

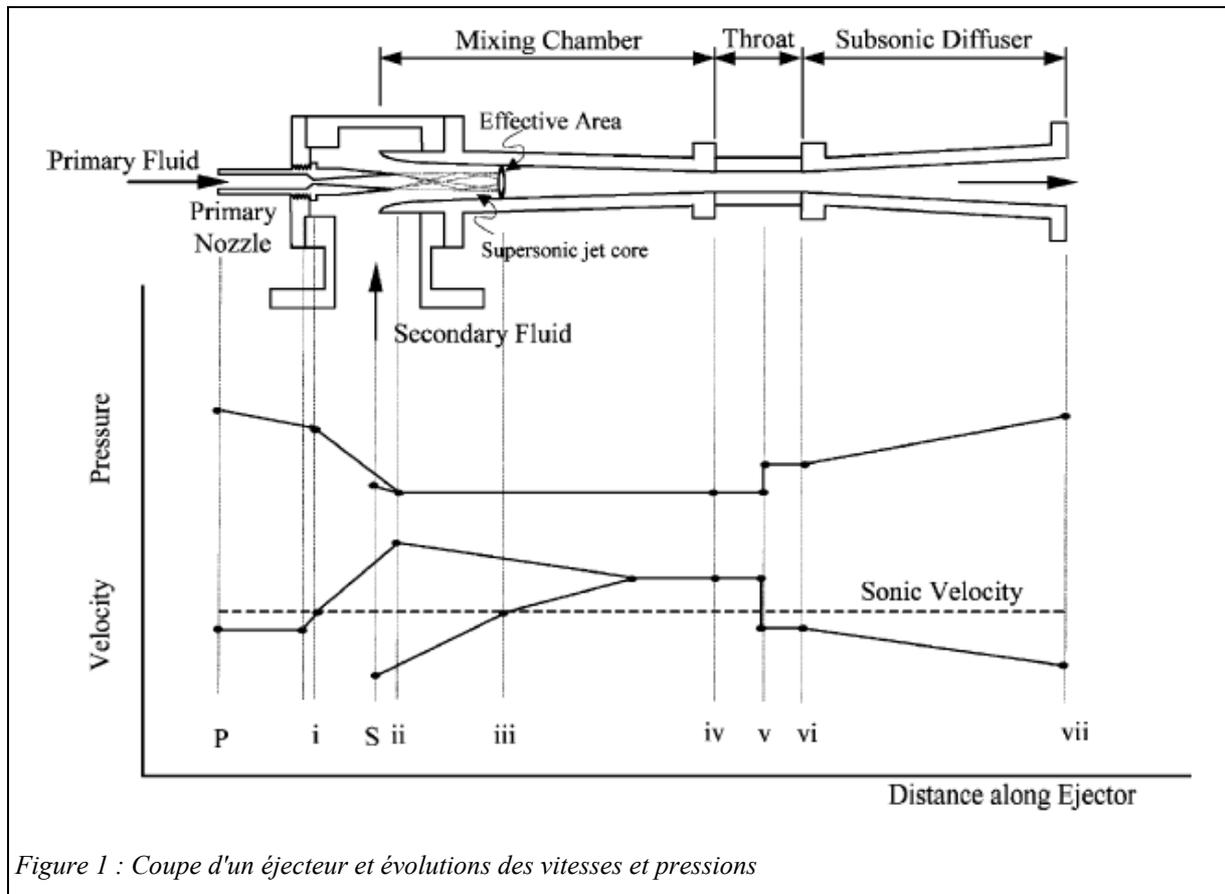
Fiche-guide de TD sur les cycles de réfrigération à éjecteur

1) Objectifs du TD

L'objectif est d'étudier les cycles de réfrigération à éjecteur et de montrer comment on peut les modéliser de manière réaliste avec ThermoOptim, et de comparer les résultats à ceux de cycles sans éjecteur.

Un éjecteur (figure 1) reçoit en entrée deux fluides généralement gazeux, mais qui peuvent aussi être liquides ou diphasiques :

- le fluide à haute pression, appelé fluide moteur ou primaire ;
- le fluide à basse pression, appelé fluide secondaire ou aspiré.



Le fluide moteur est accéléré dans un convergent-divergent, créant une baisse de pression dans la zone de mélange, ce qui a pour effet d'aspirer le fluide secondaire. Les deux fluides sont alors mélangés et une onde de choc peut prendre place dans la zone suivante (throat sur la figure 1). Il en résulte une augmentation de la pression du mélange et une baisse de sa vitesse, qui devient subsonique. Le diffuseur permet de convertir la vitesse résiduelle en augmentation de pression.

L'éjecteur réalise ainsi une compression du fluide secondaire au prix d'une baisse d'enthalpie du fluide primaire.

Nous avons établi un modèle d'éjecteur¹ qui a été implémenté dans une classe externe de ThermoOptim, permettant de simuler des cycles, notamment frigorifiques, mettant en jeu ce composant.

¹ Vous trouverez sa notice, le code de la classe et le fichier extUser.zip correspondant à l'adresse : <http://www.thermooptim.org/sections/logiciels/thermooptim/modelotheque/modele-ejecteur>

L'intérêt d'introduire un éjecteur dans un cycle frigorifique est principalement de diminuer, voire de supprimer, le travail de compression, relativement important dès lors que le fluide comprimé est à l'état gazeux.

Le présent document est un extrait de la fiche-guide complète avec résultats, qui est réservée aux enseignants. C'est pour cette raison que la numérotation des figures comporte des lacunes.

2) Références

D.W. SUN, I.W. EAMES, *Performance characteristics of HCFC-123 ejector refrigeration cycle*, Int. J. Energy Res. 20 (1996) 871–885.

A.A. KORNHAUSER, *The use of an ejector as a refrigerant expander*. Proceedings of the 1990 USNC/IIR—Purdue refrigeration conference, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 1990, p. 10–19.

D. LI, A. GROLL, *Transcritical CO₂ refrigeration cycle with ejector-expansion device*, International Journal of Refrigeration 28 (2005) 766–773

3) TD principal

3.1 Enoncé

Un cycle frigorifique à éjecteur et sans compresseur (figure 2) se présente comme suit :

- en sortie de condenseur, une partie du débit est dirigée vers une pompe qui comprime le liquide, au prix d'un travail très faible ;
- le liquide sous pression est vaporisé dans un générateur à relativement haute température (environ 100 °C), et éventuellement surchauffé, d'une valeur dépendant des propriétés thermodynamiques du fluide. L'énergie thermique fournie au générateur est une énergie payante ;
- cette vapeur surchauffée est ensuite utilisée comme fluide moteur dans l'éjecteur ;
- la partie du liquide qui n'a pas été reprise par la pompe est détendue dans l'évaporateur, puis dirigée vers l'éjecteur, comme fluide secondaire ;
- le mélange sortant de l'éjecteur est condensé dans le condenseur, et le cycle est bouclé.

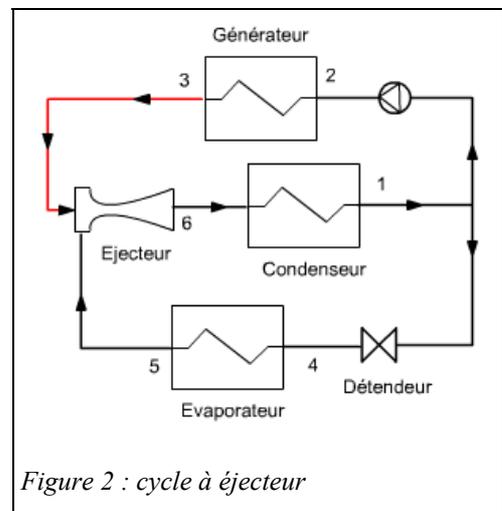


Figure 2 : cycle à éjecteur

L'intérêt de ce cycle est de remplacer le travail consommé par un compresseur par un travail beaucoup plus petit consommé par la pompe, et par une chaleur fournie au générateur à moyenne ou haute température.

3.2 Tracé dans un diagramme

Sur la figure 3, on a tracé dans le diagramme des frigorigènes un exemple de cycle au R123 proposé par Sun et Eames. Le synoptique de l'installation et l'écran de l'éjecteur sont

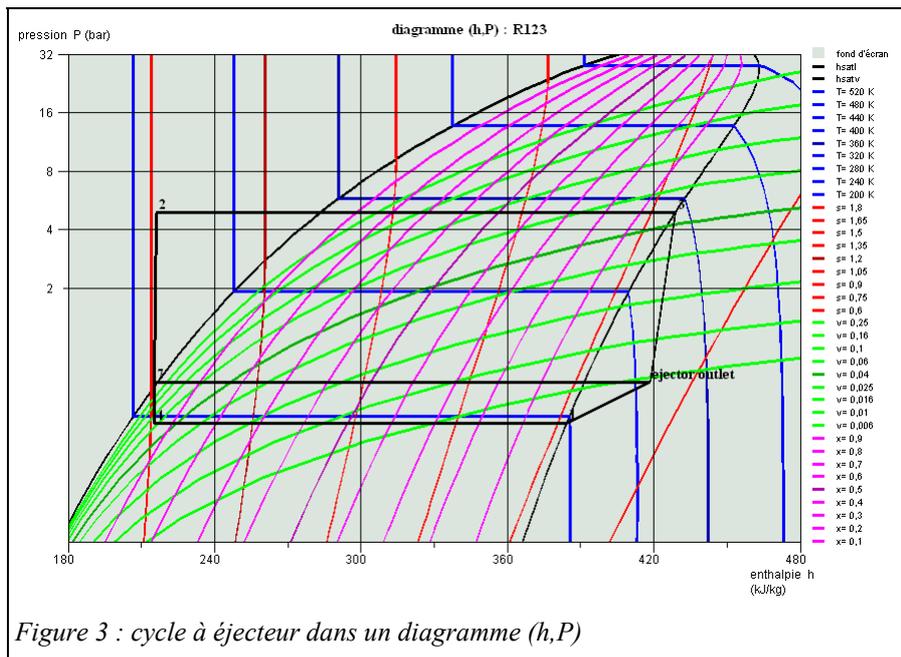


Figure 3 : cycle à éjecteur dans un diagramme (h,P)

donnés figures 4 et 5. Les résultats du modèle ThermoOptim semblent assez proches de ceux (assez synthétiques) fournis par les auteurs.

L'efficacité reste très faible comparativement à celle d'un cycle à absorption², même à simple effet, mais le système est très simple sur le plan technologique.

Toutefois, un point à prendre en considération est qu'un éjecteur ne marche dans de bonnes conditions que si le rapport des sections interne est adapté aux conditions extérieures auxquelles il est soumis. Si le rapport des pressions primaire et secondaire s'écarte des valeurs nominales, le risque qu'il ne soit pas bien adapté est important, faisant alors chuter les performances de l'appareil.

On notera que le modèle est assez sensible aux différents paramètres qui apparaissent sur son écran (figure 5), et qui sont, rappelons-le :

- le facteur P_e/P_b de pertes de charges à l'entrée du fluide secondaire dans l'éjecteur, qui détermine la pression minimale dans l'éjecteur
- le rendement isentropique des deux tuyères (fluide moteur et fluide entraîné)
- le rendement isentropique du diffuseur de sortie
- la facteur de frottement pour prendre éventuellement en compte une perte de charge dans la zone de mélange.

Des études de sensibilité pourront être menées sur l'influence de ces paramètres sur les résultats obtenus.

4) Variantes

4.1 Precooler et régénérateur

Ce cycle peut être légèrement amélioré par l'incorporation d'un precooler, qui permet surtout d'augmenter l'effet frigorifique, et d'un régénérateur, qui permet de diminuer la chaleur à fournir au générateur (figure 6).

The screenshot shows the 'Ejecteur' configuration screen in ThermoOptim. It includes fields for 'noeud' (Ejecteur), 'type' (external mixer), and 'veine principale' (condenser). Global parameters are listed: m global (1,3), h global (418,50977425), and T global (54,75876185). A table lists components: 'effet frigorifique' (m abs: 0,3, T: 5,09, H: 384,41) and 'générateur' (m abs: 1, T: 80,1, H: 428,9). Below the table are fields for 'Pe/Pb factor' (0.98000), 'Friction factor' (0.900), 'nozzle isentropic efficiency' (0.85000), and 'diffuser isentropic efficiency' (0.85000). The ambient conditions are 'Amb (mm2): 1493.627 Asb (mm2): 7294.393'. Buttons for 'Calculer', 'Dupliquer', 'Supprimer', 'Sauver', and 'Fermer' are visible.

nom transfo	m abs	T (°C)	H
effet frigorifique	0,3	5,09	384,41
générateur	1	80,1	428,9

Figure 5 : Ecran de l'éjecteur

² cf fiche thématique : <http://www.thermooptim.org/sections/technologies/systemes/cycles-absorption>

4.2 Cycle à compresseur et éjecteur

Une variante du cycle précédent consiste à insérer un éjecteur dans un cycle à compression. L'un des intérêts de ce cycle est de réduire le travail du compresseur étant donné que le rapport de compression diminue.

On a considéré dans cet exemple qu'on disposait au point 3 de 1 kg/s de R134a à 12 bars à l'état liquide sous-refroidi de 5 °C, et au point 1 en sortie d'évaporateur de R134a à 1 bar à l'état de vapeur surchauffée de 5 °C. Le R134a sortant du condenseur est détendu dans l'éjecteur, ce qui lui permet d'entraîner la vapeur, et de la recomprimer légèrement. Le mélange diphasique en sortie d'éjecteur est séparé, et le liquide entre dans le détendeur puis dans l'évaporateur. Le flux de vapeur est comprimé à 12 bars, puis condensé à l'état liquide légèrement sous-refroidi.

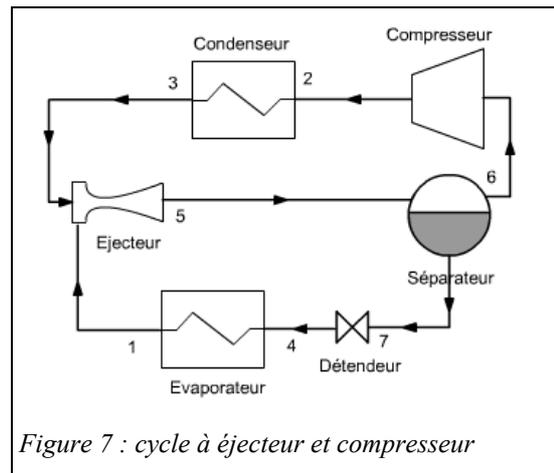


Figure 7 : cycle à éjecteur et compresseur

Le synoptique Thermoptim de l'installation est donné figure 8.

A titre de comparaison, le synoptique d'un cycle sans éjecteur est donné figure 9. Le gain sur le COP apparaît clairement.

4.3 Cycle à compresseur et éjecteur au CO2 supercritique

Dans certaines conditions, et notamment si le frigorigène est du CO2 supercritique, le cycle à compresseur et éjecteur présente une contrainte forte : la répartition des débits entre les branches à haute et basse pressions doit impérativement être cohérente avec le titre du frigorigène en sortie de l'éjecteur, ce qui demande de mettre en œuvre des régulations particulières. C'est pour cette raison qu'apparaissent sur le schéma de la figure 10 le diviseur et le mélangeur en sortie de séparateur de la figure 10.

On a considéré ici qu'on disposait au point 3 de 1 kg/s de CO2 supercritique à 40 °C et 100 bars, et au point 1 en sortie d'évaporateur de CO2 de vapeur à 40 bars et 10 °C, ce qui représente une surchauffe de 5 °C environ.

Le CO2 supercritique est détendu dans l'éjecteur, ce qui lui permet d'entraîner la vapeur, et de la recomprimer légèrement.

Le mélange diphasique en sortie d'éjecteur est séparé, puis le complément à 1 kg/s de la vapeur est remélangé au flux liquide avant d'entrer dans le détendeur puis dans l'évaporateur. Le flux principal de vapeur est comprimé à 100 bars, puis condensé à 40 °C.

Le synoptique Thermoptim de l'installation est donné figure 11.

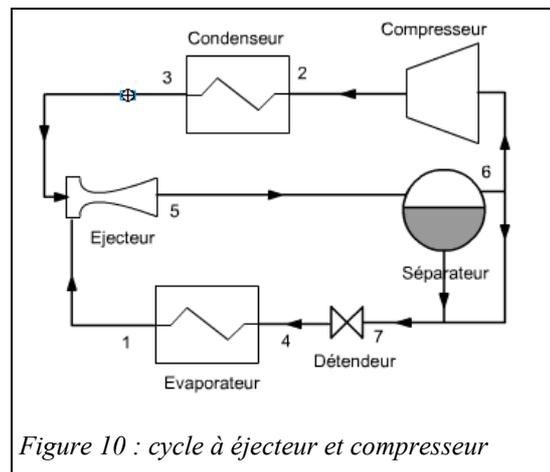


Figure 10 : cycle à éjecteur et compresseur

A titre de comparaison, le synoptique d'un cycle sans éjecteur est donné figure 12. Le gain sur le COP apparaît clairement.

4.3 Bilan exergétique

Il est aussi intéressant de demander aux élèves de dresser les bilan exergétiques de ces cycles, s'ils disposent de suffisamment de temps.

La séance Diapason S06³ leur fournira si nécessaire des explications sur la manière de procéder.

5) Fichiers de travail

Les fichiers de projet et de schéma des modèles Thermoptim des cycles présentés ci-dessus sont joints au dossier dans l'archive Ejecteur.zip. Les fichiers de la classe externe FluidEjector peuvent être obtenus sur le portail Thermoptim-UNIT(www.thermoptim.org, cf. note au bas de la page 1).

³ Séance S06 : <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S06/seance.html>