

Détente quasi-isotherme d'un mélange de vapeur et d'huile dans une tuyère

Mathilde Blaise^{1,2*}, Denis MAILLET¹, Michel FEIDT¹, Antoine ALEMANY³, Renato FORCINETTI⁴

¹ Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMETA-ENSEM), UMR 7563, Université de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, 54518, France.

² Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), 20, avenue du Grésillé- BP 90406, 49004 Angers Cedex 01, France

³ Science et Ingénierie des MATériaux et Procédés (SIMAP), groupe EPM, (UMR CNRS-INP Grenoble-UJF 5266), Domaine Universitaire, BP 75, 38402 Saint Martin d'Hères, France

⁴ Department of electrical and electronic engineering (DIEE), University of Cagliari, piazza d'Armi, 09123 Cagliari, Italy

* (auteur correspondant : mathilde.blaise@univ-lorraine.fr)

Résumé – De nombreux rejets thermiques industriels ne sont pas valorisés. Un moyen d'exploiter ces rejets est des les convertir en électricité. Pour cela, il est nécessaire de développer des moteurs à apport de chaleur externe. Un nouveau type de convertisseur appelé « Turbosol » a été imaginé et est aujourd'hui développé et commercialisé par la société HEVATECH dans le but de valoriser les rejets thermiques industriels en accord avec les contraintes économiques et technologiques des industriels. Ce convertisseur a pour principale originalité d'être basé sur une détente motrice quasi-isotherme du fluide de travail. Cette détente motrice du gaz est réalisée dans une tuyère. Le fluide cyclé, qui est de la vapeur d'eau, est détendu en présence d'huile sous forme de gouttelettes. Cela permet au mélange d'avoir à la fois les propriétés compressibles d'un gaz et les propriétés thermiques d'un liquide. Cette détente en tuyère est modélisée dans le cas d'un fluide homogène équivalent et est comparé au cas d'un écoulement unidirectionnel avec glissement et transfert de chaleur entre les deux phases.

Nomenclature

c_p	capacité thermique massique à pression constante, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	α	taux de vide
c_v	capacité thermique massique à volume constant, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$		γ	coefficient de Laplace
k	coefficient de détente isentropique		ρ	masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
\dot{m}	débit massique, $kg \cdot s^{-1}$		χ	compressibilité
P	pression, Pa	<i>Indices</i>		
r_e	constante spécifique massique de la vapeur supposée gaz parfait $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	e		eau
T	température, K	eq		équivalent
v	vitesse, $m \cdot s^{-1}$	h		huile
x	coordonnée axiale, m	m		mélange
X	Titre massique dynamique en gaz	s		son
Ma	nombre de Mach	S		isentropique
		T		isotherme

1. Introduction

Turbosol est un convertisseur de chaleur en énergie mécanique. Il est à l'origine imaginé pour exploiter la chaleur solaire par concentration, d'où le nom Turbosol, « Turbo » pour turbine et « sol » pour solaire. Ce convertisseur étant un moteur à apport de chaleur externe, la source de chaleur peut être de diverses formes. Le développement de ce convertisseur a ainsi évolué vers la valorisation des rejets thermiques industriels. L'entreprise HEVATECH qui exploite le brevet et commercialise le système Turbosol est une jeune entreprise spécialisée dans la valorisation de la chaleur fatale dans les secteurs de l'industrie et de l'énergie. Le concept du convertisseur repose sur un système de détente motrice quasi-isotherme d'un mélange de vapeur et d'huile dans une tuyère. Tout d'abord, les propriétés de la détente du mélange homogène de vapeur et d'huile sont étudiées. La détente en tuyère est ensuite simulée pour un écoulement unidirectionnel avec glissement de vitesse et transfert de chaleur entre les deux phases.

2. Description du procédé Turbosol

Le schéma de principe de Turbosol est donné en figure 1. Le convertisseur comprend deux boucles avec deux fluides distincts, actuellement de l'eau et une huile. L'huile est le fluide caloporteur, il prend la chaleur à la source chaude, qui, dans notre cas précis, correspond à la récupération de la chaleur fatale d'un procédé. Cette huile chaude est mise en contact direct avec de l'eau froide sous pression, cela correspond à la phase de mélange. L'eau froide se vaporise quasi-instantanément et le mélange de vapeur d'eau et d'huile passe dans une tuyère de détente, comme présenté en figure 2. Cette seconde étape correspond à la phase d'accélération du mélange. Durant cette phase d'accélération plusieurs objectifs sont à remplir. Il faut que la phase liquide transmette de la chaleur à la phase gazeuse, la phase gazeuse doit se détendre de la pression haute à la pression basse et la phase liquide doit être entraînée par la phase gazeuse.

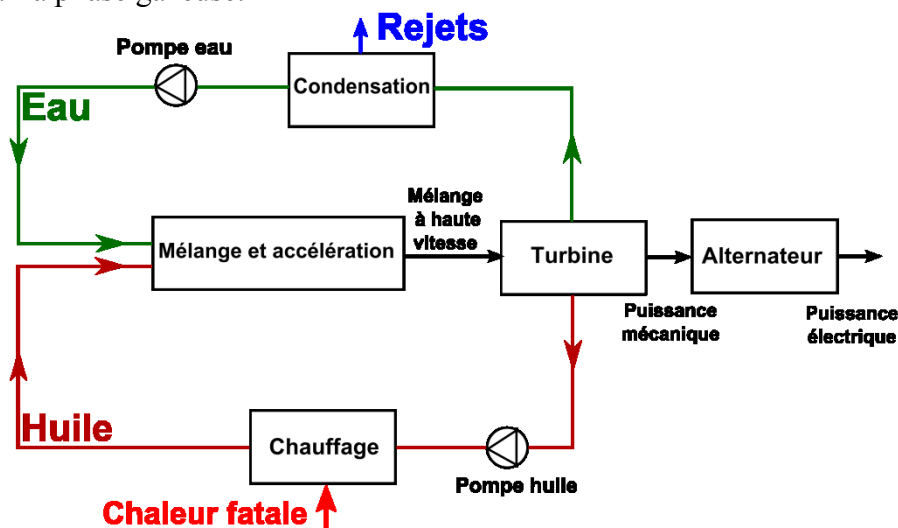


Figure 1 : Schéma de principe de Turbosol

La détente correspond à la conversion de l'énergie thermique en énergie cinétique. Le mélange détendu voit sa vitesse augmenter en passant d'un écoulement subsonique à un écoulement supersonique. Le mélange à haute vitesse et à la pression atmosphérique est injecté sur une turbine. L'énergie cinétique du jet est convertie en énergie cinétique de rotation de la turbine. La mise en rotation de la turbine couplée à un alternateur permet de générer de l'électricité. En sortie de turbine, le mélange est séparé. L'huile est renvoyée vers

la source chaude par une pompe et l'eau est condensée. Si la pression est celle de l'atmosphère, la température de condensation de l'eau est de 100°C.

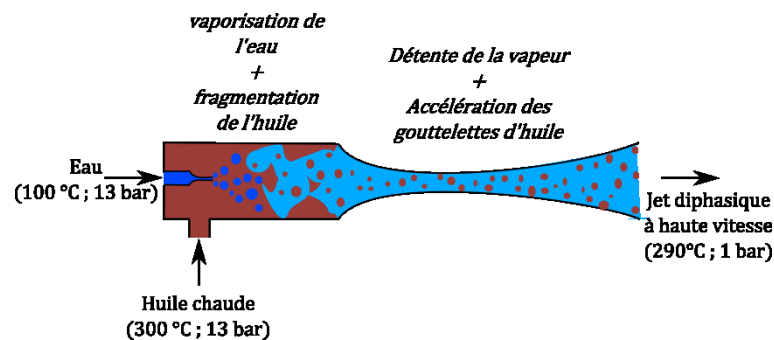


Figure 2 : Détail de la phase de mélange et d'accélération de Turbosol

3. Détente d'un mélange homogène de vapeur d'eau et d'huile

3.1. Propriétés de compressibilité du mélange de vapeur et d'huile en fonction de la proportion de chaque phase

La tuyère est le composant moteur de Turbosol. L'originalité de Turbosol est que la détente motrice est réalisée en contact direct avec l'huile. Ce contact direct modifie considérablement la détente de la vapeur. En effet, la détente isentropique d'un gaz entraîne une baisse de la température. Par contre la détente d'un liquide, par exemple de l'huile, se fait de manière quasi-isotherme. Lorsqu'on détend un mélange de gaz et de liquide, le comportement du fluide homogène a des propriétés hybrides qui dépendent de la proportion de chaque phase.

Le mélange est supposé se comporter comme un mélange homogène. L'hypothèse d'un mélange homogène implique qu'il n'y a pas de glissement entre les phases et que les deux fluides sont à la même température. La phase de vaporisation n'est pas considérée, seule la détente du mélange de vapeur d'eau et d'huile est étudiée ici. Les propriétés du mélange à étudier pour caractériser sa détente sont la vitesse de propagation du son, la compressibilité et la masse volumique.

L'expression de la vitesse du son dans un fluide s'exprime par :

$$v_s^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s \quad (1)$$

Ce qui permet d'exprimer l'expression de la vitesse du son dans la vapeur supposée être un gaz parfait :

$$v_{e_s}^2 = \left(\frac{\partial P_e}{\partial \rho_e} \right)_s = \gamma_e r_e T_e \quad (2)$$

La vitesse du son dans l'huile s'exprime par :

$$v_{h_s}^2 = \left(\frac{\partial P_h}{\partial \rho_h} \right)_s = \frac{1}{\chi_{S_h} \rho_h} \quad (3)$$

Avec χ_{S_h} le coefficient de compressibilité isentropique de l'huile $\left(\chi_{S_h} = \rho_h \left(\frac{\partial P_h}{\partial \rho_h}\right)_S\right)$.

La masse volumique d'un fluide homogène s'évalue par :

$$\rho_m = \frac{\rho_h \rho_e}{\rho_h X_m + \rho_e (1 - X_m)} \quad (4)$$

Avec X_m le titre massique dynamique en gaz :

$$X_m = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_e + \dot{m}_h} \quad (5)$$

La vitesse du son dans le mélange s'exprime de la façon suivante :

$$v_{m_s}^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_m}\right)_S \quad (6)$$

La dérivée de $1/\rho_m$ dans le cas d'une transformation isentropique s'exprime par :

$$d(1/\rho_m)_S = -\frac{1}{\rho_m^2} (d\rho)_S = -\frac{X_m}{\rho_e} (d\rho_e)_S - \frac{(1 - X_m)}{\rho_h^2} (d\rho_h)_S \quad (7)$$

En combinant les équations (2), (3), (6) et (7), la vitesse du son du mélange homogène s'exprime par :

$$v_{m_s}^2 = \frac{1}{\rho_m} \frac{1}{\left(X_m / (v_{e_s}^2 \rho_e^2) + 1 - X_m / (v_{h_s}^2 \rho_h^2)\right)} \quad (8)$$

Cette formulation correspond à la formulation de Wallis ([1], [2]). Lorsque X_m tend vers 0, v_{m_s} tend vers $1/\sqrt{\rho_h \chi_h}$, qui est la vitesse du son dans le liquide (huile) et lorsque X_m tend vers 1, v_{m_s} tend vers $\gamma_e r_e T_e$, qui est la vitesse du son dans le gaz (vapeur d'eau).

Le coefficient de compressibilité isotherme d'un liquide isochore est équivalent au coefficient isentropique ($\chi_h = \chi_{T_h} = \chi_{S_h}$).

La compressibilité isotherme du fluide diphasique s'exprime par :

$$\chi_{T_m} = \rho_m \left(\frac{\partial(1/\rho_m)}{\partial P}\right)_T = \rho_m \left[\frac{X_m}{P_e \rho_e} + \frac{(1 - X_m) \chi_h}{\rho_h}\right] \quad (9)$$

La compressibilité de l'huile χ_h est prise à $7.10^{-11} \text{Pa}^{-1}$ et sa masse volumique ρ_h à 850 kg/m^3 . Les propriétés de la vapeur sont prises dans les conditions de pression atmosphérique et à la température de $300 \text{ }^\circ\text{C}$. En figure 3, est tracée l'évolution de la vitesse du son dans le mélange huile-vapeur en fonction du titre dynamique massique en eau. La vitesse du son entre $X_m = 0$ et $X_m = 10^{-9}$ est égale à celle de l'huile. Dès que le titre massique dynamique augmente, la vitesse du son dans le mélange chute brutalement. La vitesse du son dans le mélange passe en dessous de celle du son dans la vapeur pour $X_m =$

2.10^{-7} . Elle passe par un minimum de 25 m/s pour $X_m = 6.10^{-4}$ et remonte jusqu'à atteindre la vitesse du son dans la vapeur pour $X_m = 1$.

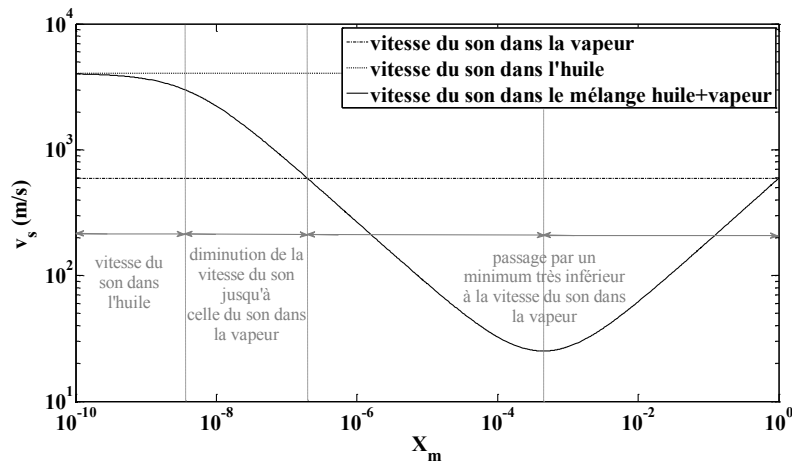


Figure 3 : Vitesse du son dans un écoulement huile/vapeur en fonction du titre massique en vapeur X_m ($P = 1 \text{ bar}$, $T = 300 \text{ °C}$)

En parallèle, l'évolution de la compressibilité isotherme χ_{T_m} du fluide diphasique est donnée en figure 4. A partir de $X_m = 10^{-5}$, la compressibilité du mélange augmente considérablement jusqu'à atteindre celle de la vapeur pour un titre dynamique massique d'environ 10^{-2} . L'évolution de la masse volumique du mélange huile-vapeur est donnée en figure 5. Pour un titre dynamique massique inférieur à 10^{-5} , la masse volumique du mélange est équivalente à celle de l'huile. Lorsque le titre dynamique massique augmente au delà de 10^{-5} , la masse volumique du mélange chute. La masse volumique du mélange est équivalente à celle de la vapeur quand le titre dynamique massique est très proche de 1.

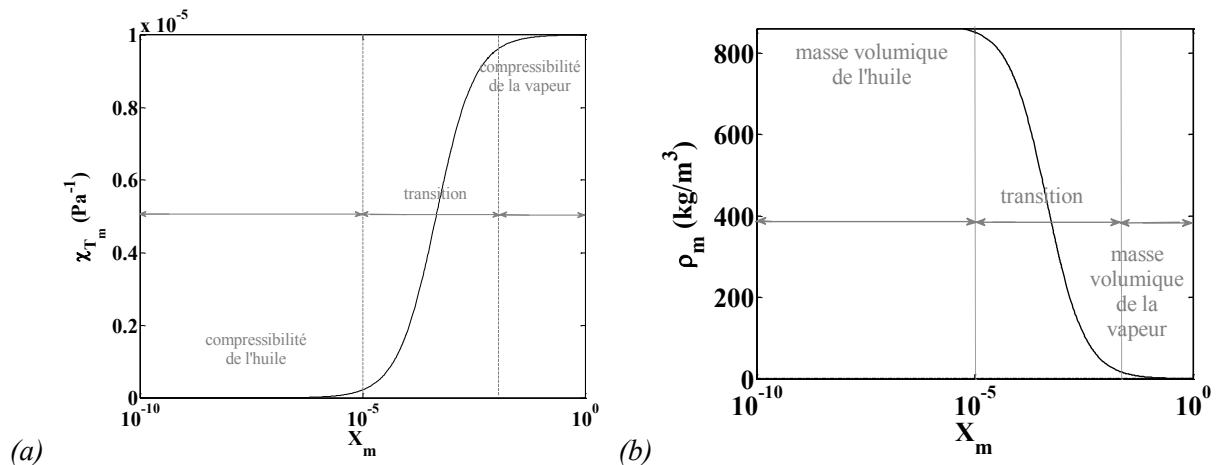


Figure 4 : Compressibilité du mélange huile/vapeur en fonction du titre massique en vapeur X_m ($P = 1 \text{ bar}$, $T = 300 \text{ °C}$)

3.2. Détente isentropique du mélange

La détente du gaz équivalent est une transformation isentropique suivant une loi de comportement en $P/\rho^k = cste$ avec $k = k_{eq}$ le coefficient de Laplace équivalent du mélange. Si $X_m = 0$ ($k_{eq} = 1$), la détente est isotherme, elle correspond à celle du liquide seul, et si $X_m = 1$ ($k_{eq} = \gamma$) la détente est équivalente à la détente isentropique du gaz seul.

Le coefficient de détente isentropique k_{eq} est le rapport des capacités calorifiques à pression et à volume constant du mélange homogène équivalent, il s'exprime ainsi :

$$k_{eq} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{X_m c_{p_g} + (1 - X_m) c_{p_l}}{X_m c_{v_g} + (1 - X_m) c_{v_l}} \quad (10)$$

L'évolution de k_{eq} en fonction de X_m est donnée en figure 5a. La température de référence est celle du mélange en début de détente (environ 300°C). Pour un titre dynamique massique inférieur à 10^{-1} , le coefficient de détente est très proche de 1. A partir de $X_m = 10^{-1}$, le coefficient augmente plus fortement jusqu'à atteindre la valeur du coefficient de Laplace de la vapeur (dans les conditions de pression et de température).

La température du mélange en fin de détente supposé isentropique entre les points 1 et 2 s'exprime par :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-k_{eq}}{k_{eq}}} \quad (11)$$

L'abaissement de température de la phase gazeuse dépend uniquement du coefficient k_{eq} , du rapport de pression de la détente et de la température initiale du mélange. Le rapport entre la température en début et en fin de détente du mélange est donné en fonction du titre dynamique massique en eau en figure 5b. Le taux de détente est pris égale à 13. Pour un titre dynamique massique inférieur à 10^{-1} , la température est quasi-constante. A partir de $X_m = 10^{-1}$, la température diminue plus fortement.

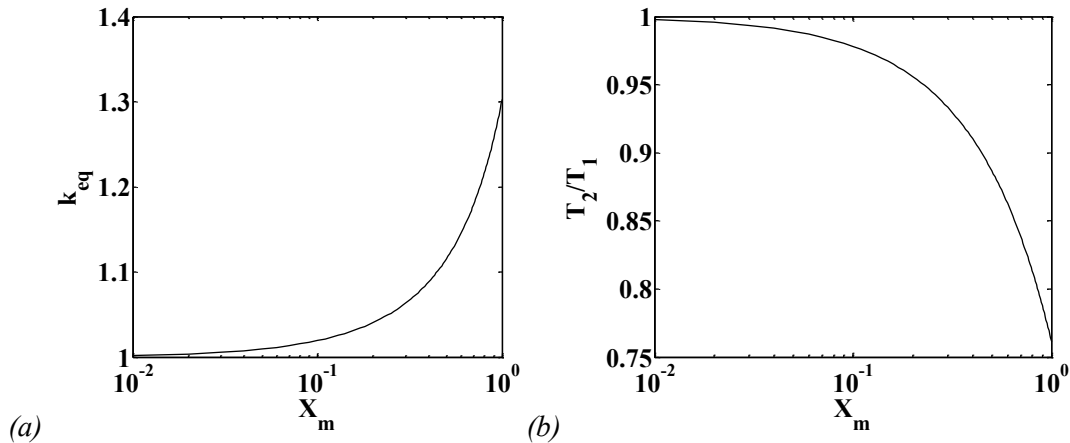


Figure 5 : Evolution (a) du coefficient de détente isentropique et (b) du rapport de température entre le début et la fin de la détente ; en fonction du titre dynamique massique en eau ($P_1/P_2 = 13$ et $T_1 = (300 + 273) K$)

4. Détente d'un mélange non-homogène de vapeur d'eau et d'huile

De la vapeur sous pression ($P = 13$ bar et $T = 192$ °C) s'écoule avec de l'huile plus chaude ($P = 13$ bar et $T = 290$ °C) dans une tuyère à paroi adiabatique. Pour cela, on suppose que la phase liquide, l'huile, s'est fractionnée en amont de la section considérée et que les gouttelettes formées sont toutes de même taille (100 μm) et parfaitement dispersées dans l'écoulement. L'écoulement est supposé unidirectionnel avec frottement pariétal et glissement de vitesse entre les deux phases. La phase liquide est supposée iso-volume, c'est-à-

dire que la masse volumique ρ_h est constante. Les gouttelettes sont supposées indéformables et on néglige la recirculation interne. L'écoulement est stationnaire. Le titre dynamique massique en eau est pris égal à $1,5 \cdot 10^{-2}$. Le profil de la tuyère est choisi pour qu'elle soit adaptée à une pression d'entrée de 13 bar et une pression de sortie de 1 bar. Le système comprend 7 équations, tout d'abord l'équation d'état de la vapeur d'eau, puis les équations de continuité, les bilans de quantité de mouvement et d'énergie de chaque phase ([1],[2],[3]). Le système à résoudre est un système différentiel de la forme suivante :

$$A \frac{d\vec{y}}{dx} = \vec{b} \quad (12)$$

A est une matrice de dimension 6×6 , \vec{y} est le vecteur constitué des 6 inconnues (v_e, v_h, T_e, T_h, P et α (surface de vapeur)/(surface d'huile)) et \vec{b} est un vecteur qui comprend également les inconnues. La 7^{ième} inconnue est la masse volumique de l'eau ρ_e qui est déduite de l'équation d'état. Pour résoudre ce système, il faut tout d'abord inverser la matrice A . Pour cela, il faut que le déterminant de la matrice A soit non nul. Une fois la matrice inversée, le système est de la forme suivante $\frac{d\vec{y}}{dx} = A^{-1}\vec{b}$. Ce système est intégré par une méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

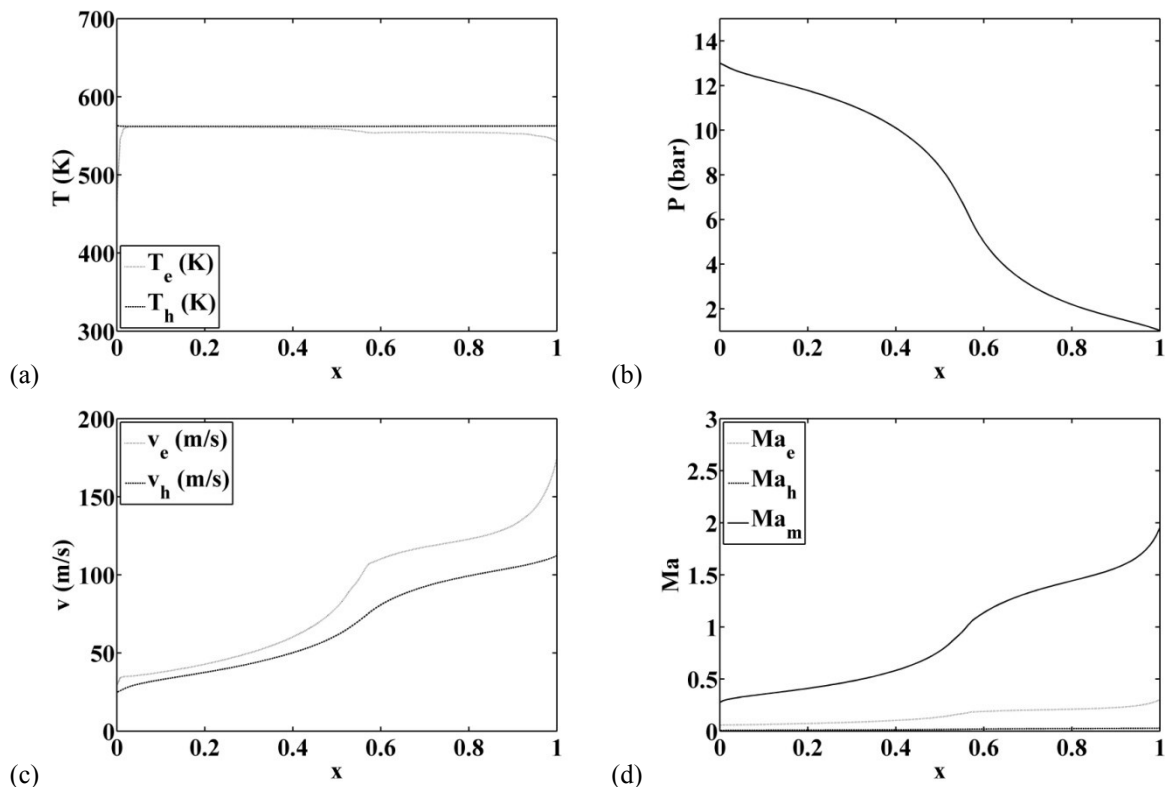


Figure 6 : (a) Températures de l'huile et de la vapeur d'eau; (b) pression du mélange; (c) vitesses moyennes débitantes de la vapeur et de l'huile et (d) nombre de Mach de l'eau, de l'huile et du mélange ; en fonction de la position dans la tuyère de coordonnée axiale x

Lorsque le régime d'écoulement est sub-critique, le déterminant de la matrice est non nul et la matrice peut être inversée. En revanche, lorsque le régime d'écoulement est critique, c'est-à-dire lorsque la tuyère est adaptée, le déterminant de la matrice est nul et elle ne peut être inversée. On parle de point selle. Ce qui malheureusement correspond à la situation

physique recherchée. Pour palier à cette difficulté numérique, la solution sub-critique calculable la plus proche de la solution critique sera retenue comme solution critique.

Les résultats de la simulation sont donnés en figure 6, le col est à $x = 0,55$. Le mélange se détend de manière quasi-isotherme (figure 6a). La pression diminue de 13 bar à 1 bar (figure 6b). Les deux fluides accélèrent mais ne sont pas à l'équilibre mécanique, la phase gazeuse est plus rapide que la phase liquide (figure 6c). Le nombre de Mach du fluide homogène équivalent augmente passant ainsi d'un régime subsonique à un régime supersonique (figure 6d).

5. Conclusions et perspectives

L'étude de la compressibilité et de la masse volumique du mélange homogène de vapeur d'eau et d'huile montre que le mélange se comporte comme de la vapeur d'eau pour un titre dynamique massique supérieur à 10^{-2} . L'étude de l'évolution de la température de mélange montre que pour considérer que la détente est quasi-isotherme, il faut que le titre dynamique massique en eau soit inférieur à 10^{-1} . Ainsi le domaine à respecter pour que la détente soit assimilée à celle d'un gaz et que la température reste quasiment constante est le suivant : $10^{-2} \leq X_m \leq 10^{-1}$.

La simulation de la détente du mélange non-homogène dans une tuyère adaptée montre que, pour un titre dynamique massique de $1,5 \cdot 10^{-1}$, les deux fluides sont à l'équilibre thermique quasi-instantanément et la détente est quasi-isotherme. Cela confirme les résultats obtenus dans le cas d'un mélange homogène équivalent. Le mélange n'est cependant pas équilibré en vitesse, ce qui n'est pas pris en compte lors d'une hypothèse de mélange homogène équivalent. Le glissement entre les deux phases entraîne une dissipation de l'énergie cinétique en chaleur, ce qui se traduit par une production d'entropie. Les suites porteront sur la prise en compte des irréversibilités dans un modèle de détente de mélange homogène équivalent et la validation du modèle avec des données expérimentales..

Références

- [1] G. Wallis, *One-dimensional two-phase flow*, New York: Mc Graw-Hill, 1969.
- [2] H. Shamsborhan, Développement d'une méthode de mesure de la célérité du son en écoulement diphasique application aux écoulements cavitant. Thèse de doctorat. Paris : 2009.
- [3] A. Alemany, Studies for the definition of a Faraday converter for space nuclear systems, *Transactions of the Fourth Symposium on Space Nuclear Power Systems*, pp. 367-369 (1987).
- [4] R. Mathes. Convertisseur de Faraday à métal/gaz : optimisation thermodynamique de cycles combinés et modélisation de l'accélérateur. Thèse de doctorat. Grenoble : 1992.
- [5] M. Blaise et al, Modélisation d'une détente quasi-isotherme d'un gaz par contact direct avec un fluide caloporteur, *Congrès Français de thermique*. La Rochelle : 26-29 mai 2015.

Remerciements

Les auteurs remercient l'entreprise HEVATECH qui cofinance la thèse du premier auteur avec l'ADEME.