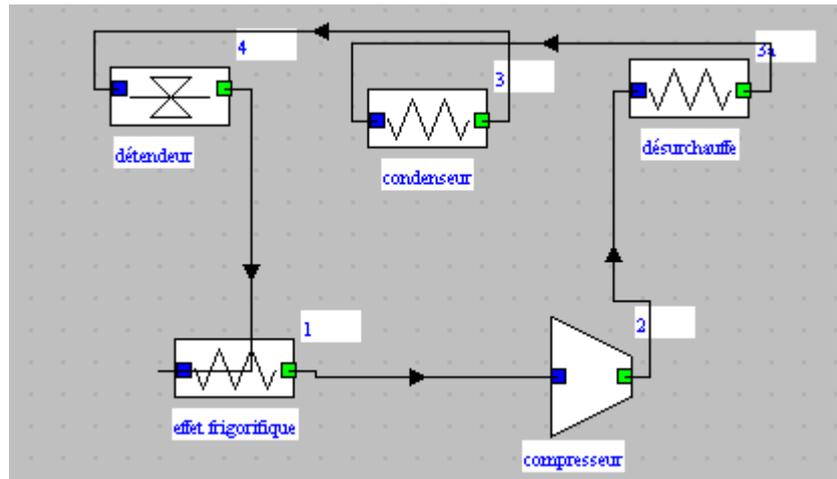


Vous pouvez alors commencer à connecter entre eux ces composants. Pour cela, cliquez sur le port de sortie (vert) du compresseur, et faites glisser la souris jusqu'au port d'entrée du composant auquel il doit être relié (ici la désurchauffe), et relâchez le clic. Un lien orienté apparaît alors.



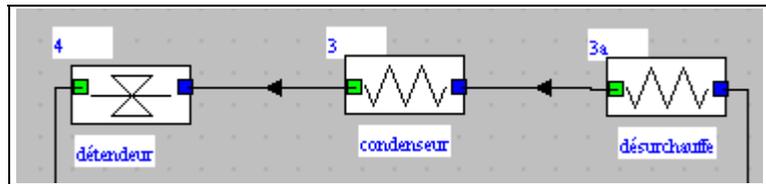
Continuez à créer les autres composants (le condenseur, le détendeur et l'effet frigorifique) et connectez-les. Vous obtenez le résultat suivant :

Lorsque l'on clique sur un port, la flèche de la souris se transforme en mire. Il peut arriver exceptionnellement que cette transformation ne se fasse pas s'il se trouve que le port est situé sous un lien existant ou dans la zone couverte par un lien. Dans ce cas, une bulle d'aide affiche "lien direct" ou "Echangeur de chaleur", et le lien incriminé est sélectionné lors du clic. La solution consiste alors à déplacer légèrement le composant pour que son port ne soit plus masqué.



La figure ci-dessus illustre cette situation : le lien entre les deux composants peut masquer le port de sortie du condenseur, du fait qu'ils sont alignés et que ce dernier est orienté de gauche à droite tandis que la désurchauffe l'est de droite à gauche. On rétablit la situation en le déplaçant légèrement vers le bas ou vers le haut ou en retournant le condenseur comme indiqué ci-dessous.

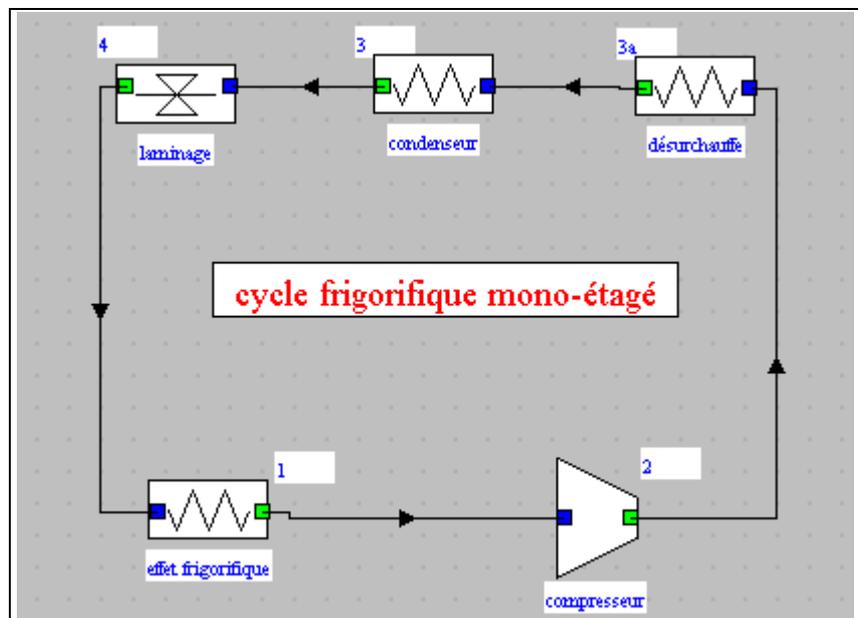
Au niveau de la désurchauffe, du condenseur et du détendeur, les liens s'entrecroisent, étant donné que, par défaut, les composants sont orientés de droite à gauche. Pour obtenir un meilleur effet visuel, sélectionnez ces composants, et activez la ligne "Miroir vertical" du menu Edition, ou tapez sur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



Après quelques repositionnements, on obtient 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 la désurchauffe ou le compresseur.

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.



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

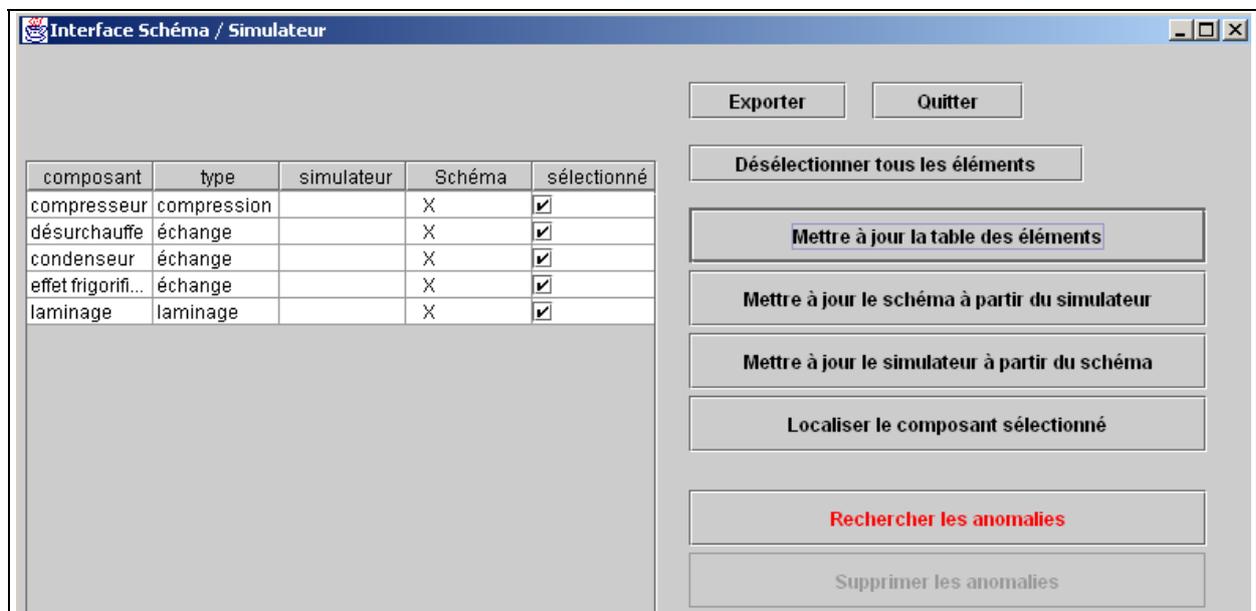
En connectant les composants, vous avez propagé certaines informations de l'amont vers l'aval, de telle sorte que tous les noms et les corps des ports d'entrée sont initialisés automatiquement, comme vous pouvez le vérifier en sélectionnant un composant et en faisant afficher ses propriétés (F4 ou menu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

Création des éléments 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. Cliquez alors sur le bouton "Mettre à jour la table des éléments". L'écran de la page suivante 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 frigo". 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 frigo
Schéma associé : cycle frigo mono-étagé

5 POINTS

| nom du point | corps | P (bar) | T (°C) |
|--------------|-------|---------|--------|
| 1 | R134a | 1 | 26,85 |
| 2 | R134a | 1 | 26,85 |
| 3a | R134a | 1 | 26,85 |
| 3 | R134a | 1 | 26,85 |
| 4 | R134a | 1 | 26,85 |

5 TRANSFOS

| nom transfo | point amont | point aval | type transfo |
|--------------------|-------------|------------|--------------|
| effet frigorifique | 4 | 1 | échange |
| condenseur | 3a | 3 | échange |
| désurchauffe | 2 | 3a | échange |
| compresseur | 1 | 2 | compression |
| laminage | 3 | 4 | laminage |

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 colorisés 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.

Cinq points et cinq 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).

Paramétrage des points

Commencez par paramétrer le point 1 représentant le gaz en entrée de compresseur :

Le point est calculé en système ouvert. Sa pression est de 1 bar. Pour prendre en compte la surchauffe de 5 K, imposez la température de saturation ("imposer la température de saturation"), et indiquez un écart de 5 K par rapport à la température de saturation.

Le point 2 est en sortie du compresseur. Sa pression est de 12 bar et sa température est inconnue.

Le point 3a en sortie de désurchauffeur est à 12 bar et sur la courbe de saturation, avec un titre égal à 1, et le point 3 en sortie de condenseur à 12 bar, à l'état liquide, avec un sous-refroidissement de 5 K (écart $T_{sat} = -5$).

Le point 4, en sortie de détendeur, est à la pression de 1 bar. Son titre est inconnu.

The screenshot shows the configuration window for point 1. The 'projet' is 'cycle frigo' and 'observée' is unchecked. The 'point' is '1' and 'corps' is 'R134a'. The 'système ouvert (T,P,h)' tab is selected. The pressure 'P (bar)' is set to 1. The 'pression contrôlée' checkbox is unchecked. The enthalpy 'h (kJ/kg)' is 386,69622982, entropy 's (kJ/kgK)' is 1,76388119, and exergy 'exergie (kJ/kg)' is -169,1909. The temperature 'T (°C)' is -21,36784 and 'T (K)' is 251,78. The 'titre' is 1. The 'u (kJ/kg)' is 366,86745195 and 's (kJ/kgK)' is 1,76388119. The 'V (m3/kg)' is 0,198287779. The 'écart Tsat' is 5. The 'calculer' button is visible at the bottom right.

Paramétrage des transfos

Pour calculer le point 2, ouvrez la transfo "compresseur", et sélectionnez "isentropique", de rendement égal à 0,75, choisissez comme mode de calcul "Imposer le rendement et calculer la transfo", puis cliquez sur le bouton "Calculer". Enfin, choisissez le type d'énergie "payante", car le travail de compression doit être fourni au cycle, alors que par défaut les transfos de type compression sont créés avec le type d'énergie "utile". Vous obtenez le résultat suivant :

The screenshot shows the configuration window for a compressor. The 'transfo' is 'compresseur' and 'type' is 'compression'. The 'type énergie' is 'payante'. The 'point amont' is 1 and 'point aval' is 2. The 'rendement isentropique' is 0,75 and 'exposant polytropique' is 1,08726. The 'rapport de pression (>= 1)' is 12. The 'calculer' button is visible at the bottom right.

Pour le désurchauffeur (2-3a), et le condenseur (3a-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".

Le calcul du détenteur est lui aussi très simple : comme il s'agit d'un laminage isenthalpique, il n'y a pas de paramétrage particulier : le titre du point 4 est calculé de telle sorte que son enthalpie soit égale à celle du point 3.

Le calcul de l'effet frigorifique (4-1) ne pose pas de problème non plus une fois le point 4 déterminé. Simplement, étant donné que c'est cet effet qui représente l'énergie utile du cycle, spécifiez ce type en double-cliquant dans le champ "type d'énergie" situé en haut à gauche de l'écran.

transfo effet frigorifique type échange

type énergie utile débit imposé

point amont 4 m ΔH 128,3

T (°C) -26,37 P (bar) 1 h (kJ/kg) 258,39 titre 0,42817

point aval 1

T (°C) -21,37 P (bar) 1 h (kJ/kg) 386,7 titre 1

calculer m ΔH 128,3

calculer débit volumique d'entrée 0,083452130503

calculer débit molaire 0,0098009428507

calculer pincement minimum 0

calculer fluide méthode pinct.

Calculer m ΔH, le point aval étant connu

Imposer m ΔH et modifier le point aval

Le cycle de réfrigération est ainsi complètement décrit et son bilan peut être calculé en cliquant sur "Recalculer" dans l'écran du simulateur.

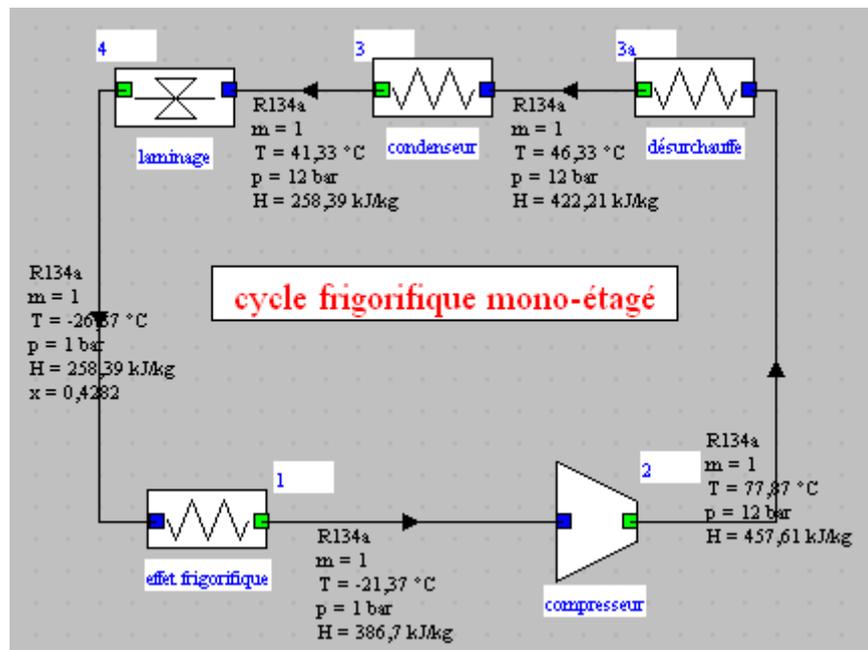
Le travail mécanique de compression est égal à 71 kW, l'effet frigorifique valant 128 kW, ce qui correspond à un C.O.P de 1,8.

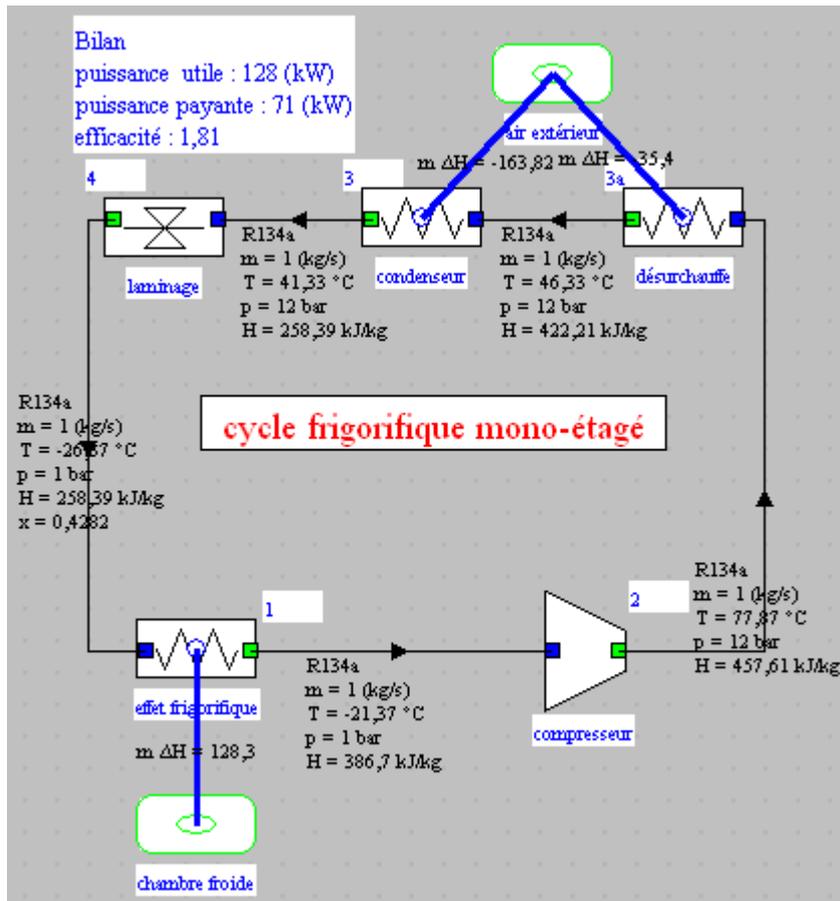
| Bilan | |
|-----------------|------|
| efficacité | 1,81 |
| énergie utile | 128 |
| énergie payante | 71 |

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

Sauvez enfin le fichier de projet, par exemple sous le nom de frigo.prj. Pour améliorer encore la représentation, vous pouvez insérer deux composants de

type "source externe" , l'un correspondant à la chambre froide, et l'autre à l'air de refroidissement, 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.





Tracé 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 le R134a comme corps. Choisissez le type de diagramme que vous désirez dans le menu "Graphe" (ici (T,s)).

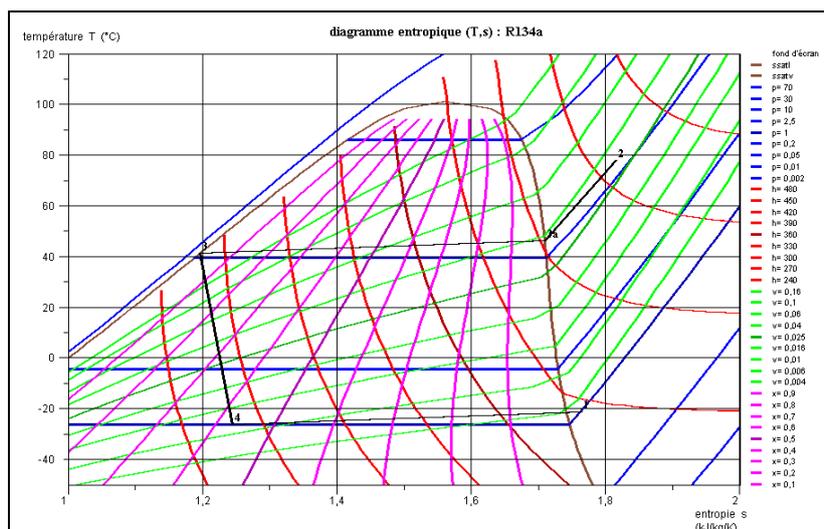


Ensuite, revenez à l'interface et cliquez sur le bouton "Mettre à jour la table des points", ce qui vous donne le résultat ci-dessus.

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.



Améliorations du tracé 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, plusieurs cycles peuvent être superposés 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. Dans notre cycle de réfrigération, en particulier, le sous-refroidissement au condenseur est modélisé globalement, sans que les phases liquide et diphasique soient distinguées.

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.

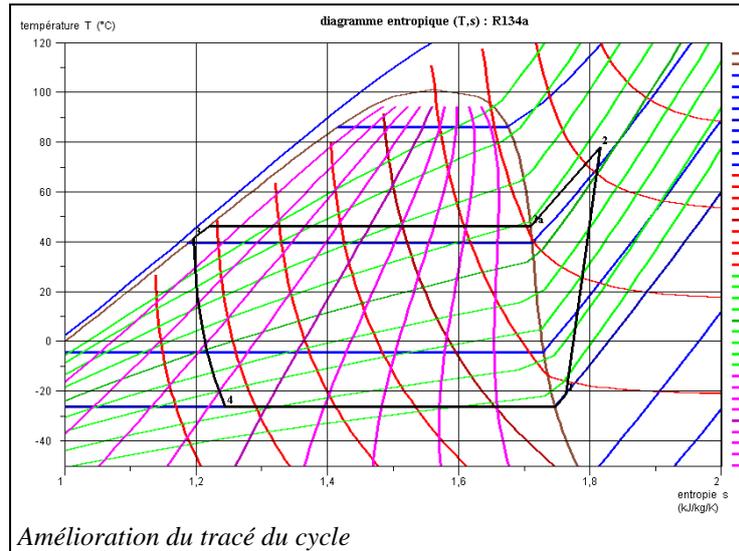
| nom du point | température T (°C) | pression P | enthalpie h | entropie s | volume v | titre x |
|--------------|--------------------|------------|-------------|------------|-------------|----------|
| 2 | 77,86792 | 12 | 457,60777 | 1,81588 | 0,0201711 | 1 |
| 3a | 46,32652 | 12 | 422,21063 | 1,70929 | 0,0167769 | 1 |
| 3 | 41,32652 | 12 | 258,39175 | 1,19619 | 0,000876682 | 0 |
| 4 | -26,36784 | 1 | 258,39175 | 1,24408 | 0,0834521 | 0,428173 |
| 1 | -21,36784 | 1 | 386,69623 | 1,76388 | 0,198288 | 1 |

Commencez par fermer le cycle en sélectionnant la première ligne et en cliquant sur "Insérer", puis sélectionnez la dernière ligne, celle du point 1, 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 3a et 3 par une isobare : sélectionnez les deux lignes 3a 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. Entrez 5. Les nouveaux points sont créés dans l'éditeur de points de cycles. Cliquez sur "Valider" : le tracé suit maintenant l'isobare 12 bars.

Le nombre de points détermine le nombre de segments de droite par lesquels la courbe d'iso-valeurs est approchée. Plus il y en a, plus le tracé est précis.

De la même manière, vous pouvez connecter les points 4 et 1 par une isobare, et les points 3 et 4 par une isenthalpe (5 points suffisent ici). Vous pouvez aussi insérer des points entre les points 1 et 2, en prenant une isentrope comme référence, sachant que les points insérés seront calculés en tenant compte du rendement. Finalement, vous obtenez le tracé ci-contre.

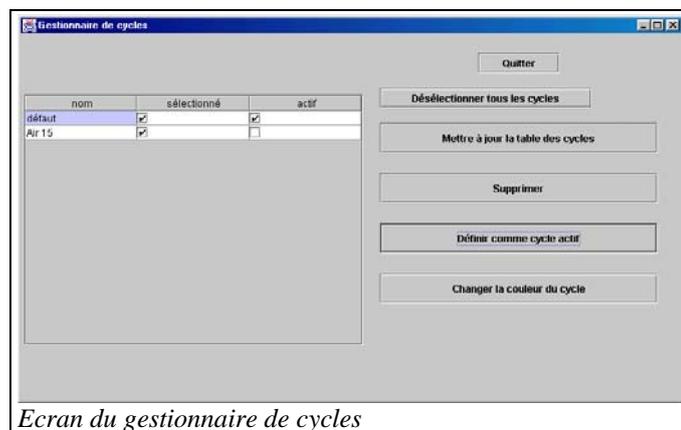


Tous les points insérés peuvent être recalculés un par un si nécessaire (c'est-à-dire si l'un d'entre eux ne correspond pas exactement à vos souhaits). Ils peuvent aussi être supprimés soit un par un soit en groupe, en les sélectionnant et en cliquant sur "Supprimer".

Si vous désirez sauvegarder ce cycle, ouvrez l'éditeur de points de cycles, entrez le titre et le descriptif que vous souhaitez et sauvegardez le cycle comme indiqué plus loin.

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 la sélectionnez, vous ouvrez l'écran ci-contre. Si vous cliquez sur "Mettre à jour la table des cycles", tous les cycles déjà chargés sont affichés. Ici, deux cycles sont chargés : le cycle par défaut qui est "actif", et un second qui a été chargé à partir d'un fichier.



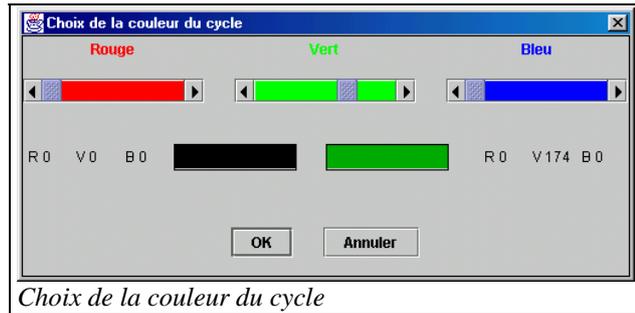
Le titre du cycle tel qu'il a été défini dans l'éditeur de points de cycle est affiché comme nom.

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

- il est connecté au simulateur (dans le cas où les diagrammes interactifs sont connectés à ThermoOptim)
- 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 du gestionnaire de cycles, 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.

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.



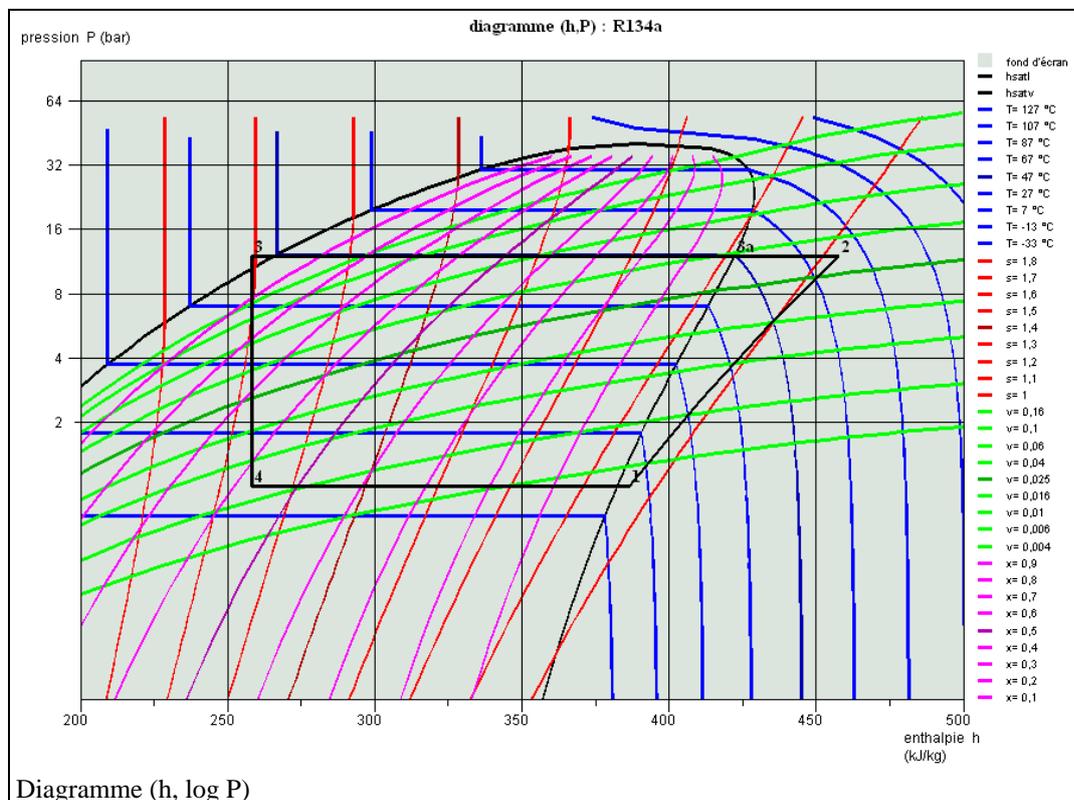
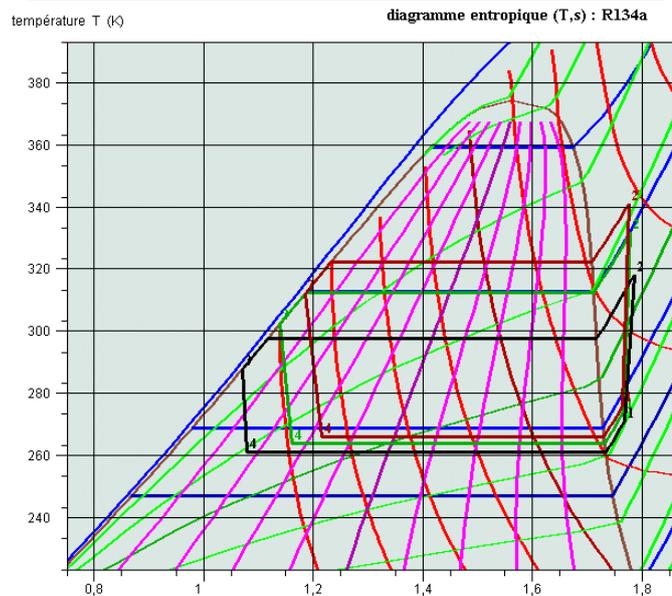
Supprimer le cycle actif revient à l'effacer à partir du menu du diagramme. Pour générer un nouveau cycle actif, vous pouvez soit définir un autre cycle comme actif, soit créer des points sur le diagramme, ouvrir l'éditeur de points de cycles et valider.

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 comme sur la figure ci-contre.

Changement de type de diagramme

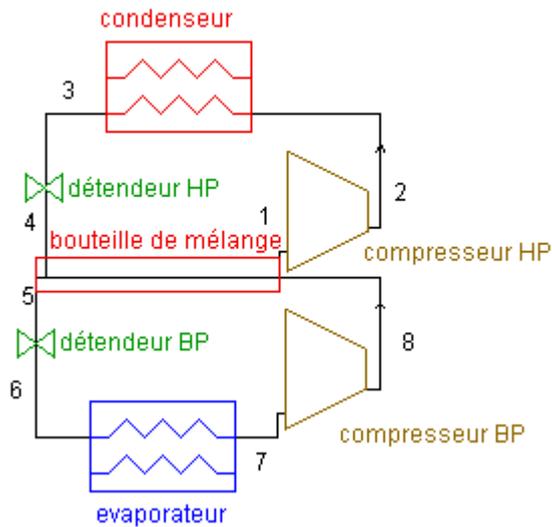
Vous pouvez changer de type de diagramme en sélectionnant la ligne correspondante dans le menu "Graphe" :



CYCLE DE REFRIGERATION BIETAGE A INJECTION TOTALE

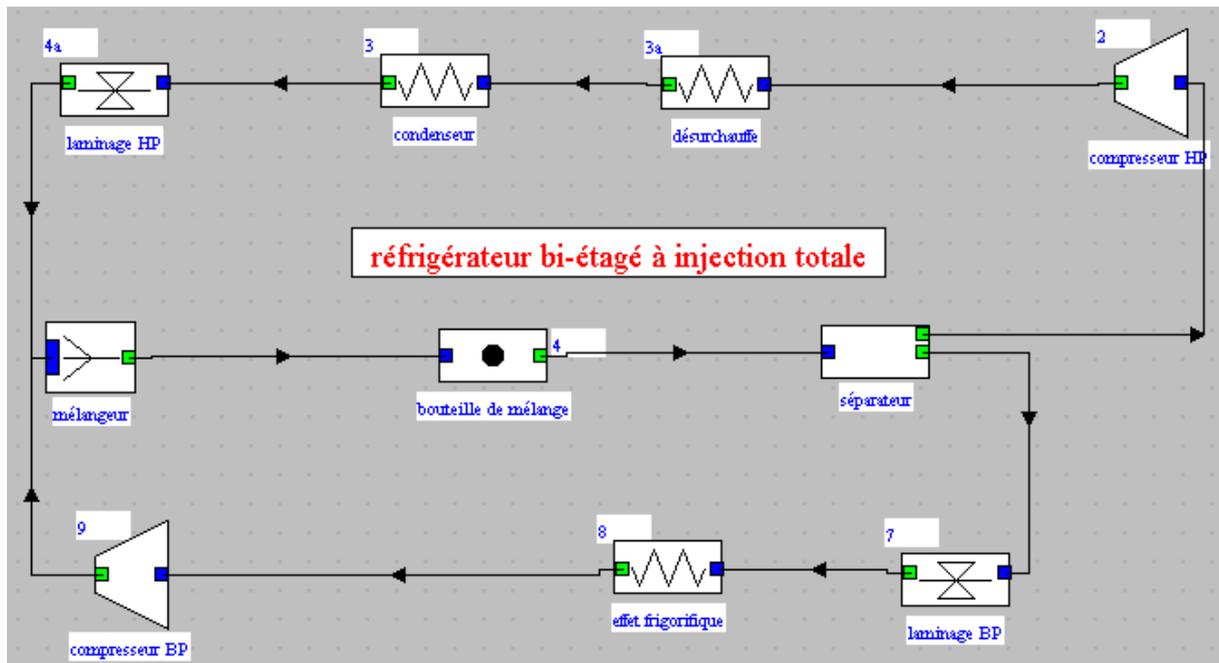
On se propose maintenant d'étudier un cycle de réfrigération biétagé à injection totale travaillant entre les pressions d'évaporation de 1 bar et de condensation de 12 bar, avec une pression intermédiaire de 3,5 bar, selon le schéma suivant :

cycle de réfrigération biétagé à injection totale



Outre les composants utilisés pour le cycle précédent, il nous faut représenter la bouteille de mélange, qui se comporte en fait comme la mise en série d'un mélangeur ➤, qui reçoit le gaz en sortie du compresseur BP, et le fluide diphasique en sortie du détendeur HP, et d'un séparateur ☐, dont le flux liquide est dirigé vers le détendeur BP, et le flux gazeux vers le compresseur HP.

Etant donné que deux nœuds ne peuvent être directement interconnectés, il faut insérer entre eux une transformant, que nous avons appelée "bouteille de mélange". Le résultat que l'on obtient est le suivant :



Transférez ces composants dans l'environnement du simulateur, et paramétrez les différents éléments créés, de manière analogue à ce qui a été fait pour le cycle mono-étagé, en considérant pour chacun des compresseurs un rendement isentropique égal à 0,8.

Le séparateur mérite quelques explications complémentaires :

- tout d'abord, sur le composant graphique, c'est la veine supérieure (la moins dense) qui est la veine gazeuse. Il importe d'y prendre garde lors de l'établissement des connexions.
- ensuite, le séparateur sépare les phases liquide et gazeuse ; s'il est parfait, la séparation correspond exactement au titre en entrée, sinon on peut définir une efficacité de séchage, définie comme le rapport du débit masse réel de liquide au maximum théoriquement possible.

| nom transfo | m abs | T (°C) | H |
|----------------|--------|--------|--------|
| compresseur HP | 1,4834 | 5,04 | 401,41 |
| laminage BP | 1,0007 | 5,04 | 206,87 |

Dans notre cas, nous prendrons la valeur par défaut égale à 1, en supposant la séparation parfaite.

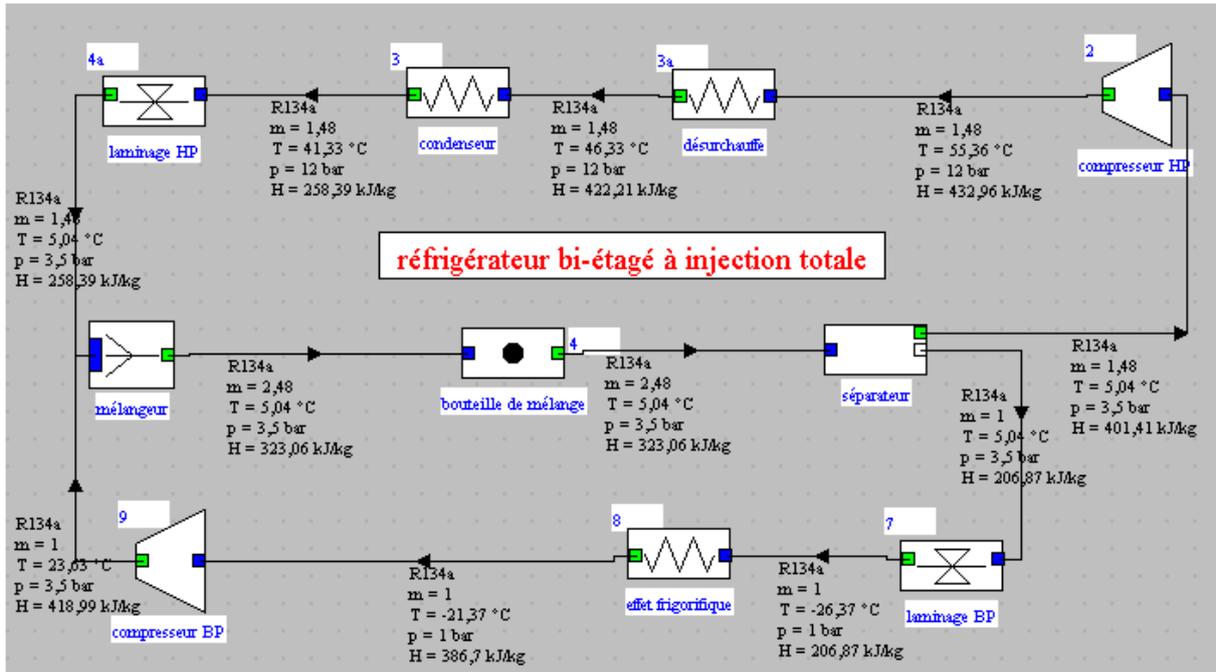
Une fois l'ensemble des points et des transfos paramétrées, on peut calculer les différents éléments un par un, mais avec cependant une difficulté : l'équilibre de la bouteille de mélange dépend à la fois des débits BP et HP et de l'enthalpie des points 4a et 9. En conséquence, les débits liquide et gazeux en sortie du séparateur dépendent des performances du compresseur, des surchauffes et des sous-refroidissements.

Le modèle est donc fortement couplé, et son calcul demande un certain nombre d'itérations. Le moteur de recalcul est tout à fait capable de trouver une solution, mais quelques précautions s'imposent quand même, notamment parce que le séparateur ne peut être calculé que si la vapeur en entrée est bien diphasique.

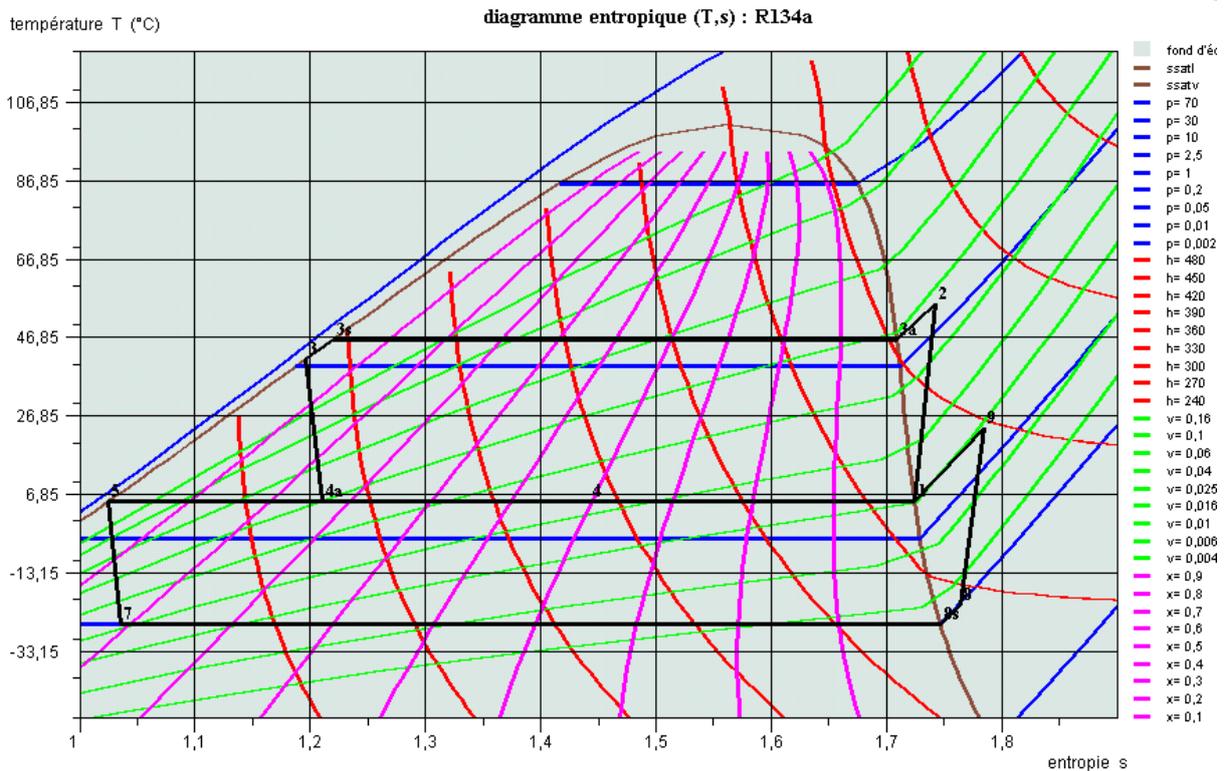
En pratique, il faut stabiliser les débits pour éviter des divergences du modèle, et la solution consiste à imposer le débit dans une transfo bien choisie. Etant donné que c'est l'effet frigorifique qui nous intéresse, imposons un débit unité dans cette transfo avant de lancer le recalcul. Après un certain nombre d'itérations, les valeurs des indicateurs de bilan se stabilisent. Il est alors possible de vérifier que le débit dans le détendeur BP, situé juste en amont de l'effet frigorifique, est égal lui aussi à 1, à très peu de chose près. Les résultats que l'on obtient sont alors donnés ci-contre.

| Bilan | |
|-----------------|---------|
| efficacité | 2,27376 |
| énergie utile | 179,83 |
| énergie payante | 79,09 |

L'affichage des valeurs sur le schéma donne :



Il est aussi possible de tracer le cycle thermodynamique correspondant en transférant les points dans les diagrammes interactifs des vapeurs. Après ajout de quelques points pour obtenir un beau tracé, cela donne :



Sauvez enfin les fichiers de schéma et de projet, par exemple sous le nom de frigobi.dia et frigobi.prj, et le fichier de cycle du diagramme, sous le nom de frigoBiR134a.txt.