

Conception et Simulation d'une Machine Frigorifique à Éjecteur Fonctionnant au R718

LISONGO SEMETE Gabriel

16 février 2026

Résumé

Ce travail présente la conception, la modélisation et la simulation d'une machine frigorifique à éjecteur fonctionnant au fluide frigorigène naturel R718 (eau).

L'objectif principal est le dimensionnement inverse du système à partir de deux paramètres d'entrée : la puissance frigorifique de l'évaporateur et la température d'évaporation. Le modèle développé permet de calculer automatiquement les états thermodynamiques du cycle complet, les débits massiques, le coefficient de performance (COP), ainsi que les indicateurs de diagnostic.

Une modélisation avancée de l'éjecteur a été implémentée en intégrant les effets d'écoulement compressible supersonique, la détection d'onde de choc normale et l'analyse des régimes d'aspiration.

Une interface graphique interactive permet la visualisation dynamique du fonctionnement du système ainsi que l'affichage des diagrammes thermodynamiques P-h et T-s.

Les résultats obtenus démontrent la cohérence thermodynamique du modèle ainsi que la convergence du dimensionnement global du système.

Mots-clés : Éjecteur, R718, Cycle frigorifique, Écoulement compressible, Simulation thermodynamique, Dimensionnement inverse.

Abstract

This work presents the design, modeling, and simulation of an ejector refrigeration system operating with the natural refrigerant R718 (water).

The main objective is the inverse dimensioning of the system based on two input parameters : the evaporator cooling capacity and the evaporation temperature. The developed model automatically computes thermodynamic states, mass flow rates, coefficient of performance (COP), and diagnostic indicators.

An advanced ejector model including supersonic compressible flow, normal shock detection, and suction regime analysis was implemented.

A graphical user interface enables dynamic visualization of system behavior and thermodynamic diagrams (P-h and T-s).

Results demonstrate thermodynamic consistency and successful convergence of the global system dimensioning.

Keywords : Ejector, R718, Refrigeration cycle, Compressible flow, Thermodynamic simulation, Inverse design.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Liste des abréviations	vii
Notations et Conventions	viii
I Étude des composants	1
Introduction de la Partie I	2
1 Description de la machine frigorifique à eau de 12 kW	3
1.1 Évolution historique et positionnement scientifique	3
1.2 Organisation générale de la machine	3
1.3 Fonctionnement détaillé du cycle	4
1.3.1 Détente isoenthalpique ($1 \rightarrow 2$)	4
1.3.2 Évaporation ($2 \rightarrow 3$)	4
1.3.3 Pompage ($1 \rightarrow 7$)	4
1.3.4 Génération vapeur motrice ($7 \rightarrow 8$)	4
1.3.5 Éjecteur ($8 \rightarrow 4 \rightarrow 5$)	5
1.3.6 Condensation ($5 \rightarrow 6$)	5
1.4 Indicateur de performance énergétique	5
1.5 Résumé du chapitre	5
2 Le fluide frigorigène : l'eau (R718)	6
2.1 Conditions thermodynamiques requises pour un fluide frigorigène	6
2.2 Relation pression-température et fonctionnement sous vide	7
2.3 Analyse du volume spécifique vapeur	7
2.4 Avantages thermodynamiques du R718	8
2.5 Contraintes spécifiques du fonctionnement sous vide	8
2.6 Comparaison avec un fluide HFC : analyse critique	8
2.7 Résumé du chapitre	9
3 L'éjecteur de fluide	10
3.1 Technologie et typologie des éjecteurs	10
3.1.1 Architecture constructive	10
3.1.2 Typologie fonctionnelle	11
3.1.3 Contraintes technologiques spécifiques au R718	11

3.2	Rôle systémique et repérage des états du cycle	11
3.3	Écoulement compressible dans la tuyère primaire : étranglement et relations isentropiques	12
3.3.1	Hypothèses de base	12
3.3.2	Étranglement au col (<i>choking</i>)	12
3.3.3	Rendement isentropique de tuyère	12
3.4	Modélisation du mélange : bilans 1D en section à aire constante	13
3.4.1	Conservation de la masse	13
3.4.2	Conservation de la quantité de mouvement	13
3.4.3	Bilan d'énergie (mélange adiabatique)	13
3.5	Ondes de choc et relation de Hugoniot : choc normal dans l'éjecteur	13
3.5.1	Origine physique du choc	13
3.5.2	Équations de Rankine-Hugoniot (forme générale)	13
3.5.3	Relations Mach (gaz parfait) et adaptation au R718 réel	14
3.6	Régime critique, double étranglement et pression critique	14
3.6.1	Étranglement primaire	14
3.6.2	Étranglement secondaire et régime critique	14
3.6.3	Pression critique de condensation	15
3.7	Modèle mathématique 1D hybride retenu pour la simulation	15
3.7.1	Structure du modèle	15
3.7.2	Fermeture par rendements et paramètres semi-empiriques	15
3.7.3	Propriétés réelles via CoolProp	15
3.8	Comparaison critique des principaux modèles 1D d'éjecteurs	16
	Résumé du chapitre	16

II Étude systémique 17

Introduction de la Partie II 18

Références	19
----------------------	----

Table des figures

Liste des tableaux

2.1	Comparaison qualitative entre l'eau (R718) et le R134a.	9
3.1	Comparaison synthétique de modèles 1D d'éjecteurs issus de la littérature.	16

Liste des abréviations

COP	Coefficient de performance
R718	Eau utilisée comme fluide frigorigène
LMTD	Log Mean Temperature Difference
MVC	Model View Controller
UI	User Interface
P-h	Diagramme Pression–Enthalpie
T-s	Diagramme Température–Entropie

Notations et Conventions

Convention de numérotation des états

Le cycle thermodynamique est défini selon la convention suivante :

- $1 \rightarrow 2$: Détendeur
- $2 \rightarrow 3$: Évaporateur
- $3 \rightarrow 4$: Chambre de mélange de l'éjecteur
- $4 \rightarrow 5$: Diffuseur de l'éjecteur
- $5 \rightarrow 6$: Condenseur
- $1 \rightarrow 7$: Pompe
- $7 \rightarrow 8$: Chaudière (Générateur)
- $8 \rightarrow 4$: Tuyère de l'éjecteur

Grandeurs thermodynamiques

P	Pression (Pa)
T	Température (K)
h	Enthalpie spécifique (J/kg)
s	Entropie spécifique (J/kg.K)
x	Titre vapeur
\dot{m}	Débit massique (kg/s)
μ	Taux d'entraînement de l'éjecteur
M	Nombre de Mach

Les diagrammes thermodynamiques P-h et T-s présentent uniquement la numérotation des états (1 à 8) sans légende descriptive.

Première partie

Étude des composants

Introduction de la Partie I

Cette première partie est consacrée à l'étude détaillée des composants constituant la machine frigorifique à éjecteur fonctionnant au R718 (eau). L'objectif est de construire une base scientifique et technologique robuste permettant, d'une part, de justifier les choix de configuration et, d'autre part, d'établir les modèles nécessaires à la simulation numérique du cycle complet.

Dans ce travail, l'approche adoptée repose sur une modélisation principalement unidimensionnelle (1D) des différents organes, en s'appuyant sur les principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Chaque composant est étudié selon une démarche structurée comprenant : (i) son rôle dans le système, (ii) les phénomènes physiques dominants, (iii) les aspects technologiques, et (iv) l'établissement d'un modèle mathématique utilisable en simulation.

Une attention particulière est portée à l'éjecteur, organe clé du cycle, car il assure simultanément l'aspiration de la vapeur secondaire issue de l'évaporateur et la recompression du mélange vers le niveau de pression de condensation. Les sections dédiées à l'éjecteur intègrent les notions d'écoulement compressible, de régime supersonique et de formation d'onde de choc, afin d'aboutir à un modèle représentatif des régimes de fonctionnement observés.

Enfin, l'étude des échangeurs (évaporateur, condenseur, générateur/chaudière) met en évidence le lien direct entre performances thermodynamiques et dimensionnement des surfaces d'échange, via l'utilisation du coefficient global de transfert thermique K , conformément à la convention de notation adoptée dans ce mémoire.

Chapitre 1

Description de la machine frigorifique à eau de 12 kW

1.1 Évolution historique et positionnement scientifique

L'histoire de la réfrigération thermodynamique débute au XIX^e siècle avec les travaux fondateurs de Carnot sur les cycles idéaux. Par la suite, les premières machines à compression mécanique utilisant l'ammoniac et le dioxyde de carbone ont été développées pour des applications industrielles.

Parallèlement aux cycles à compression, des solutions alternatives utilisant la chaleur comme énergie motrice ont émergé, notamment les cycles à absorption et les cycles à éjection. Les premiers systèmes à jet de vapeur (*steam-jet refrigeration*) apparaissent à la fin du XIX^e siècle et trouvent des applications industrielles majeures au XX^e siècle (Sokolov & Hershgal, 1990).

Avec les restrictions environnementales issues du Protocole de Montréal puis de l'amendement de Kigali, les fluides frigorigènes synthétiques ont progressivement été remplacés par des fluides naturels (Herold, Radermacher, & Klein, 2016). L'eau (R718) présente l'avantage d'être non toxique, non inflammable et universellement disponible.

La valorisation de l'énergie solaire thermique dans les régions intertropicales a renforcé l'intérêt pour les cycles frigorifiques trithermes (Kalogirou, 2014).

Le présent travail étudie une machine frigorifique simple effet, dimensionnée pour une puissance frigorifique nominale de :

- Température d'évaporation : $T_{evap} = 10^{\circ}C$
- Température de condensation : $T_{cond} = 35^{\circ}C$
- Température du générateur : $T_{gen} = 100^{\circ}C$
- Puissance frigorifique nominale : $\dot{Q}_{evap} = 12 \text{ kW}$

Cette configuration est adaptée aux conditions climatiques de la région intertropicale.

1.2 Organisation générale de la machine

La machine étudiée comprend :

- Une pompe d'alimentation
- Une chaudière solaire
- Un éjecteur (tuyère + chambre de mélange + diffuseur)
- Un condenseur

- Un détendeur
- Un évaporateur

Le cycle thermodynamique suit la convention de numérotation suivante :

$1 \rightarrow 2$	Détendeur
$2 \rightarrow 3$	Évaporateur
$3 \rightarrow 4$	Chambre de mélange
$4 \rightarrow 5$	Diffuseur
$5 \rightarrow 6$	Condenseur
$1 \rightarrow 7$	Pompe
$7 \rightarrow 8$	Chaudière
$8 \rightarrow 4$	Tuyère primaire

1.3 Fonctionnement détaillé du cycle

1.3.1 Détente isoenthalpique ($1 \rightarrow 2$)

La détente dans le détendeur est modélisée comme isoenthalpique :

$$h_1 = h_2 \quad (1.1)$$

La pression chute de P_{cond} à P_{evap} , générant un mélange diphasique.

1.3.2 Évaporation ($2 \rightarrow 3$)

Dans l'évaporateur, le fluide absorbe la puissance frigorifique :

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{sec} (h_3 - h_2) \quad (1.2)$$

À $10^\circ C$, la pression de saturation est de l'ordre du kPa, impliquant un volume spécifique élevé (Moran & Shapiro, 2014a).

1.3.3 Pompage ($1 \rightarrow 7$)

La pompe élève la pression du liquide :

$$W_p = \dot{m}_{pri} (h_7 - h_1) \quad (1.3)$$

Le travail de la pompe reste négligeable devant la puissance thermique.

1.3.4 Génération vapeur motrice ($7 \rightarrow 8$)

La chaudière solaire fournit la chaleur :

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{m}_{pri} (h_8 - h_7) \quad (1.4)$$

La vapeur atteint l'état saturé à $T_{gen} = 100^\circ C$.

1.3.5 Éjecteur ($8 \rightarrow 4 \rightarrow 5$)

L'éjecteur réalise trois transformations :

1. Accélération dans la tuyère primaire ($8 \rightarrow 4$)
2. Mélange adiabatique ($3 \rightarrow 4$)
3. Recompression dans le diffuseur ($4 \rightarrow 5$)

Le taux d'entraînement est défini par :

$$\mu = \frac{\dot{m}_{sec}}{\dot{m}_{pri}} \quad (1.5)$$

Les équations de conservation utilisées sont celles de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie (Huang, Chang, Wang, & Petrenko, 1999).

1.3.6 Condensation ($5 \rightarrow 6$)

Dans le condenseur, le fluide rejette la chaleur :

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{tot} (h_5 - h_6) \quad (1.6)$$

Le fluide redevient liquide saturé à la pression P_{cond} .

1.4 Indicateur de performance énergétique

Le coefficient de performance énergétique est défini par :

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{gen}} \quad (1.7)$$

Contrairement aux cycles à compression mécanique, le travail de la pompe est négligeable.

Les études antérieures rapportent des valeurs typiques de COP comprises entre 0.2 et 0.5 pour les cycles à éjection vapeur (Chunnanond & Aphornratana, 2004). Le modèle développé dans ce travail permet d'atteindre des performances supérieures dans des conditions favorables.

1.5 Résumé du chapitre

Ce chapitre a présenté une description détaillée de la machine frigorifique à éjecteur fonctionnant au R718, en mettant l'accent sur les aspects historiques, scientifiques et technologiques. Les éléments clés abordés comprennent :

- L'évolution historique des cycles à éjection
- Le positionnement environnemental du R718
- L'architecture détaillée de la machine
- La convention de numérotation adoptée
- Les indicateurs énergétiques fondamentaux

Elle constitue le socle de la modélisation mathématique détaillée développée dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Le fluide frigorigène : l'eau (R718)

Le choix du fluide frigorigène constitue l'un des déterminants majeurs des performances thermodynamiques, environnementales et technologiques d'un système frigorifique. Historiquement, les premiers cycles frigorifiques exploitaient des fluides naturels tels que l'ammoniac (NH_3), le dioxyde de carbone (CO_2) ou l'eau, avant que les chlorofluorocarbures (CFC) ne dominent le marché au milieu du XX^e siècle. Toutefois, les impacts environnementaux associés aux CFC puis aux hydrofluorocarbures (HFC) ont conduit à une transition progressive vers des fluides à faible potentiel de réchauffement global (GWP) (Herold et al., 2016).

Dans ce contexte, l'eau — référencée **R718** selon la nomenclature ASHRAE — présente un intérêt renouvelé. Elle possède un GWP nul, un ODP nul, une non-toxicité, une ininflammabilité et une disponibilité universelle. Cependant, son utilisation comme fluide frigorigène impose des contraintes physiques majeures liées à ses propriétés thermodynamiques intrinsèques, notamment une pression de saturation très faible aux températures usuelles de production de froid.

L'analyse approfondie de ces caractéristiques est indispensable pour comprendre les défis liés au fonctionnement sous vide poussé de la machine étudiée.

2.1 Conditions thermodynamiques requises pour un fluide frigorigène

Un fluide frigorigène adapté doit satisfaire plusieurs critères thermodynamiques fondamentaux, parmi lesquels :

- une pression d'évaporation modérée (limitant le vide poussé) ;
- une chaleur latente élevée ;
- un faible volume spécifique en phase vapeur (limitant les débits volumiques) ;
- une température critique suffisamment élevée (élargissant le domaine opératoire).

D'un point de vue énergétique, l'effet frigorifique spécifique associé à un changement de phase à l'évaporateur peut s'exprimer, en première approximation, par :

$$q_{\text{evap}} = h_v - h_l, \quad (2.1)$$

où h_v est l'enthalpie de la vapeur saturée et h_l celle du liquide saturé. Plus la différence ($h_v - h_l$) est grande, plus la puissance frigorifique spécifique est élevée pour un débit massique donné.

L'eau présente une chaleur latente de vaporisation particulièrement élevée (de l'ordre de $\approx 2400 \text{ kJ kg}^{-1}$ à 10°C), ce qui constitue un avantage énergétique majeur (Moran & Shapiro, 2014a). La contrepartie se manifeste néanmoins par la relation pression-température, particulièrement défavorable au voisinage de 10°C .

2.2 Relation pression-température et fonctionnement sous vide

La pression de saturation d'un fluide pur est régie par l'équation de Clausius-Clapeyron :

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(v_v - v_l)}, \quad (2.2)$$

où L est la chaleur latente de changement de phase, et v_v et v_l sont respectivement les volumes spécifiques de la vapeur et du liquide.

Pour l'eau à 10°C , la pression de saturation est typiquement :

$$P_{\text{sat}}(10^\circ\text{C}) \approx 1.23 \text{ kPa}. \quad (2.3)$$

Ce niveau de pression est environ 800 fois inférieur à la pression atmosphérique standard, ce qui implique :

- un fonctionnement sous vide profond ;
- un volume spécifique vapeur très élevé ;
- des vitesses d'écoulement c potentiellement élevées dans les conduites et l'éjecteur ;
- une sensibilité accrue aux pertes de charge et aux infiltrations d'air.

Ainsi, la principale difficulté associée au R718 en réfrigération n'est pas la capacité frigorifique intrinsèque, mais les contraintes mécaniques, hydrauliques et d'étanchéité qu'impose le vide poussé.

2.3 Analyse du volume spécifique vapeur

En première approche, le volume spécifique vapeur peut être estimé par le modèle du gaz parfait :

$$v \approx \frac{RT}{P}, \quad (2.4)$$

où R est la constante spécifique du gaz et T la température absolue. Pour la vapeur d'eau, $R \approx 461 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

À $T \approx 283 \text{ K}$ et $P \approx 1.23 \times 10^3 \text{ Pa}$, on obtient :

$$v \approx \frac{461 \times 283}{1230} \approx 106 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}. \quad (2.5)$$

Cet ordre de grandeur met en évidence un débit volumique important pour des débits massiques pourtant modérés. Les conséquences directes incluent :

- un dimensionnement critique des sections d'écoulement ;
- un accroissement du risque de pertes de charge (et donc de dégradation des performances) ;

- un comportement fortement non linéaire de l'éjecteur vis-à-vis des variations de pression secondaire.

Des travaux de référence montrent en particulier que la performance d'un éjecteur devient très sensible aux variations de conditions lorsqu'on opère avec de grands volumes spécifiques vapeur (Huang et al., 1999).

2.4 Avantages thermodynamiques du R718

Malgré les contraintes associées au vide poussé, l'eau présente plusieurs avantages thermodynamiques et environnementaux :

1. **Chaleur latente élevée** : elle permet de réduire le débit massique nécessaire pour une puissance frigorifique donnée.
2. **Température critique élevée** : $T_c \approx 374^\circ\text{C}$, autorisant un large domaine d'exploitation thermique.
3. **Capacité calorifique liquide élevée** : favorisant une stabilité thermique des phases liquides.
4. **Compatibilité environnementale** : GWP = 0 et ODP = 0.

Selon Chunnanond et Aphornratana ((2004)), les cycles à éjection vapeur utilisant l'eau sont particulièrement adaptés aux applications de froid solaire, notamment en raison de la compatibilité entre chaleur disponible à moyenne température et génération de vapeur motrice.

2.5 Contraintes spécifiques du fonctionnement sous vide

Le fonctionnement sous vide impose plusieurs exigences de conception et d'exploitation :

- étanchéité renforcée de l'ensemble des composants ;
- gestion des infiltrations d'air et des gaz non condensables ;
- sélection de matériaux compatibles avec le vide et les gradients thermiques ;
- surveillance du risque de cavitation et des conditions d'aspiration de la pompe (NPSH).

À très basse pression, les problèmes de désamorçage, d'instabilité hydraulique et de cavitation peuvent compromettre la continuité de fonctionnement. Ces contraintes justifient une modélisation rigoureuse des pertes de charge et des bilans énergétiques, ainsi qu'un dimensionnement attentif des conduites et des échangeurs.

2.6 Comparaison avec un fluide HFC : analyse critique

Le tableau 2.1 présente une comparaison qualitative entre l'eau (R718) et un HFC courant (R134a), à titre illustratif.

TABLE 2.1 – Comparaison qualitative entre l'eau (R718) et le R134a.

Propriété	Eau (R718)	R134a
GWP	0	≈ 1430
Pression de saturation à 10°C	≈ 1.23 kPa	≈ 300 kPa
Chaleur latente	Très élevée	Moyenne
Volume spécifique vapeur	Très élevé	Faible

Il apparaît que le principal handicap du R718 est principalement **mécanique et hydraulique** (vide poussé et forts débits volumiques) plutôt qu'énergétique. Ainsi, son adoption dépend davantage de la conception du système (étanchéité, dimensionnement, pertes de charge) que de ses performances thermiques intrinsèques.

2.7 Résumé du chapitre

L'eau (R718) constitue un fluide frigorigène écologiquement irréprochable et thermodynamiquement performant en termes d'effet frigorifique spécifique. Cependant, son utilisation à 10°C impose un fonctionnement sous vide profond, entraînant des volumes spécifiques élevés et une forte sensibilité aux pertes de charge.

Ces particularités rendent indispensable :

- une modélisation fine de l'éjecteur ;
- une attention particulière au dimensionnement hydraulique ;
- une analyse détaillée des phénomènes d'évaporation et de condensation.

La section suivante abordera le cœur dynamique du système : l'éjecteur de fluide, dont le comportement conditionne directement la stabilité et le *COP* de la machine.

Chapitre 3

L'éjecteur de fluide : revue technologique, phénoménologique et modélisation 1D

Dans une machine frigorifique à éjecteur, l'éjecteur remplace la compression mécanique par une recompression aérodynamique fondée sur la conversion d'énergie de pression en énergie cinétique, suivie d'une récupération partielle de pression statique dans un diffuseur. Dépourvu de pièces mobiles, ce dispositif présente des avantages importants en termes de robustesse, simplicité et coût de maintenance. En contrepartie, sa plage de fonctionnement est généralement étroite et sa performance est fortement sensible au couple de pressions ($P_{\text{gen}}, P_{\text{cond}}$), ainsi qu'aux pertes de charge côté aspiration (Chunnanond & Aphornratana, 2004 ; Huang et al., 1999).

Dans le cas du fluide frigorigène R718, la difficulté est renforcée par le fonctionnement sous vide profond côté évaporateur, impliquant de très grands volumes spécifiques vapeur. Les vitesses d'écoulement c peuvent alors devenir suffisamment élevées pour conduire localement à des régimes compressibles, voire supersoniques, avec possibilité de formation d'ondes de choc dans la section de mélange ou le diffuseur (Moran & Shapiro, 2014a ; Anderson, 2016). Une revue technologique et théorique solide constitue donc un préalable indispensable à la modélisation retenue dans ce mémoire.

3.1 Technologie et typologie des éjecteurs

3.1.1 Architecture constructive

Un éjecteur de vapeur simple effet utilisé en réfrigération comporte classiquement :

- une **tuyère primaire** (souvent convergente-divergente de type Laval) alimentée par la vapeur motrice issue du générateur ;
- une **chambre d'aspiration** connectée à l'évaporateur ;
- une **section de mélange**, fréquemment assimilée à une section à aire constante (*constant-area mixing section*) ;
- un **diffuseur** (souvent divergent) assurant la récupération de pression statique ;
- éventuellement une **géométrie variable** (aiguille, col réglable) permettant d'adapter la section critique et d'élargir la plage de fonctionnement (Chunnanond & Aphornratana, 2004).

Les paramètres géométriques structurants incluent le diamètre au col d_t , le rapport d'expansion de la tuyère, le diamètre de mélange d_m , la longueur de mélange L_m , ainsi que l'angle et la longueur du diffuseur. La littérature montre notamment que le ratio L_m/d_m et la position relative de la sortie de tuyère (nozzle exit position) influencent fortement le rapport d'entraînement μ et la pression critique de refoulement (Huang et al., 1999 ; Eames, Aphornratana, & Haider, 1995).

3.1.2 Typologie fonctionnelle

Les éjecteurs peuvent être classés selon :

- la géométrie : éjecteur à géométrie fixe vs. géométrie variable ;
- le schéma de mélange : mélange à pression constante (*constant-pressure mixing*) vs. mélange à aire constante (*constant-area mixing*) ;
- le régime : régime critique (double étranglement) vs. régime subcritique (dépendant de P_{cond}) (Chunnanond & Aphornratana, 2004).

Pour une approche de modélisation système, la formulation « aire constante » est souvent retenue, car elle conduit à une structure 1D robuste et comparable aux formulations de référence (Huang et al., 1999).

3.1.3 Contraintes technologiques spécifiques au R718

Avec l'eau, les contraintes suivantes dominent :

- côté aspiration, P_{evap} est typiquement de l'ordre du kPa à 10°C, imposant une excellente étanchéité et une gestion des non-condensables ;
- les pertes de charge doivent être minimisées, car elles dégradent directement le rapport de pression disponible pour l'éjecteur ;
- la conception doit tenir compte des effets de corrosion, de dégazage et de purge des gaz résiduels (Sokolov & Hershgal, 1990).

3.2 Rôle systémique et repérage des états du cycle

Dans la convention adoptée dans ce mémoire, l'éjecteur est localisé entre la sortie évaporateur et l'entrée condenseur, et ses états internes sont explicitement distingués :

- 3 → 4 : aspiration et mélange (chambre de mélange),
- 4 → 5 : recompression (diffuseur),
- 8 → 4 : tuyère primaire (expansion du fluide motrice).

L'éjecteur assure la fonction : aspirer la vapeur secondaire à P_{evap} , l'entraîner, puis recomprimer le mélange jusqu'à un niveau de pression compatible avec le condenseur.

Le paramètre de performance le plus utilisé est le **rapport d'entraînement** :

$$\mu = \frac{\dot{m}_{\text{sec}}}{\dot{m}_{\text{pri}}}. \quad (3.1)$$

À l'échelle de la machine (simple effet), et en négligeant le travail de pompe devant la puissance thermique, une écriture compacte du COP énergétique est :

$$COP \simeq \frac{\dot{Q}_{\text{evap}}}{\dot{Q}_{\text{gen}}} = \frac{\dot{m}_{\text{sec}}(h_3 - h_2)}{\dot{m}_{\text{pri}}(h_8 - h_7)} = \mu \frac{(h_3 - h_2)}{(h_8 - h_7)}. \quad (3.2)$$

Cette relation met en évidence que, toutes choses égales par ailleurs, l'augmentation de μ améliore le COP . Toutefois, μ est fortement affecté par P_{cond} et par l'existence d'une pression critique au-delà de laquelle l'éjecteur décroche (Eames et al., 1995 ; Huang et al., 1999).

3.3 Écoulement compressible dans la tuyère primaire : étranglement et relations isentropiques

3.3.1 Hypothèses de base

On considère un écoulement quasi-1D, stationnaire, adiabatique, sans travail de paroi. La tuyère convertit une partie de l'enthalpie en énergie cinétique, conduisant à des vitesses c élevées. En formulation d'énergie totale :

$$h + \frac{c^2}{2} = h_0 = \text{constante} \quad (\text{adiabatique, stationnaire}). \quad (3.3)$$

3.3.2 Étranglement au col (*choking*)

Lorsque le rapport de pression amont/aval dépasse une valeur critique, l'écoulement atteint la condition sonique au col ($M = 1$) et le débit devient pratiquement indépendant de la pression aval : c'est l'étranglement. Pour un gaz parfait, la relation aire-Mach s'écrit (Anderson, 2016) :

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{\gamma + 1} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}. \quad (3.4)$$

Dans le cas du R718, γ n'est ni constant ni parfaitement adapté au gaz parfait sous vide et proche de la saturation. En pratique, la stratégie retenue consiste à conserver la structure quasi-1D mais à **fermer le modèle par des propriétés réelles** (enthalpie/entropie/densité) calculées avec CoolProp (I. H. Bell, Wronski, Quoilin, & Lemort, 2014).

3.3.3 Rendement isentropique de tuyère

Pour représenter les pertes (viscosité, non-uniformités, chocs faibles), on introduit un rendement isentropique de tuyère :

$$\eta_{\text{tuy}} = \frac{h_8 - h_{4s}}{h_8 - h_4}, \quad (3.5)$$

où $4s$ est l'état « isentropique » à la pression de sortie réelle P_4 . Conformément à la littérature 1D, des valeurs typiques de 0.8 à 0.9 sont couramment adoptées (Huang et al., 1999 ; Chunnanond & Aphornratana, 2004). Dans la simulation, on retient une valeur nominale $\eta_{\text{tuy}} = 0.85$.

3.4 Modélisation du mélange : bilans 1D en section à aire constante

3.4.1 Conservation de la masse

Dans la chambre de mélange (état $3 \rightarrow 4$), la conservation de la masse impose :

$$\dot{m}_{\text{pri}} + \dot{m}_{\text{sec}} = \dot{m}_{\text{mix}}. \quad (3.6)$$

3.4.2 Conservation de la quantité de mouvement

Sur un volume de contrôle 1D englobant la section de mélange (aire constante), la forme intégrale stationnaire peut être écrite, en regroupant les efforts dissipatifs (couche limite, turbulence) sous une forme équivalente :

$$\dot{m}_{\text{pri}} c_{4,\text{pri}} + \dot{m}_{\text{sec}} c_3 = \dot{m}_{\text{mix}} c_4 + \Delta F_{\text{pertes}}. \quad (3.7)$$

Dans les modèles 1D, ΔF_{pertes} est souvent représenté par un coefficient semi-empirique de mélange/dispersion, dont l'ajustement se fait par calibration ou analyse de sensibilité (Huang et al., 1999 ; Chunnanond & Aphornratana, 2004).

3.4.3 Bilan d'énergie (mélange adiabatique)

Sous hypothèse adiabatique, le bilan d'énergie (en enthalpie) conduit à :

$$\dot{m}_{\text{pri}} h_{4,\text{pri}} + \dot{m}_{\text{sec}} h_3 = \dot{m}_{\text{mix}} h_4. \quad (3.8)$$

Cette relation donne l'enthalpie moyenne du mélange. La détermination cohérente des vitesses c mobilise également la conservation de l'énergie totale (Eq. 3.3) dans chaque sous-domaine.

3.5 Ondes de choc et relation de Hugoniot : choc normal dans l'éjecteur

3.5.1 Origine physique du choc

Lorsque la tuyère primaire produit un jet supersonique et que la récupération de pression imposée par le diffuseur devient trop importante, l'écoulement peut subir un choc normal (ou un train de chocs). Celui-ci ramène le Mach à une valeur subsonique, au prix d'une augmentation d'entropie et d'une perte de pression totale. Les conséquences principales sont :

- limitation du rapport de pression atteignable ;
- apparition d'une pression critique au condenseur ;
- chute de μ et dégradation du COP (Anderson, 2016 ; Eames et al., 1995).

3.5.2 Équations de Rankine–Hugoniot (forme générale)

Pour éviter toute confusion avec les états du cycle numérotés 1 à 8, on note ici les grandeurs amont/aval du choc par les indices am (amont) et av (aval). Pour un choc normal stationnaire, les lois de conservation donnent :

Conservation de la masse

$$\rho_{\text{am}} c_{\text{am}} = \rho_{\text{av}} c_{\text{av}}. \quad (3.9)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$P_{\text{am}} + \rho_{\text{am}} c_{\text{am}}^2 = P_{\text{av}} + \rho_{\text{av}} c_{\text{av}}^2. \quad (3.10)$$

Conservation de l'énergie

$$h_{\text{am}} + \frac{c_{\text{am}}^2}{2} = h_{\text{av}} + \frac{c_{\text{av}}^2}{2}. \quad (3.11)$$

La relation de Hugoniot peut alors être mise sous la forme (Anderson, 2016) :

$$h_{\text{av}} - h_{\text{am}} = \frac{1}{2} (P_{\text{av}} - P_{\text{am}}) (v_{\text{am}} + v_{\text{av}}), \quad (3.12)$$

avec $v = 1/\rho$. Cette relation met en évidence que le choc est adiabatique mais non isentropique ($s_{\text{av}} > s_{\text{am}}$), donc intrinsèquement dissipatif.

3.5.3 Relations Mach (gaz parfait) et adaptation au R718 réel

Pour un gaz parfait, les relations classiques donnent (Anderson, 2016) :

$$\frac{P_{\text{av}}}{P_{\text{am}}} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_{\text{am}}^2 - 1), \quad M_{\text{av}}^2 = \frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{\text{am}}^2}{\gamma M_{\text{am}}^2 - \frac{\gamma-1}{2}}. \quad (3.13)$$

Dans un modèle réaliste du R718 sous vide, l'hypothèse $\gamma = \text{constante}$ est discutable. La stratégie robuste retenue dans ce mémoire consiste à :

- conserver la structure de saut (Eqs. 3.9–3.11) ;
- fermer le problème avec les **propriétés réelles** via CoolProp ($h(P, T)$, $s(P, T)$, $\rho(P, T)$, etc.) (I. H. Bell et al., 2014).

3.6 Régime critique, double étranglement et pression critique**3.6.1 Étranglement primaire**

La tuyère primaire atteint typiquement $M = 1$ au col en régime étranglé, ce qui stabilise partiellement \dot{m}_{pri} vis-à-vis de la pression aval. On peut alors écrire :

$$\dot{m}_{\text{pri}} = f(P_{\text{gen}}, T_{\text{gen}}, A_t). \quad (3.14)$$

3.6.2 Étranglement secondaire et régime critique

Dans certains régimes, la vapeur secondaire peut également atteindre une condition sonique au voisinage de l'entrée de la zone de mélange. Le double étranglement correspond au régime critique : μ tend vers une valeur maximale et l'écoulement devient moins sensible à P_{cond} .

3.6.3 Pression critique de condensation

La pression critique $P_{\text{cond,crit}}$ est la pression maximale au condenseur pour laquelle le régime critique persiste. Au-delà, le choc se déplace en amont, l'étranglement secondaire disparaît et μ chute fortement, ce qui explique le décrochage observé expérimentalement (Eames et al., 1995).

3.7 Modèle mathématique 1D hybride retenu pour la simulation

3.7.1 Structure du modèle

Le modèle retenu se compose de trois sous-modèles :

1. **Tuyère primaire** ($8 \rightarrow 4$) : expansion quasi-1D + rendement η_{tuy} .
2. **Mélange** ($3 \rightarrow 4$) : section à aire constante, bilans masse-moment-énergie, avec correction semi-empirique.
3. **Diffusion** ($4 \rightarrow 5$) : récupération de pression + possibilité de choc normal + rendement diffuseur η_{diff} .

3.7.2 Fermeture par rendements et paramètres semi-empiriques

Les modèles 1D ne résolvent ni turbulence ni non-uniformités. Des coefficients de performance sont donc nécessaires (Chunnanond & Aphornratana, 2004 ; Huang et al., 1999). Dans ce travail, les valeurs nominales adoptées sont :

$$\eta_{\text{tuy}} = 0.85, \quad \eta_{\text{diff}} = 0.75. \quad (3.15)$$

3.7.3 Propriétés réelles via CoolProp

Toutes les propriétés thermodynamiques (par exemple h , s , ρ) sont calculées par CoolProp afin :

- de respecter la thermodynamique réelle de l'eau sous vide ;
- d'éviter les incohérences d'un modèle gaz parfait ;
- de garantir la cohérence sur diagrammes P - h et T - s (I. H. Bell et al., 2014).

3.8 Comparaison critique des principaux modèles 1D d'éjecteurs

TABLE 3.1 – Comparaison synthétique de modèles 1D d'éjecteurs issus de la littérature.

Auteur	Hypothèse mélange	Choc	Fluide réel	Points forts	Limites
Eames et al. (1995)	Pression constante	Oui	Non	Validation expérimentale	Hypothèse gaz parfait et simplifications
Huang et al. (1999)	Aire constante	Oui	Non	Structure analytique robuste	Calibration nécessaire
Chunnanond & Aphornratana (2004)	Variable	Oui	Partielle	Synthèse complète	Approche souvent semi-empirique
Approche présente	Aire constante + corrections	Oui (Hugoniot)	Oui (CoolProp)	Cohérence thermodynamique sous vide	Complexité numérique, besoin de diagnostics

Résumé du chapitre

Ce chapitre a établi une base technologique et théorique complète pour l'éjecteur, composant central de la machine frigorifique au R718. La revue a montré que son fonctionnement combine : (i) une détente accélératrice dans la tuyère primaire susceptible d'atteindre le régime supersonique, (ii) un mélange adiabatique fortement dissipatif et (iii) une recompression dans le diffuseur, potentiellement gouvernée par la formation d'ondes de choc.

Sur le plan de la modélisation, les équations de conservation en régime quasi-1D (masse, quantité de mouvement, énergie) constituent le socle, tandis que la relation de Hugoniot formalise la discontinuité associée au choc normal et explicite l'irréversibilité (augmentation d'entropie). Le chapitre a également discuté le régime critique et la notion de pression critique de condensation, qui expliquent le décrochage et la chute de performance observés dans la littérature.

Enfin, un modèle 1D hybride a été retenu : tuyère (avec rendement η_{tuy}), mélange à aire constante (avec correction semi-empirique) et diffuseur (avec η_{diff} et choc éventuel), le tout fermé par des propriétés thermodynamiques réelles calculées via CoolProp. Ce modèle constitue la base de l'implémentation numérique et du couplage système développés dans la Partie II.

Deuxième partie

Étude systémique

Introduction de la Partie II

La seconde partie traite l'étude systémique de la machine frigorifique à éjecteur au R718, en mettant l'accent sur le couplage des composants, l'implémentation logicielle et l'analyse des performances.

L'enjeu principal est de passer d'une modélisation « composant par composant » à une représentation cohérente du cycle complet, où les niveaux de pression, les débits massiques et les transferts thermiques sont interdépendants. Le couplage est formulé selon une convention de numérotation unifiée des états thermodynamiques, utilisée à la fois dans la simulation et dans la représentation sur diagrammes $P-h$ et $T-s$.

Dans ce cadre, l'outil numérique développé en Python s'appuie sur une architecture modulaire orientée objet, permettant de tester chaque composant séparément puis de l'intégrer au système global. L'éjecteur est considéré par défaut selon un modèle compressible amélioré (V2), intégrant les diagnostics de régime, la détection d'étranglement et la présence éventuelle d'une onde de choc.

L'analyse finale porte sur la performance énergétique (notamment le coefficient de performance, COP), l'influence des conditions opératoires, et les recommandations d'amélioration. Une mini-analyse exergetique est également introduite afin d'identifier qualitativement les sources majeures d'irréversibilités, en cohérence avec la perspective d'approfondissement prévue en thèse.

(Cengel & Boles, 2015)

Références

- Anderson, J. D. (2016). *Modern compressible flow : With historical perspective* (4th éd.). McGraw-Hill Education.
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014). Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library coolprop. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508. doi: 10.1021/ie4033999
- Bell, I. H. e. a. (2014). *Coolprop thermophysical property library*. (Available at : <http://www.coolprop.org>)
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics : An engineering approach*. McGraw-Hill.
- Chunnanond, K., & Aphornratana, S. (2004). Ejectors : Applications in refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(2), 129–155.
- Eames, I. W., Aphornratana, S., & Haider, H. (1995). A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 18(6), 378–386.
- Elbel, S., & Hrnjak, P. (2008). A review of ejector refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*.
- Herold, K. E., Radermacher, R., & Klein, S. A. (2016). *Absorption chillers and heat pumps*. CRC Press.
- Huang, B. J., Chang, J. M., Wang, C. P., & Petrenko, V. A. (1999). A 1-d analysis of ejector performance. *International Journal of Refrigeration*, 22(5), 354–364.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering*. Academic Press.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2014a). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. Wiley.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2014b). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. Wiley.
- Sokolov, M., & Hershgal, D. (1990). *Solar refrigeration : The ejector cycle*. CRC Press.