

Exploration d'une installation de réfrigération

Cycle de réfrigération, sans sous-refroidissement, surchauffe de 5 °C, Tair = 32 °C

Introduction

L'objectif de cette exploration est de vous guider dans vos premiers pas d'utilisation de ThermoOptim, en vous faisant découvrir les principaux écrans et fonctionnalités associés à un modèle d'installation de réfrigération simple.

Vous découvrirez l'agencement des écrans des points et des transfos, la manière dont ils peuvent être reparamétrés et calculés, les notions d'énergies utiles et payantes permettant de dresser les bilans énergétiques globaux et de déterminer le Coefficient de Performance COP.

Vous visualiserez les cycles dans le diagramme thermodynamique (h, ln(P)) et vous effectuerez des études de sensibilité du cycle à la température extérieure et à la haute pression. Vous analyserez l'intérêt du sous-refroidissement.

Dans une installation de réfrigération par compression de vapeur, on cherche à maintenir une enceinte froide à une température inférieure à l'ambiante.

Le principe consiste à évaporer un fluide frigorigène à basse pression (et donc basse température), dans un échangeur en contact avec l'enceinte froide.

Pour cela, il faut que la température d'évaporation du fluide frigorigène soit inférieure à celle de l'enceinte froide. Le fluide est ensuite comprimé à une pression telle que sa température de condensation soit supérieure à la température ambiante.

Il est alors possible de refroidir le fluide par échange thermique avec l'air ambiant, jusqu'à ce qu'il devienne liquide. Le liquide est ensuite détendu par laminage isenthalpique jusqu'à la basse pression, et dirigé dans l'évaporateur. Le cycle est ainsi refermé.

1. Paramétrage retenu

Le cycle de réfrigération par compression de R134a fonctionne entre une pression d'évaporation de 1,78 bar et une pression de condenseur de 12 bar.

En sortie d'évaporateur, un débit $\mu=1 \gamma/\sigma$ de fluide est entièrement vaporisé, avec une surchauffe de 5 °C.

Il est ensuite comprimé jusqu'à 12 bar en suivant une compression adiabatique irréversible. La compression réelle est caractérisée par un rendement isentropique, défini comme le rapport du travail de la compression réversible au travail réel. Sa valeur est supposée égale à 0,75

Le refroidissement du fluide dans le condenseur par échange avec l'air extérieur comporte deux étapes : une désurchauffe dans la zone vapeur suivie d'une condensation.

Il est ensuite détendu sans travail dans un capillaire, jusqu'à la pression de 1,78 bar.

Chargement d'un modèle

Le chargement du modèle se fait par ouverture du fichier de schéma et d'un fichier de projet paramétré convenablement.

Commencez par charger le modèle, puis effectuez les trois activités proposées.

1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant : [Ouvrir un fichier dans ThermoOptim](#)

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (frigo_allège.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (frigo_allège.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger un projet" du menu du simulateur.

2. Découverte de ThermoOptim

L'éditeur de schémas permet de décrire graphiquement et qualitativement le système étudié. Il comporte une palette présentant les différents composants représentables et un panneau de travail où ces composants sont placés et interconnectés par des liens vectoriels.

Le simulateur permet de quantifier puis de calculer le modèle décrit dans l'éditeur de schémas. Il comporte les listes des différents points, transfos, nœuds et échangeurs du modèle.

Affichez ces deux fenêtres et étudiez leur contenu.

Ce document vous fournit davantage d'informations sur ces deux écrans.

Référez-vous pour plus d'explications à l'exploration de découverte de ThermoOptim accessible depuis le menu situé en haut à gauche de l'écran du navigateur.

3. Composants principaux du modèle

Combien de composants principaux le cycle met-il en œuvre ?

Ouvrez l'éditeur de schémas et comptez les composants du modèle, à l'exclusion des sources externes.

Cette question admet plusieurs réponses, selon que l'on considère les échangeurs multizones comme composés d'un ou plusieurs composants

3 4 5 6

4. Énergie mécanique

Quel(s) composant(s) met(tent) en jeu de l'énergie mécanique ?

le condenseur et l'évaporateur le détendeur et l'évaporateur le compresseur et le détendeur le compresseur le détendeur

5. Puissances mises en jeu

Entrez les valeurs dans les champs de texte situés ci-dessous, avec le point comme séparateur décimal. Votre réponse est évaluée par rapport à la bonne valeur, avec un intervalle correspondant à une précision qui dépend de la question.

Souvenez-vous que les énergies ou les puissances reçues par un système sont comptées positivement, et celles qu'il fournit à l'extérieur sont comptées négativement. Dans les écrans de ThermoOptim, elles sont donc positives ou négatives, selon les cas.

Toutefois, dans ces exercices, n'entrez que les valeurs absolues des puissances mises en jeu (en W)

Valeur de la puissance frigorifique ?

Valeur de la puissance de compression ?

Paramétrage retenu

Dans cette section, nous allons faire le lien entre l'énoncé du modèle et le paramétrage des principaux points et transfos

Au point 1 en sortie d'évaporateur, le frigorigène est à l'état de vapeur surchauffée de 5 °C, à une température d'environ -8 °C. La pression du R134a vaut 1,78 bar.

Ouvrez le point 1 et examinez son paramétrage.

Sa pression est égale à 1,78 bar, et l'option "imposer la température de saturation" a été choisie, avec un écart Tsat de 5 °C.

Le point étant à l'état de vapeur, son titre est égal à 1.

Rappelons que, pour un corps pur à l'équilibre liquide-vapeur, le titre est défini comme la masse de vapeur divisée par la masse totale de liquide et de vapeur.

Si vous changez la valeur de la pression, et que vous recalculiez le point, sa température est automatiquement modifiée.

Le compresseur comprime le frigorigène à 12 bar.

Ouvrez la transfo "compresseur", et examinez son paramétrage.

Elle relie le point 1 et le point 2, et son paramétrage est "adiabatique", "référence isentropique", avec un rendement isentropique égal à 0,75.

C'est dans le point 2 que la pression de 12 bar est définie.

Ouvrez le point 2. Son paramétrage est "non contraint", ce qui signifie que la pression et sa température sont indépendantes.

Lorsque la transfo "compresseur" est calculée, la température du point 2 est déterminée.

Si vous changez la pression du point 2, par exemple en entrant 10 bar, la nouvelle température de fin de compression est calculée. Elle diffère de la précédente.

Le refroidissement du fluide dans le condenseur par échange avec l'air extérieur comporte deux étapes :

- une désurchauffe (2–3a) dans la zone vapeur
- suivie d'une condensation (3a–3).

Les points 3a et 3 se situent à l'intersection de la courbe de saturation et de l'isobare $P = 12$ bar, ou, ce qui revient au même, de l'isotherme $T = 47$ °C. Le point 3a est situé sur la droite, à la limite de la zone vapeur, et le point 3 à gauche, à la limite de la zone liquide.

Le point 3a est paramétré de manière tout à fait analogue au point 1, l'option "imposer la température de saturation" étant choisie, et le titre étant égal à 1, pour indiquer l'état de vapeur.

Le point 3 est paramétré de manière analogue, à la réserve près que le titre est égal à 0, pour indiquer l'état liquide.

L'évolution (3–4) est une détente sans travail, et donc isenthalpique, de 12 bar à 1,78 bar.

Cette évolution est modélisée par la transfo "laminage".

L'état amont du fluide est celui du point 3, dont la pression et la température sont connues.

Pour l'aval, la pression et l'enthalpie sont connues, de telle sorte que Thermoptim peut calculer son état.

C'est dans le point 4 que la pression de sortie de 1,78 bar est définie.

L'état de sortie est diphasique, ce qui signifie que la température est égale à celle de saturation à cette pression. Le titre, égal à 0,4, est déterminé lorsqu'on calcule la transfo.

La puissance utile est la chaleur extraite à l'évaporateur (129 W), et la puissance payante le travail fourni au compresseur (54 W). Le rapport des deux étant supérieur à 1, le terme de rendement n'est plus adapté.

C'est pourquoi on parle de **coefficient de performance (COP)** du cycle.

Quelle est la valeur du COP de ce cycle

Tracé du cycle dans le diagramme (h, ln(P))

1. Première étape : chargement du diagramme des frigorigènes du R134a

Nous allons maintenant étudier le cycle dans le diagramme (h, ln(P)), qui permet de lire les enthalpies mises en jeu directement sur l'axe des abscisses.

Cliquez sur

Vous pouvez aussi ouvrir le diagramme grâce à la ligne "Diagramme Interactifs" du menu "Spécial" de l'écran du simulateur, qui ouvre une interface qui relie le simulateur et le diagramme. Double-cliquez dans le champ situé en haut à gauche de cette interface pour choisir le type de diagramme souhaité (ici "Vapeurs condensables").

Une fois le diagramme ouvert, choisissez "R134a" dans le menu Corps, et sélectionnez "(h,p)" dans le menu "Graphe".

2. Deuxième étape : chargement d'un cycle pré-enregistré correspondant au projet chargé, dont le tracé a été préalablement affiné afin d'être plus précis

Cliquez sur

Vous pouvez aussi ouvrir ce cycle de la manière suivante :

- dans la fenêtre du diagramme, choisissez "Charger un cycle" dans le menu Cycle,
- et sélectionnez "frigo_allègeFrFin.txt" dans la liste des cycles disponibles.
- Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

3. Repérage de quelques points caractéristiques dans le diagramme

Quel est le point en zone liquide ?

Quel est le point en zone diphasique ?

Quel est le point dont la température est la plus élevée ?

Modifications du cycle avec prise en compte d'un sous-refroidissement de 10 °C

1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant :

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (frigo_allègeSR10.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (frigo_allègeSR10.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger un projet" du menu du simulateur.

Affichage du cycle avec sous-refroidissement

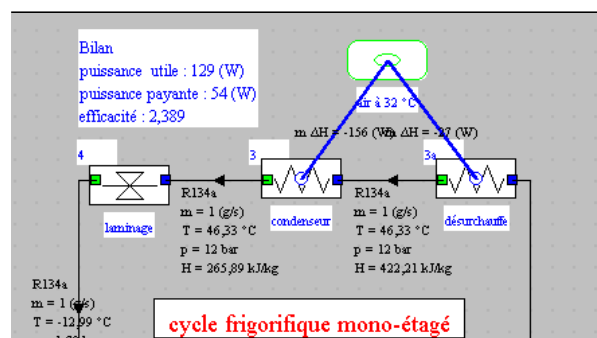
Le chargement du cycle avec sous-refroidissement tracé en bleu permet de le superposer au cycle initial. Dans le diagramme ($h, \ln(P)$), l'augmentation de l'effet frigorifique apparaît nettement.

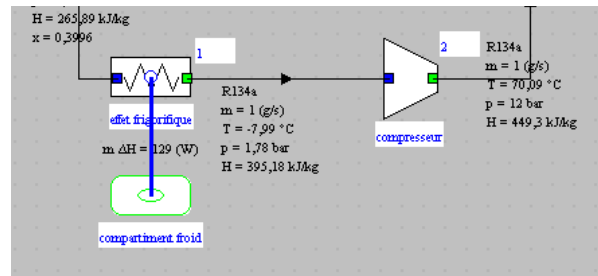
Cliquez sur

Vous pouvez aussi ouvrir ce cycle de la manière suivante : dans la fenêtre du diagramme, choisissez "Charger un cycle" dans le menu Cycle, et sélectionnez "frigo_allègeSR10Fin.txt" dans la liste des cycles disponibles. Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

2. Augmentation de l'effet utile

Le sous-refroidissement permet d'augmenter l'effet utile.





À titre de comparaison, voici les valeurs des performances du cycle de la machine sans sous-refroidissement (première partie de l'exploration).

De quelle valeur augmente l'effet frigorifique ?

De quelle valeur augmente la puissance de compression ?

3. Bilan premier principe

Quelle est la valeur de la puissance frigorifique ?

4. Valeur de la puissance de compression

Quelle est la valeur de la puissance de compression ?

5. Valeur du COP

Quelle est la valeur du COP ?

6. Limite du sous-refroidissement

Il faut disposer d'une source froide pour refroidir le frigorigène.

Dans cet exemple, nous supposons que l'échange se fait avec l'air extérieur.

Quelle est la limite de la valeur du sous-refroidissement ?

7. Suppression du cycle à sous-refroidissement

Pour la suite du scénario, nous effaçons le cycle à sous-refroidissement

Cliquez sur

Vous pouvez aussi effacer le cycle devenu inutile en opérant comme suit : Affichez le Gestionnaire de cycles à partir du menu Cycle. Cliquez sur le bouton "Mettre à jour la table des cycles", et désélectionnez la ligne que vous ne souhaitez pas voir apparaître sur le diagramme.

Variation des performances lorsque la température externe varie

Le modèle initial supposait que le réfrigérateur était placé dans une pièce à 32 °C, ce qui correspond à une situation estivale.

On s'intéresse maintenant à son utilisation en hiver dans une cuisine dont la température est égale à 18 °C.

On charge le nouveau projet correspondant, sans sous-refroidissement.

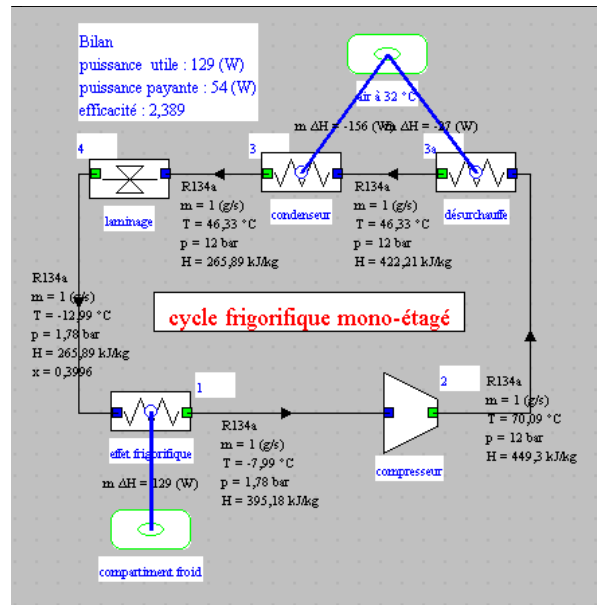
1. Charger le modèle

Cliquez sur le lien suivant :

Vous pouvez aussi ouvrir le fichier de schéma (frigo_allège18.dia) grâce au menu "Fichier/Ouvrir" du menu de l'éditeur de schémas, et le fichier de projet (frigo_allège18.prj) grâce au menu "Fichier de projet/Charger un projet" du menu du simulateur.

2. énergies mises en jeu

À titre de comparaison, voici les valeurs des performances du cycle de la machine sans sous-refroidissement (première partie de l'exploration).



Comme vous pourrez le constater, le changement de température a une forte influence sur les performances de la machine, et surtout sur la puissance de compression.

Quelle est la valeur de la puissance frigorifique ?

Quelle est la valeur de la puissance de compression ?

Quelle est la valeur du COP ?

Tracé des deux cycles dans le diagramme (h, ln(P))

Superposition des deux cycles dans le diagramme, le nouveau cycle étant tracé en rouge.

Cliquez sur

Vous pouvez aussi ouvrir ce cycle de la manière suivante :

- dans la fenêtre du diagramme, choisissez "Charger un cycle" dans le menu Cycle
- sélectionnez "frigo_allège18Fin.txt" dans la liste des cycles disponibles
- Cliquez ensuite sur la ligne "Points reliés" du menu Cycle.

La réduction du travail de compression et l'augmentation de l'effet utile apparaissent clairement.

Exercices d'application

Maintenant que vous avez terminé cette exploration, vous pouvez repartir de l'exemple qui est chargé, correspondant à la température extérieure de 18 °C, et le reparamétrer pour retrouver par vous-même les résultats qui ont été obtenus auparavant en chargeant les exemples de l'exploration dirigée

1. Sous-refroidissement

étude du sous-refroidissement pour $T_{ex} = 18\text{ °C}$

Déterminez par vous-même le sous-refroidissement maximal que l'on peut obtenir pour cette température extérieure, et déduisez-en les performances du cycle

2. Paramétrage pour $T_{ext} = 25\text{ °C}$

Paramétrez le cycle avec une pression de condensation égale à 9,1 bar, ce qui correspond à $T_{ext} = 25\text{ °C}$, et calculez le bilan enthalpique

Détermination du rendement isentropique lorsque l'état du point de sortie est connu

Le modèle précédent supposait que le rendement isentropique du compresseur était connu.

On s'intéresse maintenant au paramétrage du modèle lorsqu'on connaît non pas sa valeur mais celle de l'état du point de sortie (67 °C, 12 bar).

Entrez ces valeurs dans l'écran du point 2, puis recalculez-le.

Dans l'écran de la transfo "compresseur", sélectionnez en bas à droite l'option "Calculer le rendement, le point aval étant connu", puis recalculez-la transfo.

quelle est la nouvelle valeur du rendement isentropique de compression ? (entrez sa valeur entre 0 et 1, avec le "." comme séparateur décimal)

Il est ainsi possible de paramétrer une compression connaissant soit son rendement isentropique, soit l'état de son point aval.

Conclusion

Cette exploration vous a permis de découvrir Thermoptim et de commencer à utiliser ce progiciel pour effectuer des paramétrages d'un modèle simple.

Vous pouvez en effectuer d'autres pour analyser la sensibilité du modèle à divers paramètres, comme par exemple le rendement isentropique du compresseur.

Nous vous recommandons de lire la documentation de Thermoptim, et notamment les deux premiers tomes de son manuel de référence.

D'autres explorations dirigées vous permettront d'étudier des variantes de ce cycle permettant d'en améliorer les performances, notamment les cycles bi-étagés.

Enfin, vous pouvez modéliser une pompe à chaleur, qui utilise un cycle analogue à celui que vous venez d'étudier, dont l'effet utile n'est plus le refroidissement à l'évaporateur mais la chaleur rejetée au condenseur.