

## POMPE A CHALEUR A MELANGE DE FLUIDES

Cette note complète la présentation pédagogique allégée de la pompe à chaleur, en traitant du cas où le fluide thermodynamique est un mélange de vapeurs.

C'est notamment le cas de la pompe à chaleur PAC Air/Eau Inverter & Ventilconvecteur d'ERM.

### 1 Phénomènes physiques mis en jeu

Le comportement des mélanges de fluides en équilibre liquide-vapeur est généralement différent de celui des corps purs, la fraction molaire ou massique de chaque constituant évoluant entre des limites qui dépendent de la pression et de la température, du fait de la distillation qui prend alors place. De par la présence de plusieurs constituants, le changement de phase est plus complexe que pour un corps pur. Sa représentation graphique dans un diagramme n'est simple que si le mélange est binaire, cas auquel nous nous limiterons dans cette introduction.

Pour bien comprendre les phénomènes qui se manifestent, étudions le comportement d'un mélange binaire de propane et de butane. Quelques unes des propriétés de ces corps purs (pression et température critiques, températures d'ébullition à 1 et 2 bar) sont indiquées dans le tableau 1. Elles montrent que le propane est beaucoup plus volatil que le butane, puisque à 1 bar, ils s'évaporent respectivement à  $-42,4\text{ °C}$  et  $-0,7\text{ °C}$ .

	<b>P<sub>c</sub></b> (bar)	<b>T<sub>c</sub></b> (°C)	<b>T<sub>s</sub> (1 bar)</b> (°C)	<b>T<sub>s</sub> (2 bar)</b> (°C)
propane	42,48	96,7	- 42,4	- 25,4
butane	37,98	152,01	- 0,7	18,8

Considérons un mélange de ces deux corps, et examinons comment il évolue, à pression constante, lorsque sa température change. La figure 1.1, appelée "lentille d'équilibre isobare", montre le diagramme de phase de ce mélange à la pression de 2 bar.

La zone vapeur correspond à la partie supérieure droite du diagramme, la zone liquide à la partie inférieure gauche, et l'équilibre liquide-vapeur à la lentille délimitée par les courbes de rosée et de bulle. L'abscisse représente la fraction molaire en propane, ce qui signifie que la valeur 0 correspond à du butane pur ( $T_s = 18,8\text{ °C}$ ), et la valeur 1 à du propane pur ( $T_s = -25,4\text{ °C}$ ). Comme c'est l'usage lors de l'étude des mélanges de vapeurs,  $x$  représente les fractions molaires en phase liquide,  $y$  les fractions molaires en phase vapeur, et  $z$  les fractions molaires globales. L'ordonnée est la température, exprimée en °C.

Considérons un mélange de composition donnée (ici  $z_1 = 0,6$  pour le propane,  $z_2 = 1 - z_1 = 0,4$  pour le butane) à l'état de vapeur, correspondant au point A de température  $10\text{ °C}$ . Si on refroidit le mélange à pression constante (par exemple dans un échangeur), son

point caractéristique se déplace le long du segment A-B vertical tant qu'il reste à l'état de vapeur.

En B, à 0 °C environ, la distillation commence sur la courbe de rosée (ou courbe de goutte), ainsi nommée parce que la première goutte de liquide apparaît. Les deux composants se liquéfient ensemble, mais, étant donné que le butane est moins volatil que le propane, il se condense davantage, de telle sorte que la composition de la première goutte diffère de la composition moyenne z. La fraction molaire  $x$  à l'état liquide du composant 1 (ici le propane) est donnée par l'abscisse du point E sur la

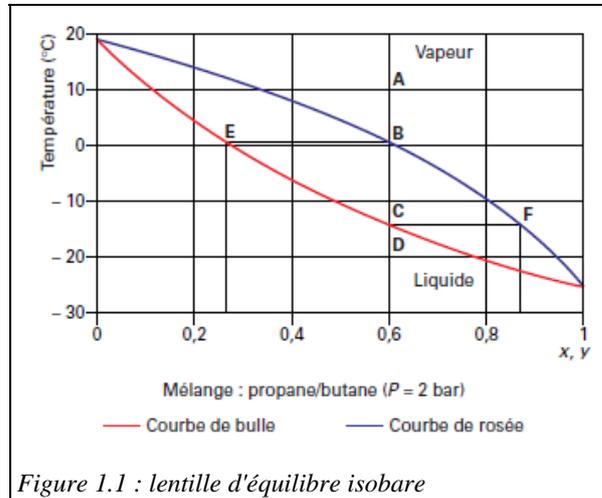


Figure 1.1 : lentille d'équilibre isobare

courbe de bulle, appelée ainsi car, dans un processus inverse d'évolution de la température, c'est sur cette courbe que les premières bulles apparaissent (ici  $x_1 = 0,28$ ), et la fraction molaire du butane liquide est donc  $x_2 = 1 - x_1 = 0,72$ .

Au fur et à mesure que le refroidissement se poursuit, la composition de la phase liquide évolue, la fraction molaire du propane étant donnée par l'abscisse de l'intersection de la courbe de bulle et de l'isotherme correspondante, son point figuratif se déplaçant de E à C, tandis que celui de la phase gazeuse passe de B à F. Au point C, il ne reste que du liquide, à l'exception d'une dernière bulle de gaz, de composition  $y_1 = 0,85$  en propane et  $y_2 = 1 - y_1 = 0,15$  en butane. Au-delà, le mélange reste à l'état liquide, avec sa composition initiale.

En d'autres termes, à pression donnée, le changement d'état du mélange ne se fait pas à température constante, mais avec un "glissement" de température (ou intervalle de distillation) qui peut être plus ou moins important selon le mélange considéré. Par exemple, pour le mélange précédent, et la pression de 2 bar, le glissement de température est de 14 K.

Examinons maintenant une évolution du mélange à température constante et pression variable. Sur le diagramme de la figure 1.2, appelé lentille d'équilibre isotherme, les abscisses représentent le titre en propane et les ordonnées la pression, exprimée en bar. Supposons toujours que le mélange a pour composition globale ( $z_1 = 0,6$  et  $z_2 = 0,4$ ). Si la pression est inférieure à 2,78 bar, le mélange est entièrement à l'état de vapeur, et si elle est supérieure à 4,3 bar, il est entièrement liquide. Entre ces deux pressions, il est en équilibre liquide-vapeur, et la composition du mélange évolue continûment dans les phases liquide et vapeur. Pour  $P = 2,78$  bar, la phase liquide a une composition ( $x_1 = 0,28$  ;  $x_2 = 0,72$ ), pour  $P = 3,7$  bar, elle vaut ( $x_1 = 0,48$  ;  $x_2 = 0,52$ ), et pour  $P = 4,3$  bar

elle correspond à la composition globale. En phase vapeur, les compositions sont les suivantes : ( $y_1 = 0,6$  ;  $y_2 = 0,4$ ) pour  $P = 2,78$  bar, ( $y_1 = 0,77$  ;  $y_2 = 0,33$ ) pour  $P = 3,7$  bar, et ( $y_1 = 0,85$  ;  $y_2 = 0,15$ ) pour  $P = 4,3$  bar.

Un cas particulier correspond aux mélanges dits azéotropes où les courbes de bulle et de rosée se rejoignent pour une composition globale donnée. On peut démontrer qu'un mélange azéotrope correspond à un extremum de pression à température constante, ou de température à pression constante. Un tel mélange se comporte en pratique comme un corps pur. Enfin, lorsque le glissement de température est petit ( $< 1$  K), l'erreur que l'on commet en négligeant la distillation est très faible.

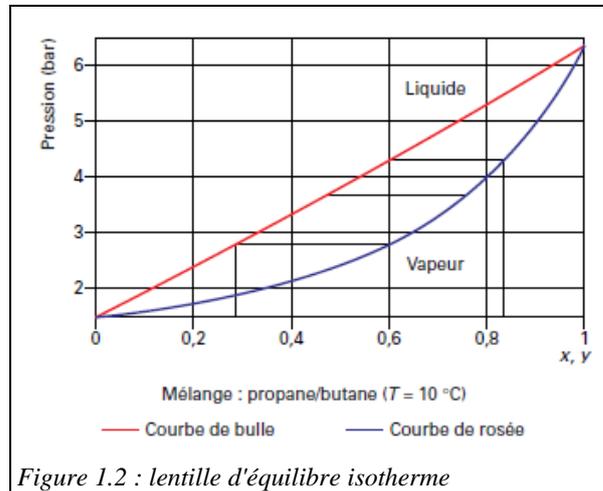


Figure 1.2 : lentille d'équilibre isotherme

On parle alors de mélange quasi-azéotrope. C'est parce que le glissement est important, et permet de bien illustrer les phénomènes particuliers aux mélanges, que nous avons choisi ici le mélange propane / butane.

Le réfrigérant R410A est quant à lui un mélange proche de quasi-azéotrope (figure 1.3). Sa composition massique est la suivante : 50,2 % de R32 (difluorométhane), et 49,8 % de R125 (pentafluoroéthane), et sa composition molaire 69,9 % de R32, et 30,1 % de R125.

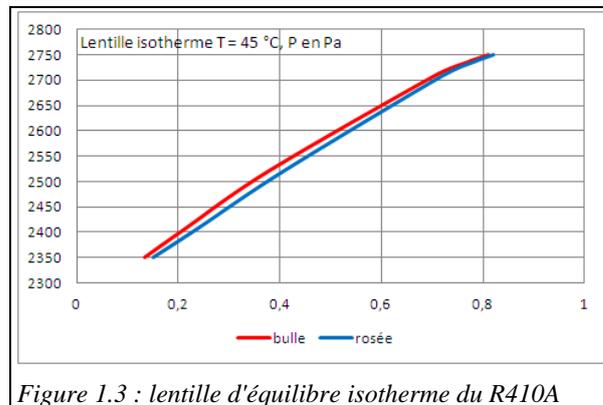


Figure 1.3 : lentille d'équilibre isotherme du R410A

## 2 Modélisation du R410A

Thermoptim ne disposant pas des bibliothèques permettant de calculer les mélanges de fluides réels, la modélisation du R410A ne peut être faite qu'en utilisant un serveur de propriétés thermodynamiques externe que l'on couple à Thermoptim.

### 2.1 Bibliothèques thermodynamiques utilisées

Bien que ce ne soit pas la seule solution, notre choix s'est porté sur la bibliothèque TEP Lib du Laboratoire de Thermodynamique des Equilibres de Phase de l'Ecole des Mines de Paris (Mines Paristech). Le modèle choisi utilise une équation d'état cubique, en l'occurrence une équation de Peng Robinson.

Le détail des indications permettant d'installer ces bibliothèques est disponible dans le portail ThermoOptim-UNIT<sup>1</sup>.

Il faut commencer par installer les bibliothèques elles-mêmes, puis configurer un fichier de mélange définissant le système (R32, R125). Un nouveau mélange externe avec la composition molaire du R410A peut alors être créé.

Toutes les indications sur la manière d'opérer sont données dans la documentation d'utilisation de TEP Lib.

Une fois le mélange externe défini, il peut être utilisé sans difficulté pour modéliser la pompe à chaleur au R410A.

### 2.2 Diagrammes thermodynamiques des mélanges

Toutefois, ce corps n'étant pas inclus dans ThermoOptim, le progiciel ne dispose pas de ses diagrammes thermodynamiques. Pour pallier cette limitation, nous avons ajouté un nouveau type de diagramme, appelé diagramme de mélange externe, qui donne accès à des diagrammes entropiques et des frigoristes simplifiés.

La préparation des fonds de diagramme fait appel à une classe externe particulière, appelée CreateMixtureCharts.java que nous ne présenterons pas ici car nous nous contentons d'utiliser les diagrammes, leur construction étant un peu complexe.

Les nouveaux diagrammes sont simplifiés par rapport aux autres en ce sens qu'ils ne présentent que les courbes de bulle et de rosée, ainsi qu'un seul jeu d'isovaleurs, les isobares pour le diagramme entropique, et les isothermes pour le diagramme des frigoristes.

Comme le montre le diagramme entropique la figure 2.1, les isobares ne sont plus des segments horizontaux dans la zone d'équilibre liquide-vapeur, mais des courbes légèrement ascendantes.

Dans le diagramme des frigoristes (figure 2.2), les isothermes ne sont plus des segments horizontaux dans la zone d'équilibre liquide-vapeur, mais des courbes légèrement descendantes.

Notez que les caractéristiques du modèle sont rappelées dans ces diagrammes : serveur de propriétés TEPLib mixtures, nom du corps R410A et composition molaire.

---

<sup>1</sup> <http://www.thermoOptim.org/sections/logiciels/thermoOptim/ressources/serveur-proprietes>

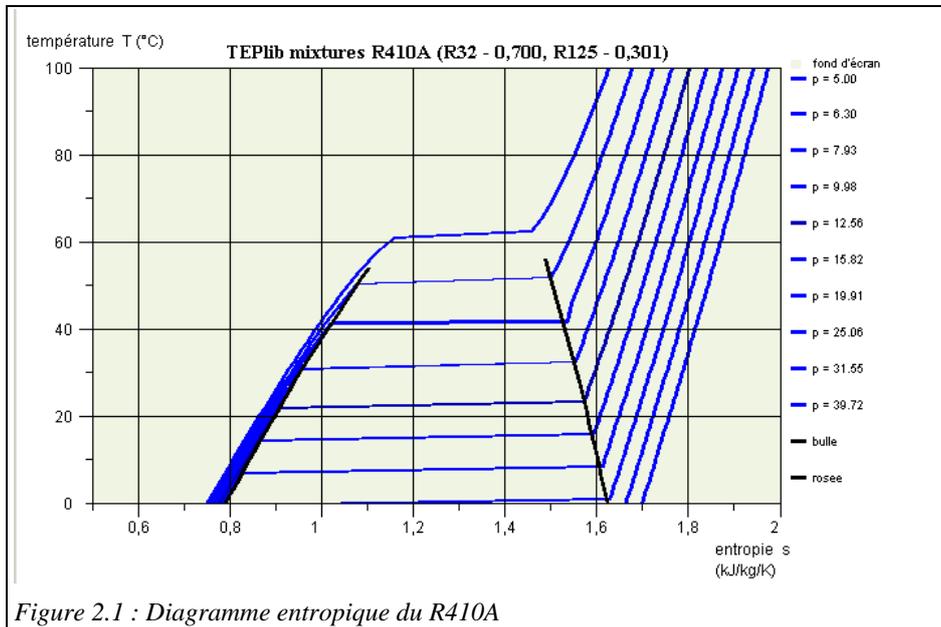


Figure 2.1 : Diagramme entropique du R410A

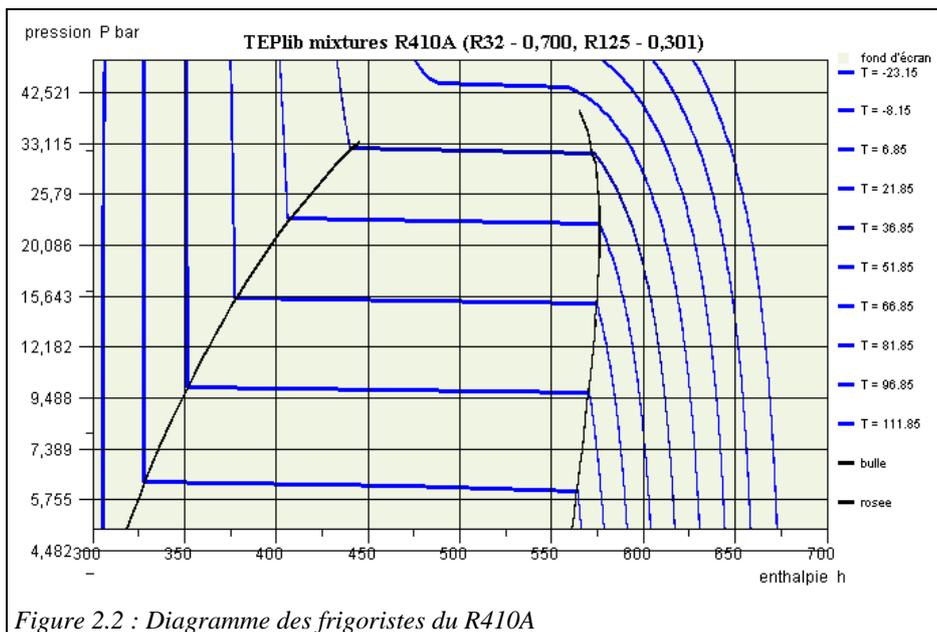


Figure 2.2 : Diagramme des frigoristes du R410A

### 2.3 Utilisation des diagrammes dans Thermoptim

Pour que les diagrammes de mélanges soient accessibles, il faut que soient préparés un certain nombre de fichiers, comme indiqué dans la documentation de la classe externe CreateMixtureCharts.java. Nous supposons ici que cela a été fait.

Le chargement du diagramme se fait aussi à partir de l'interface Simulateur / Diagrammes interactifs, à laquelle a été ajoutée une ligne supplémentaire intitulée « Mélanges externes », qu'il faut sélectionner.

La fenêtre de diagramme est alors ouverte, mais sans qu'un corps soit sélectionné.

Le menu « Données sur le mélange » permet de le faire (figure 2.3). Sélectionnez pour cela la ligne « Charger le mélange ». La liste des diagrammes disponibles est affichée. Choisissez celui du R410A.

Sélectionnez ensuite la ligne « Relire le diagramme du mélange », qui permet de relire les deux fichiers définissant les fonds d'écran. Les diagrammes des figures 2.1 et 2.2 sont alors accessibles, le comportement du diagramme de mélange externe étant analogue à celui d'un diagramme de vapeur interne à Thermoptim.

La dernière ligne du menu de la figure 2.3 permet d'ouvrir l'éditeur de mélanges externes et d'avoir ainsi accès à la composition du mélange choisi. Notez que si vous la modifiez, le diagramme ne sera pas automatiquement recalculé, et ne correspondra donc plus au corps.

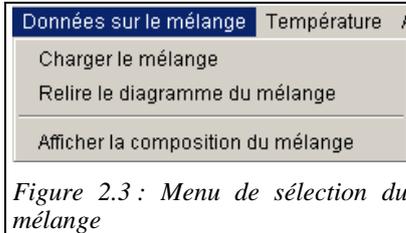


Figure 2.3 : Menu de sélection du mélange

### 3 Modélisation de la pompe à chaleur

Le modèle de pompe à chaleur au R410A est semblable à celui présenté dans la présentation pédagogique allégée, où le fluide était du R134a.

Vous pouvez repartir de ce modèle, charges les fichiers de projet et de schéma et utiliser les gestionnaire de corps pour

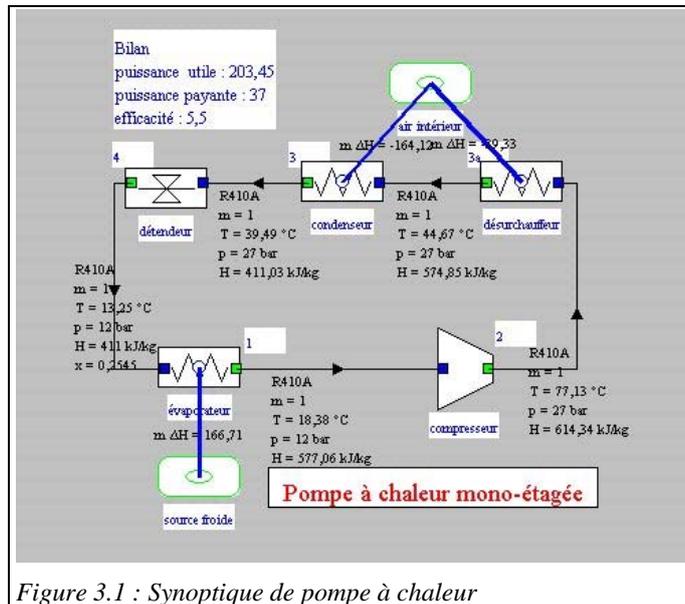


Figure 3.1 : Synoptique de pompe à chaleur

remplacer le R134a par du R410A. Toutefois, le paramétrage de ce modèle doit être modifié, car les températures de saturation des deux fluides sont très différentes.

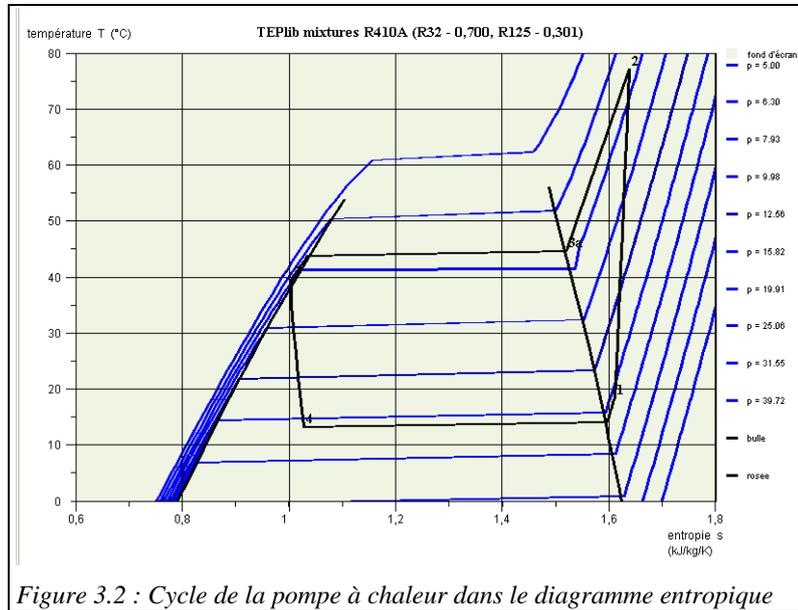


Figure 3.2 : Cycle de la pompe à chaleur dans le diagramme entropique

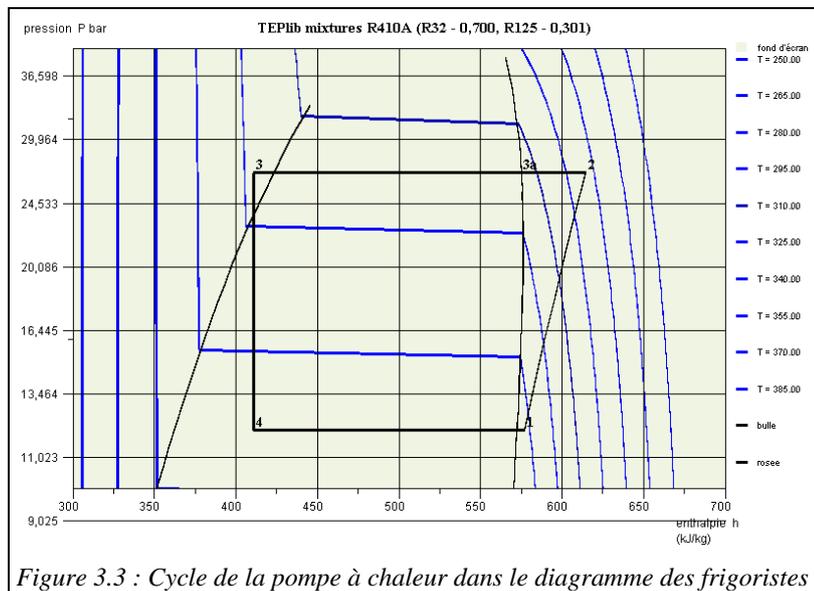


Figure 3.3 : Cycle de la pompe à chaleur dans le diagramme des frigoristes

En utilisant des pressions d'évaporation et de condensation de 12 et 27 bar, le synoptique auquel on aboutit est donné figure 3.1. Les performances du cycle sont très proches de celles de la pompe à chaleur au R134a.

Les tracés du cycle dans les diagrammes entropique et des frigoristes sont donnés figures 3.1 et 3.2

Les glissements de température dans les échangeurs apparaissent clairement dans ces deux diagrammes.

#### 4 Conclusion

Bien que le R410A soit un mélange de fluides réels et non un corps pur, il est possible de le modéliser dans Thermoptim en utilisant le serveur de propriétés thermodynamiques TEP Lib.

Les diagrammes de mélanges de vapeur externes permettent ensuite de tracer des cycles et de les comparer avec ceux des corps purs.

Toutefois, l'interprétation de ces diagrammes est plus difficile que celle des précédents et un effort didactique devra être effectué pour s'assurer que les élèves comprennent bien les phénomènes physiques mis en jeu.

La section 1de cette note peut y contribuer.