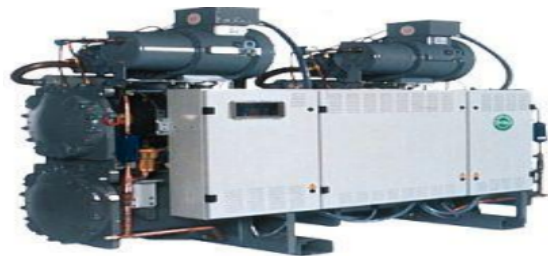




**I.P.S.A.**

## **Bureau d'Étude Thermodynamique**



**Etude différents types de machines frigorifique**

**Élèves :**

- Rayan CHENNAOUI
- Nima KASHANI

**Encadrant : Jamal BOUGUECHAL**

**Année universitaire : 2024–2025**

**Date de rendu : 23 mai 2025**

# Sommaire

|          |                                                                   |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                               | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>Objectifs</b>                                                  | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>Étude du cycle à un étage Cycle1</b>                           | <b>3</b>  |
| 3.1      | Etude du cycle à un étage avec table des valeurs . . . . .        | 3         |
| 3.2      | Tracé du cycle avec logiciel de calcul . . . . .                  | 5         |
| <b>4</b> | <b>Étude du cycle à un étage avec échangeur de chaleur Cycle2</b> | <b>7</b>  |
| <b>5</b> | <b>Étude du cycle à un étage avec échangeur de chaleur Cycle3</b> | <b>8</b>  |
| <b>6</b> | <b>Étude du cycle à deux étages Cycle4</b>                        | <b>11</b> |
| <b>7</b> | <b>Conclusion</b>                                                 | <b>13</b> |

# 1 Introduction

Les machines frigorifiques jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines industriels et domestiques en permettant le transfert de chaleur d'une source froide vers une source chaude, à l'encontre du flux thermique naturel. Ce transfert est rendu possible grâce à un cycle thermodynamique faisant intervenir plusieurs composants clés : compresseur, condenseur, détendeur et évaporateur.

Dans ce Bureau d'Études, nous nous intéressons plus particulièrement aux cycles à compression de vapeur, fréquemment utilisés dans les systèmes de réfrigération et de climatisation. Une attention particulière est portée aux configurations intégrant un ou plusieurs échangeurs de chaleur, ces derniers permettant d'améliorer significativement les performances énergétiques du système.

À travers l'analyse de différents types de cycles – à un étage, avec échangeur, ou à deux étages – nous visons à mieux comprendre le fonctionnement global de ces systèmes ainsi que l'impact des choix technologiques sur le rendement et la consommation énergétique.

## 2 Objectifs

Ce Bureau d'Études a pour objectifs principaux :

- D'analyser le fonctionnement thermodynamique de plusieurs types de machines frigorifiques à compression de vapeur ;
- De comparer les performances de différents cycles (simple étage, avec échangeur, double étage) à l'aide de données expérimentales et de simulations ;
- D'interpréter les résultats obtenus via des représentations graphiques (diagrammes de Mollier et T-s) et des calculs de puissances thermiques ;
- D'utiliser un logiciel de simulation (Solkane 9.01) pour valider les résultats théoriques et renforcer notre compréhension des cycles étudiés ;
- D'identifier les leviers d'amélioration de l'efficacité énergétique et de proposer des solutions techniques pertinentes.

Cette étude vise ainsi à développer une approche rigoureuse et analytique de la performance des systèmes frigorifiques, en mettant en lien la théorie thermodynamique et la pratique ingénierie.

### 3 Étude du cycle à un étage Cycle1

#### 3.1 Etude du cycle à un étage avec table des valeurs

| Point | P (bar) | T (°C) | v (m <sup>3</sup> /kg) | h (kJ/kg) | s (kJ/kg,K) | x    |
|-------|---------|--------|------------------------|-----------|-------------|------|
| 1     | 2       | 4      | 0,013                  | 399       | 1,76        |      |
| 2s    | 16,8    | 75     | 0,014                  | 438       | 1,76        |      |
| 2     | 16,8    | 85     | 0,014                  | 448,75    | 1,85        |      |
| 3'    | 16,8    | 60     | 0,011                  | 427       | 1,7         |      |
| 3''   | 16,8    | 60     | 0,006                  | 287       | 1,28        |      |
| 4     | 14,8    | 50     | 0,9                    | 279       | 1,26        |      |
| 5     | 2       | -10    | 0,03                   | 392       | 1,73        | 0,45 |
| 6     | 2       | -10    | 0,1                    | 279       | 1,47        |      |

Figure 1: Paramètres de sortie Cycle1 - à la main

Nous avons également un débit massique de 259,29 g/s.

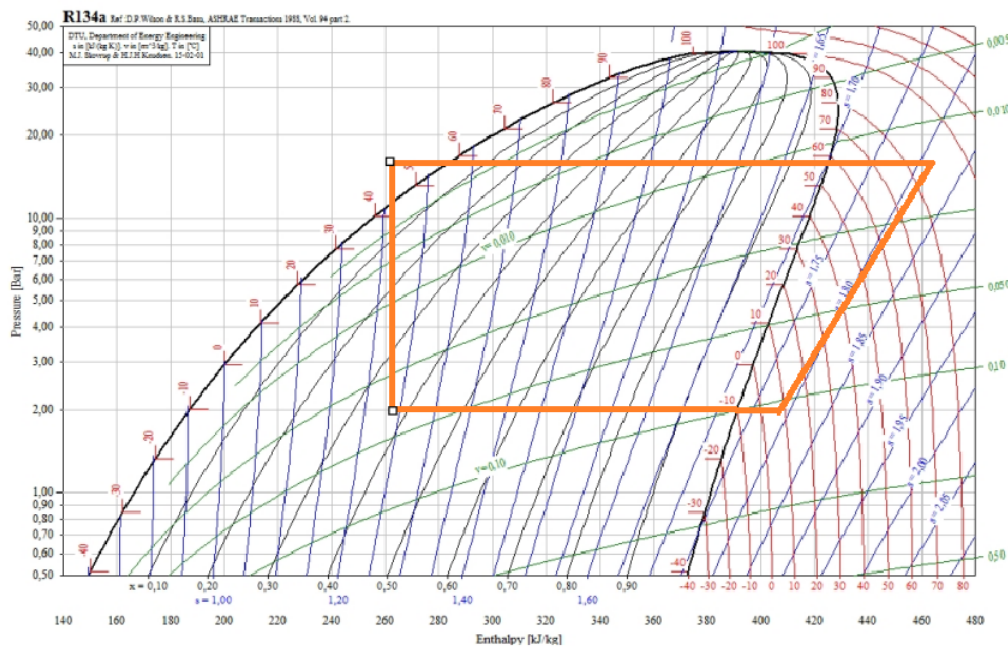


Figure 2: Diagramme P-s Cycle1 - à la main

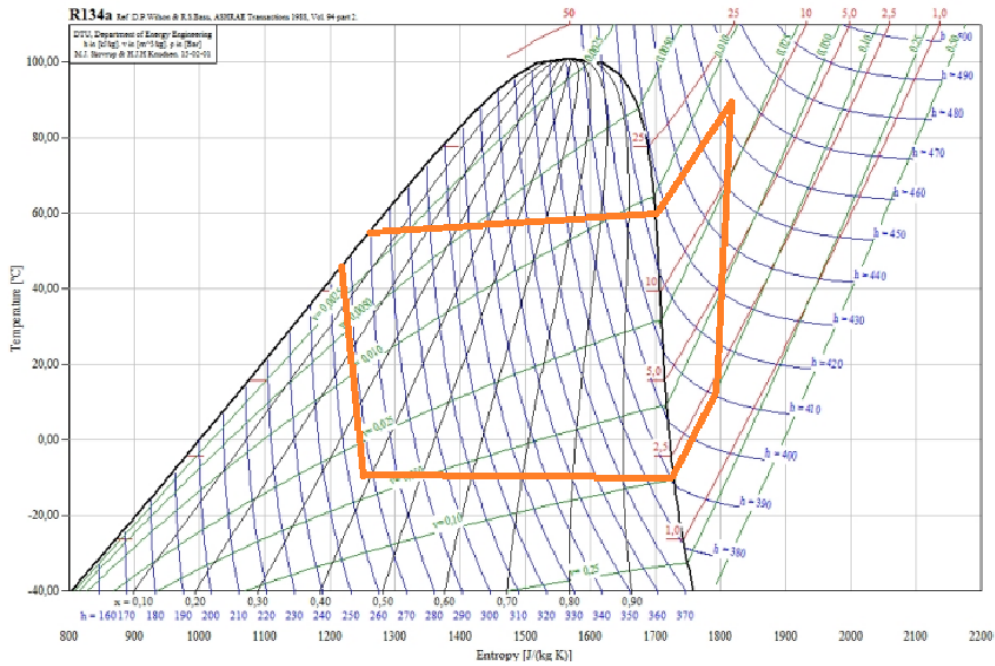


Figure 3: Diagramme T-s Cycle1 - à la main

$$\dot{m} = \frac{Q_{\text{évap}}}{h_1 - h_4} = \frac{35}{399.0 - 279.47} = \frac{35}{119.53} \approx \boxed{0.293 \text{ kg/s}}$$

$$W_{\text{comp}} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) = 0.293 \cdot (448.75 - 399.0) = 0.293 \cdot 49.75 \approx \boxed{14.57 \text{ kW}}$$

$$Q_{\text{cond}} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_4) = 0.293 \cdot (448.75 - 279.47) = 0.293 \cdot 169.28 \approx \boxed{49.57 \text{ kW}}$$

- Enthalpie liquide saturée à  $-10^\circ\text{C}$  :  $h_f = 186.697 \text{ kJ/kg}$
- Enthalpie vapeur saturée à  $-10$  :  $h_g = 392.665 \text{ kJ/kg}$
- Enthalpie après détente (point 6) :  $h_6 = h_4 = 279.47 \text{ kJ/kg}$

$$x_6 = \frac{h_6 - h_f}{h_g - h_f} = \frac{279.47 - 186.697}{392.665 - 186.697} = \frac{92.773}{205.968} \approx \boxed{0.45}$$

| Puissance   | kW    |
|-------------|-------|
| Evaporateur | 35    |
| Compresseur | 14,57 |
| Condenseur  | 49,57 |

Figure 4: Paramètres de sortie Cycle1

En comparaison, voici les données du logiciel, relativement proches :

| Puissances Processus à un niveau |         |
|----------------------------------|---------|
| Evaporateur                      | 35,0 kW |
| Liquéfacteur                     | 52,0 kW |
| Compresseur                      | 15,5 kW |

Figure 5: Puissances Cycle1

### 3.2 Tracé du cycle avec logiciel de calcul

Après avoir suivi les démarches sur le logiciel SOLKANE, nous obtenons les valeurs suivantes :

| Point | p<br>bar | t<br>°C | v<br>dm <sup>3</sup> /kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kgK | x<br>-- |
|-------|----------|---------|--------------------------|------------|-------------|---------|
| 1     | 2,01     | 4,00    | 106,31                   | 404,42     | 1,7769      |         |
| 2s    | 16,82    | 80,47   | 13,48                    | 452,19     | 1,7769      |         |
| 2     | 16,82    | 90,69   | 14,34                    | 464,14     | 1,8102      |         |
| 3     | 16,82    | 90,69   | 14,34                    | 464,14     | 1,8102      |         |
| 3'    | 16,82    | 60,00   | 11,46                    | 426,63     | 1,7024      |         |
| 3"4'm | 15,79    | 57,37   | 6,19                     | 352,76     | 1,4808      |         |
| 4'    | 14,82    | 54,73   | 0,93                     | 278,89     | 1,2592      |         |
| 4     | 14,82    | 44,73   | 0,89                     | 263,50     | 1,2119      |         |
| 5     | 2,01     | -10,00  | 37,63                    | 263,50     | 1,2426      | 0,373   |
| 56"m  | 2,01     | -10,00  | 68,58                    | 328,04     | 1,4879      |         |
| 6"    | 2,01     | -10,00  | 99,54                    | 392,58     | 1,7331      |         |
| 6     | 2,01     | -3,00   | 102,96                   | 398,48     | 1,7552      |         |

Figure 6: Paramètres de sortie Cycle1

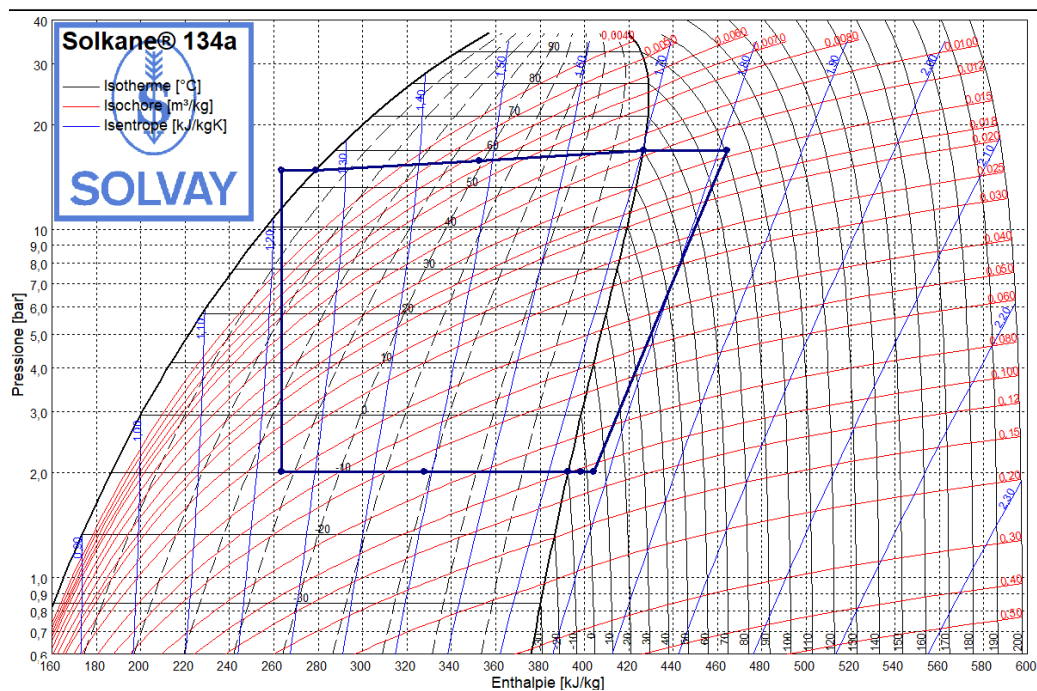


Figure 7: Diagramme P-s Cycle1

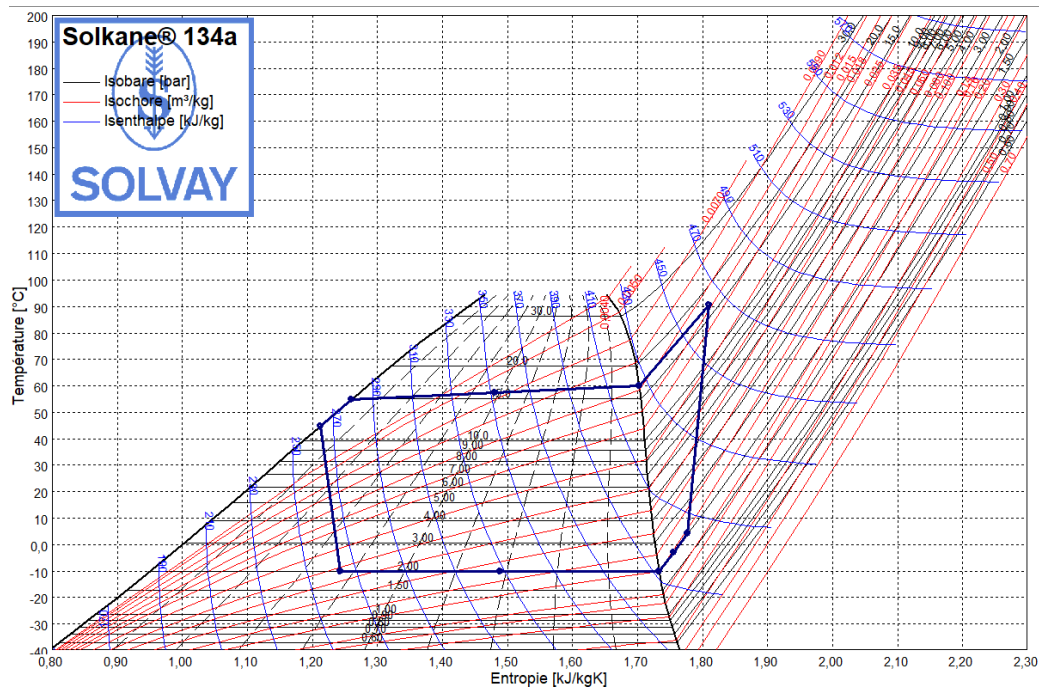


Figure 8: Diagramme T-s Cycle1

Compléter la figure :

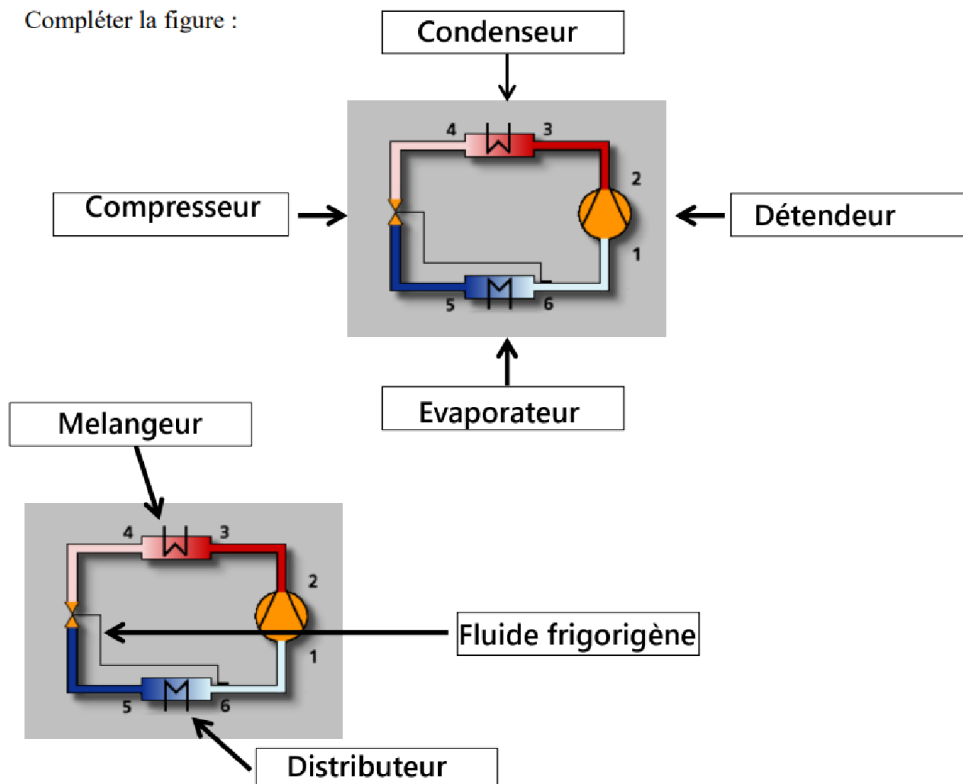


Figure 9: Noms éléments Cycle1

## 4 Étude du cycle à un étage avec échangeur de chaleur Cycle2

Il s'agit d'un échangeur de type contre-courant, dans lequel les deux fluides circulent dans des canaux séparés. Le fluide chaud y entre à la température de sortie du condenseur et en ressort à la température d'entrée du détendeur. Ce dispositif améliore l'efficacité globale du système, comme en témoigne l'augmentation de la surchauffe observée dans le cycle 2.

|       | p     | t      | v                   | h      | s      | x     |
|-------|-------|--------|---------------------|--------|--------|-------|
| Point | bar   | °C     | dm <sup>3</sup> /kg | kJ/kg  | kJ/kgK | --    |
| 1     | 2,01  | 39,73  | 122,70              | 435,50 | 1,8824 |       |
| 2s    | 18,82 | 119,28 | 14,41               | 494,29 | 1,8824 |       |
| 2     | 18,82 | 132,19 | 15,23               | 508,98 | 1,9192 |       |
| 3     | 16,82 | 122,19 | 16,67               | 499,73 | 1,9040 |       |
| 3'    | 16,82 | 60,00  | 11,46               | 426,63 | 1,7024 |       |
| 3"4'm | 15,79 | 57,37  | 6,19                | 352,76 | 1,4808 |       |
| 4'    | 14,82 | 54,73  | 0,93                | 278,89 | 1,2592 |       |
| 4     | 14,82 | 44,73  | 0,89                | 263,50 | 1,2119 |       |
| 5     | 14,82 | 23,41  | 0,82                | 232,41 | 1,1120 |       |
| 6     | 2,01  | -10,00 | 22,71               | 232,41 | 1,1245 | 0,222 |
| 67''m | 2,01  | -10,00 | 61,13               | 312,50 | 1,4288 |       |
| 7''   | 2,01  | -10,00 | 99,54               | 392,58 | 1,7331 |       |
| 7     | 2,01  | -3,00  | 102,96              | 398,48 | 1,7552 |       |
| 8     | 2,01  | 4,00   | 106,31              | 404,42 | 1,7769 |       |

Figure 10: Paramètres de sortie Cycle2

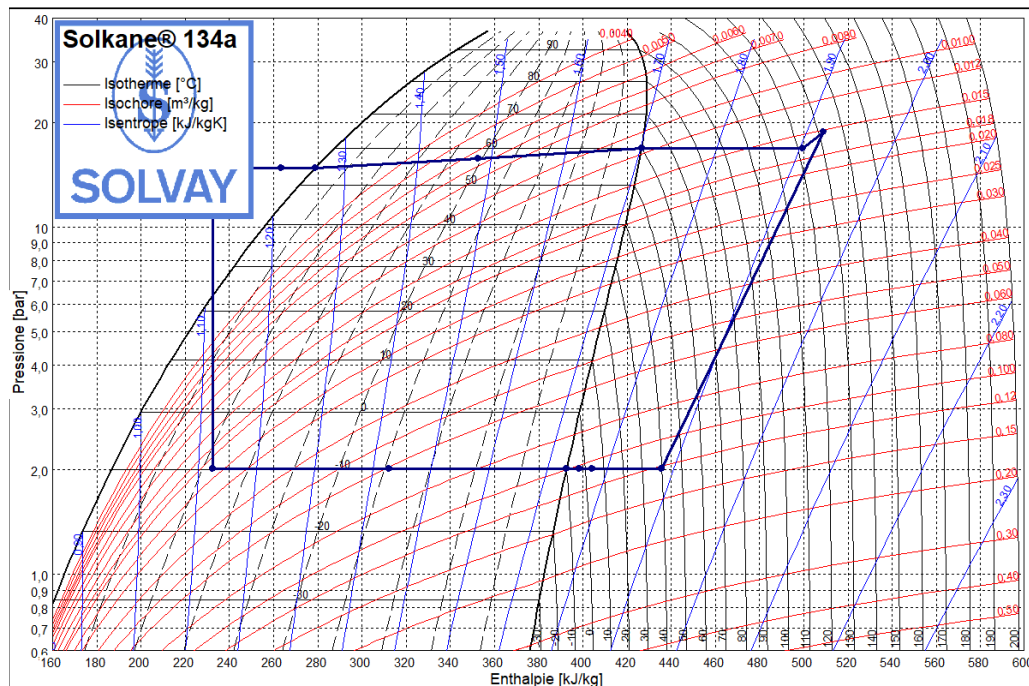


Figure 11: Diagramme P-s Cycle2

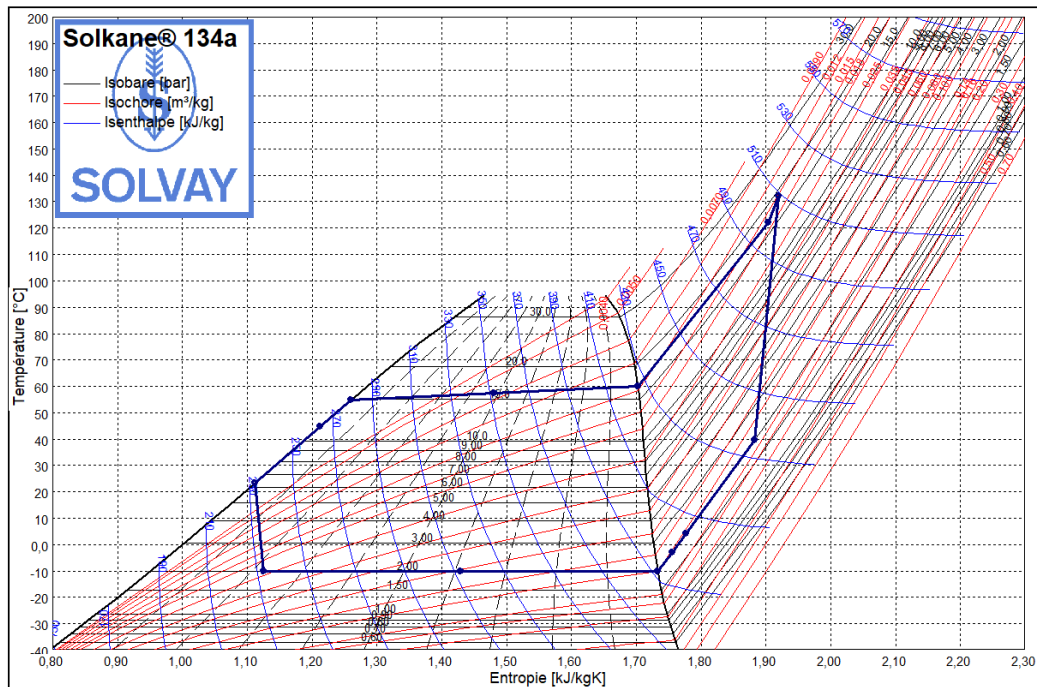


Figure 12: Diagramme T-s Cycle2

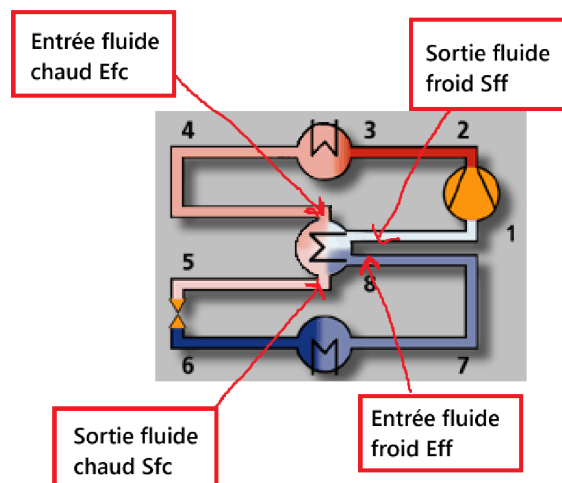


Figure 13: Noms éléments Cycle2

## 5 Étude du cycle à un étage avec échangeur de chaleur Cycle3

L'échangeur de chaleur intermédiaire améliore le rendement du cycle frigorifique en assurant un échange thermique entre le fluide liquide et le fluide gazeux. Le liquide est ainsi prérefroidi avant le détendeur, ce qui réduit la charge thermique, tandis que le gaz est préchauffé avant d'entrer dans le compresseur, limitant les risques liés à la présence de liquide et améliorant l'efficacité de compression. En régulant les températures dans le cycle, cet échangeur contribue à une augmentation du coefficient de performance (COP) et à une meilleure efficacité énergétique globale.

| Puissances Processus à deux niveaux avec re |          |
|---------------------------------------------|----------|
| Evaporateur                                 | 35,0 kW  |
| Liquéfacteur                                | 47,1 kW  |
| Compresseur BP                              | 8,09 kW  |
| Compresseur HP                              | 7,73 kW  |
| Refroidisseur intermédiaire                 | 5,37 kW  |
| Conduite d'aspiration de gaz                | 1,64 kW  |
| Conduite de refoulement de gaz              | 0,000 kW |

Figure 14: Puissances Cycle3

Nous avons les puissances suivantes :  
Et les paramètres de sorties suivants :

|        | <b>p</b> | <b>t</b> | <b>v</b> | <b>h</b> | <b>s</b> | <b>x</b> |  |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| Point  | bar      | °C       | dm³/kg   | kJ/kg    | kJ/kgK   | --       |  |
| 1      | 2,01     | 4,00     | 106,31   | 404,42   | 1,7769   |          |  |
| 2s     | 5,81     | 38,99    | 39,08    | 427,89   | 1,7769   |          |  |
| 2      | 5,81     | 45,04    | 40,20    | 433,76   | 1,7955   |          |  |
| 3      | 5,81     | 25,00    | 36,35    | 414,28   | 1,7323   |          |  |
| 4s     | 16,82    | 67,76    | 12,29    | 436,71   | 1,7323   |          |  |
| 4      | 16,82    | 72,27    | 12,74    | 442,31   | 1,7486   |          |  |
| 5      | 16,82    | 72,27    | 12,74    | 442,31   | 1,7486   |          |  |
| 5''    | 16,82    | 60,00    | 11,46    | 426,63   | 1,7024   |          |  |
| 5''6'm | 16,82    | 60,00    | 6,20     | 356,98   | 1,4935   |          |  |
| 6'     | 16,82    | 60,00    | 0,95     | 287,33   | 1,2845   |          |  |
| 6      | 16,82    | 50,00    | 0,91     | 271,52   | 1,2367   |          |  |
| 7      | 2,01     | -10,00   | 41,47    | 271,52   | 1,2731   | 0,412    |  |
| 78''m  | 2,01     | -10,00   | 70,51    | 332,05   | 1,5031   |          |  |
| 8''    | 2,01     | -10,00   | 99,54    | 392,58   | 1,7331   |          |  |
| 8      | 2,01     | -3,00    | 102,96   | 398,48   | 1,7552   |          |  |

Figure 15: Paramètres de sortie Cycle 3

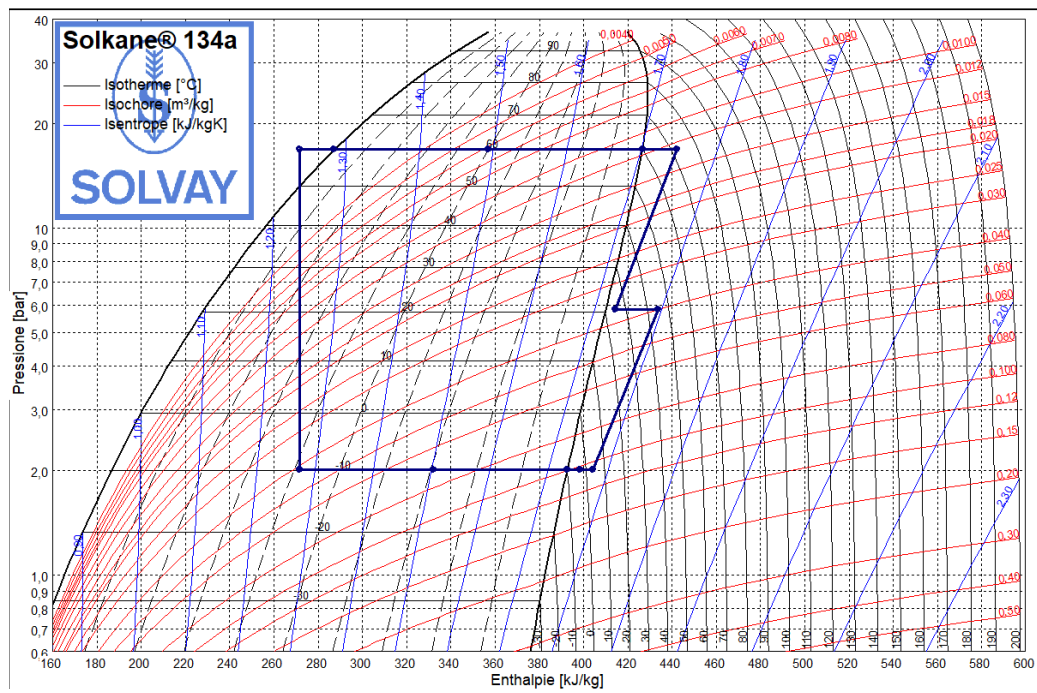


Figure 16: Diagramme P-s Cycle3

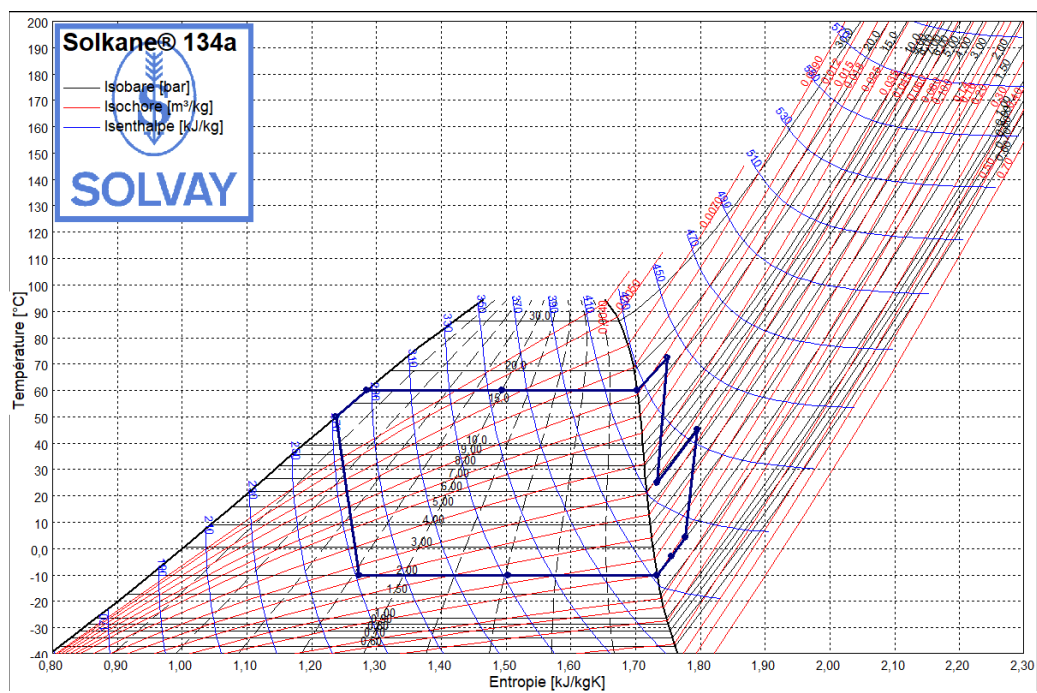


Figure 17: Diagramme T-s Cycle3

| Puissances Processus à deux niveaux avec économiseur |          |                             | BP    | HP    | total    |
|------------------------------------------------------|----------|-----------------------------|-------|-------|----------|
| Evaporateur                                          | 10,0 kW  | Rapport de compression      | 2,40  | 2,40  | 5,78     |
| Liquéfacteur                                         | 13,6 kW  | Différence de pression      | 2,82  | 6,78  | 9,59 bar |
| Compresseur BP                                       | 1,41 kW  | Débit massique              | 58,33 | 72,72 | g/s      |
| Compresseur HP                                       | 1,84 kW  | Débit vol. (à l'aspiration) | 22,33 | 12,33 | m³/h     |
| Economiseur                                          | 2,68 kW  | Capacité volumétrique       | 1613  |       | kJ/m³    |
| Conduite d'aspiration de gaz                         | 0,35 kW  | COP                         | 3,08  |       |          |
| Conduite de refoulement de gaz                       | 0,000 kW |                             |       |       |          |

Figure 19: Valeurs COP, débit massique... Cycle4

## 6 Étude du cycle à deux étages Cycle4

|          | <b>p</b> | <b>t</b> | <b>v</b> | <b>h</b> | <b>s</b> | <b>x</b> |       |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Point    | bar      | °C       | dm³/kg   | kJ/kg    | kJ/kgK   | --       |       |
| 1        | 2,01     | 4,00     | 106,31   | 404,42   | 1,7769   |          | 0,802 |
| 2s       | 4,82     | 32,53    | 46,70    | 423,69   | 1,7769   |          | 0,802 |
| 2        | 4,82     | 37,63    | 47,81    | 428,51   | 1,7925   |          | 0,802 |
| 3        | 4,82     | 34,46    | 47,12    | 425,52   | 1,7829   |          | 1,000 |
| 4s       | 11,60    | 66,75    | 19,97    | 445,73   | 1,7829   |          | 1,000 |
| 4        | 11,60    | 71,41    | 20,48    | 450,78   | 1,7976   |          | 1,000 |
| 5        | 11,60    | 71,41    | 20,48    | 450,78   | 1,7976   |          | 1,000 |
| 5''      | 11,60    | 45,00    | 17,36    | 421,44   | 1,7090   |          | 1,000 |
| 5'',6'm  | 11,60    | 45,00    | 9,12     | 342,67   | 1,4611   |          | 1,000 |
| 6'       | 11,60    | 45,00    | 0,89     | 263,90   | 1,2132   |          | 1,000 |
| 6        | 11,60    | 45,00    | 0,89     | 263,90   | 1,2132   |          | 1,000 |
| 7        | 4,82     | 14,62    | 10,62    | 263,90   | 1,2230   | 0,235    | 0,198 |
| 8        | 4,82     | 21,62    | 44,24    | 413,37   | 1,7425   |          | 0,198 |
| 9        | 11,60    | 19,62    | 0,82     | 227,05   | 1,0941   |          | 0,802 |
| 10       | 2,01     | -10,00   | 20,14    | 227,05   | 1,1041   | 0,196    | 0,802 |
| 10,11''m | 2,01     | -10,00   | 59,84    | 309,82   | 1,4186   |          | 0,802 |
| 11''     | 2,01     | -10,00   | 99,54    | 392,58   | 1,7331   |          | 0,802 |
| 11       | 2,01     | -3,00    | 102,96   | 398,48   | 1,7552   |          | 0,802 |

Figure 18: Paramètres de sortie Cycle4

Grâce à ces valeurs, nous pouvons déduire les valeurs suivantes :

- Débit massique : 58,33 g/s à basse pression et 72,72 g/s à haute pression
- COP = 3,08

En régulant les températures, l'échangeur améliore le COP, renforçant l'efficacité énergétique du cycle frigorifique.

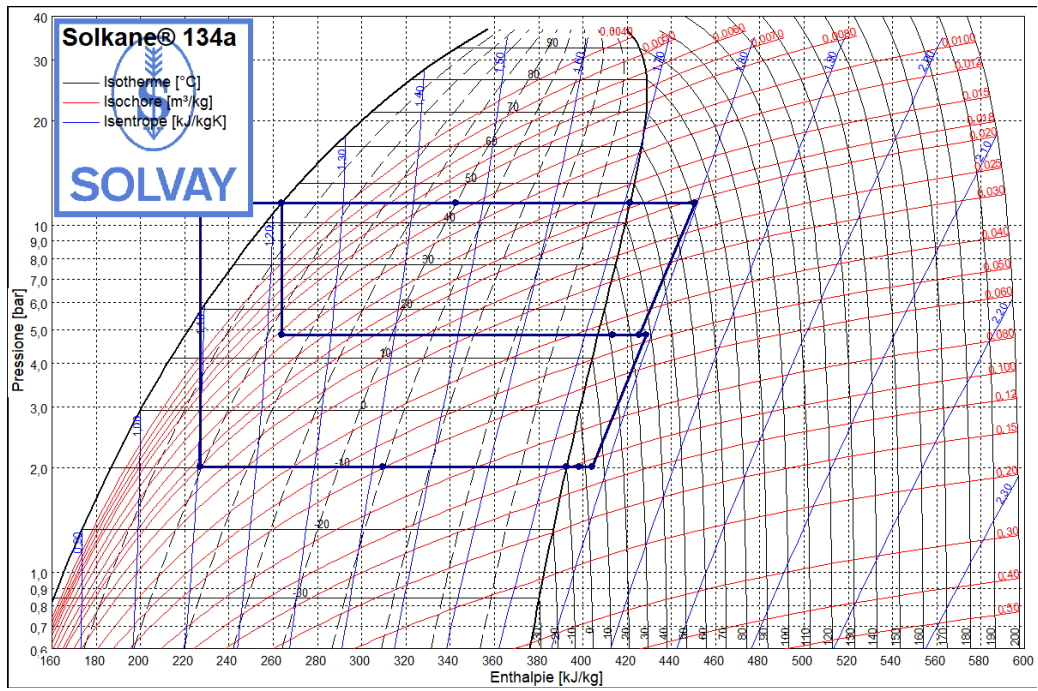


Figure 20: Diagramme P-s Cycle4

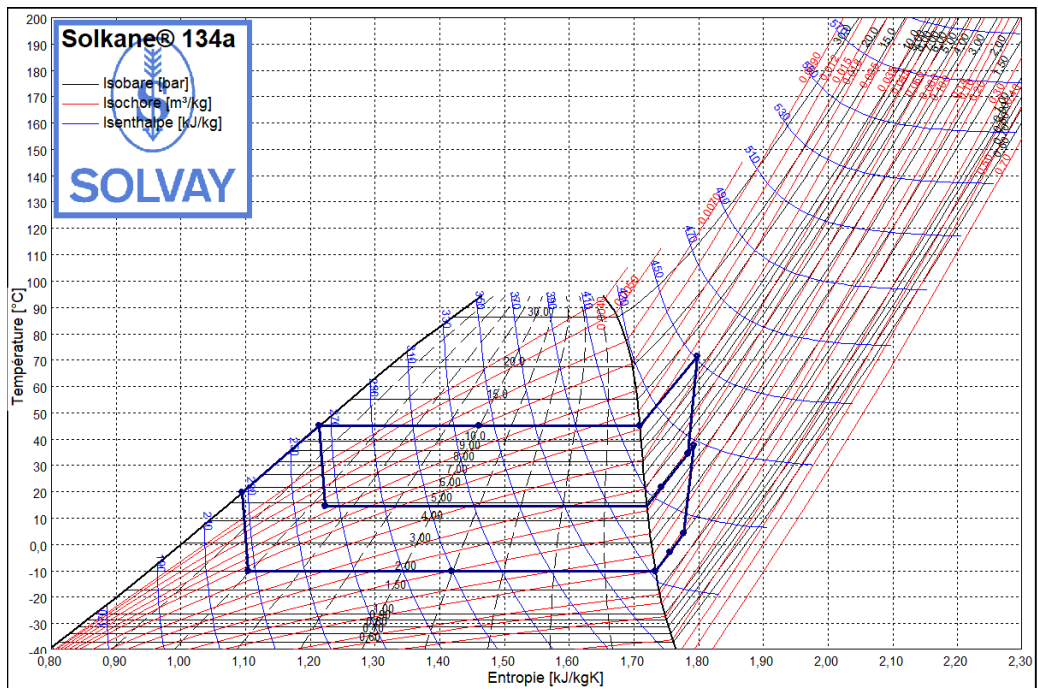


Figure 21: Diagramme T-s Cycle4

## 7 Conclusion

L'étude des différents cycles de machines frigorifiques à compression de vapeur, réalisée dans le cadre de ce Bureau d'Études, nous a permis de mieux comprendre les mécanismes thermodynamiques à l'œuvre dans les systèmes de climatisation. Grâce à l'analyse de plusieurs configurations – cycle simple, cycle avec échangeur de chaleur, et cycle à deux étages – nous avons pu évaluer l'influence des différents composants sur les performances globales de l'installation.

L'utilisation du logiciel Solkane 9.01, couplée aux représentations graphiques sur les diagrammes Mollier et T-s, nous a permis de visualiser précisément le comportement du fluide frigorigène (R134a) tout au long du cycle. Nous avons également pu quantifier les puissances échangées et estimer des indicateurs clés comme le COP.

Ce travail met en évidence l'importance de la modélisation dans l'optimisation énergétique des systèmes frigorifiques, tant pour des raisons de performance que de durabilité environnementale.

## Listes des figures

|    |                                                   |    |
|----|---------------------------------------------------|----|
| 1  | Paramètres de sortie Cycle1 - à la main . . . . . | 3  |
| 2  | Diagramme P-s Cycle1 - à la main . . . . .        | 3  |
| 3  | Diagramme T-s Cycle1 - à la main . . . . .        | 4  |
| 4  | Paramètres de sortie Cycle1 . . . . .             | 4  |
| 5  | Puissances Cycle1 . . . . .                       | 5  |
| 6  | Paramètres de sortie Cycle1 . . . . .             | 5  |
| 7  | Diagramme P-s Cycle1 . . . . .                    | 5  |
| 8  | Diagramme T-s Cycle1 . . . . .                    | 6  |
| 9  | Noms éléments Cycle1 . . . . .                    | 6  |
| 10 | Paramètres de sortie Cycle2 . . . . .             | 7  |
| 11 | Diagramme P-s Cycle2 . . . . .                    | 7  |
| 12 | Diagramme T-s Cycle2 . . . . .                    | 8  |
| 13 | Noms éléments Cycle2 . . . . .                    | 8  |
| 14 | Puissances Cycle3 . . . . .                       | 9  |
| 15 | Paramètres de sortie Cycle 3 . . . . .            | 9  |
| 16 | Diagramme P-s Cycle3 . . . . .                    | 10 |
| 17 | Diagramme T-s Cycle3 . . . . .                    | 10 |
| 19 | Valeurs COP, débit massique... Cycle4 . . . . .   | 11 |
| 18 | Paramètres de sortie Cycle4 . . . . .             | 11 |
| 20 | Diagramme P-s Cycle4 . . . . .                    | 12 |
| 21 | Diagramme T-s Cycle4 . . . . .                    | 12 |