

SIMULATION NUMERIQUE DE LA VAPORISATION DE L'EAU DANS UNE CONDUITE VERTICALE : CAS DE L'ÉCOULEMENT DE FLUIDE GEOTHERMIQUE

Julien Rajomalahy and Lala Andrianaivo

Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Petroleum Engineering Department, BP 1500

Antananarivo 101, Madagascar, julienrajomalahy@gmail.com

Résumé

Ce travail est axé sur l'étude numérique de la vaporisation de l'eau dans un tube chauffé en utilisant le modèle « Two phase Flow » en MATLAB Simulink qui calcule les propriétés thermodynamiques et de transport de l'eau et de la vapeur saturée variant avec la température. L'étude de l'ébullition dans des tubes est une préoccupation majeure de plusieurs chercheurs. Le présent travail étudie numériquement l'écoulement d'ébullition pour un tube vertical de section circulaire dont le diamètre interne varie dans un intervalle compris entre 0,25 à 0,40 m en utilisant l'eau comme fluide de fonctionnement. On peut dire que l'exploitation géothermique est fondée sur la température, la pression et le débit massique du réservoir. Les courbes de la qualité de vapeur ont montré la fraction de vapeur récupérable pour plusieurs paramètres d'entrées différentes. La vaporisation de l'eau est influencée par la pression du réservoir ainsi que le débit massique. L'eau entre dans la conduite à 423,15 K à un débit massique compris entre l'intervalle : $0,5 \leq \dot{M} \leq 1$ kg/s. La conduite est sectionnée en quatre sections qui sont chauffées à des températures différentes. La vapeur ainsi récupérée peut être utilisée pour l'exploitation géothermique.

1. INTRODUCTION

La mécanique des fluides numérique, c'est-à-dire l'étude des écoulements de fluides par la simulation numérique, est une discipline en plein essor. Elle repose sur la recherche de solutions des équations qui décrivent la dynamique des fluides par des algorithmes appropriés. Elle regroupe l'ensemble des méthodes de calculs numériques permettant de prédire la température du fluide [1], sa vitesse, sa direction dans un espace ouvert ou fermé. Les écoulements diphasiques sont beaucoup plus compliqués que les écoulements monophasiques. En général, un écoulement diphasique est caractérisé par une interface entre les phases qui crée la discontinuité des transferts de masse et de chaleur. Une description complète d'un écoulement diphasique exige la résolution des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie pour chaque phase. Ces équations sont plus complexes que celles régissant un problème monophasique parce qu'elles contiennent des termes additionnels qui gouvernent le transfert de masse [2], de quantité de mouvement et d'énergie entre les phases.

Les conduites utilisées en géothermie sont horizontales ou verticales. La présente étude consiste à étudier la fraction de vapeur pour l'écoulement eau-vapeur dans une conduite verticale. La Figure 1 schématise la géométrie du tube étudié. Le liquide entre au bas de la conduite cylindrique verticale à débit massique constant de $G= 3$ Kg/s et à une température comprise dans l'intervalle : $298,15 \leq T \leq 423,15$ K inférieure à la température de saturation de 58.2 K. La géométrie adoptée est bidimensionnelle, la longueur du canal est : $100 \text{ m} \leq L \leq 500 \text{ m}$, son diamètre est $0,2 \text{ m} \leq D \leq 0,4 \text{ m}$. On impose un flux de chaleur uniformément réparti à la paroi de la conduite de $q= 0,3456 \text{ MW/m}^2$ sur toute la longueur du canal.

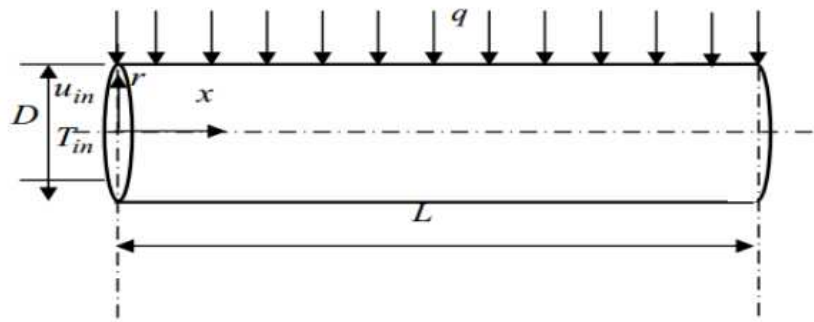


Figure 1 : Géométrie du tube étudié

Le tableau 1 résume les valeurs des paramètres thermo hydrauliques et thermo physiques, nécessaires pour la modélisation.

Tableau 1 : Condition thermo hydraulique

Paramètre	Valeur
Rayon r de la conduite	$0,2 \leq D \leq 0,4$ m
Matière de la conduite	Acier inoxydable
Fluide caloporteur	H ₂ O
Pression P	2 et 4,5 MPa
Débit massique \dot{M}	0,5 et 1 kg.s ⁻¹
Température à l'entrée T_{in}	$298,15 \text{ K} \leq T \leq 423,15 \text{ K}$

Une autre carte largement utilisée est celle développée par MacQuillan et Whalley et qui permet de définir les différents régimes. Les auteurs ont convenablement défini les frontières des différentes zones de transition. Ces frontières sont généralement représentées à partir des relations analytiques adimensionnelles ou dimensionnelles, faisant intervenir les débits et les propriétés de chaque phase ainsi que les caractéristiques de l'installation expérimentale. [13]

2. MODELISATION ET SIMULATION

2.1. Principaux paramètres d'un écoulement diphasique

2.1.1. Titre en vapeur

Le titre réel x est défini comme étant le rapport du débit massique de vapeur au débit massique total [3]. La figure 2 représente la carte d'écoulement.

$$x = \frac{\dot{M}_G}{\dot{M}} = \frac{\rho_G A_G v_G}{\rho_G A_G v_G + \rho_L A_L v_L} \quad (1)$$

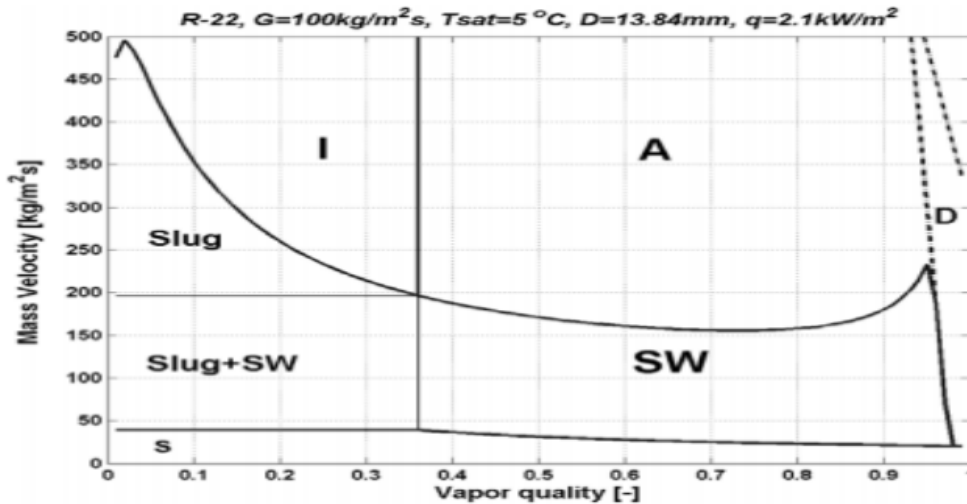


Figure 2 : Carte d'écoulement de Wojtan

Lorsque le changement de phase n'intervient pas dans le canal, on doit mesurer le débit massique de chaque phase, et le titre est alors déterminé pour le canal entier. Au cas où il y a un changement de phase dans le canal, par exemple si le canal est chauffé et l'ébullition a lieu, le titre augmentera (l'inverse pour la condensation) avec le sens de l'écoulement. Puisque souvent il n'y a pas d'équilibre thermique entre les phases, on ne peut pas calculer le titre simplement en sachant le titre à l'entrée et le flux de la chaleur provenant de la paroi. Malheureusement, il est très difficile de mesurer ou calculer avec précision le titre du mélange liquide-vapeur coulant dans un canal où un changement de phase intervient.

2.1.2. Fraction de vide

Dans l'écoulement diphasique, la fraction de vide est l'un des paramètres les plus importants à définir. Il définit la section occupée par chaque phase par rapport au total. La fraction de vide représente un paramètre fondamental dans le calcul des coefficients de transfert thermique, des transitions des régimes d'écoulement et des chutes de pression. Il est défini par :

$$\alpha = \frac{A_G}{A_G + A_L} \quad (2)$$

Où A_G est la somme des sections occupées par la vapeur et A_L est la somme des sections occupées par le liquide comme l'illustre la Figure 3. La fraction de vide s'étend de $\alpha = 0$ à $x = 0$ jusqu'à $\alpha = 1$ à $x = 1$

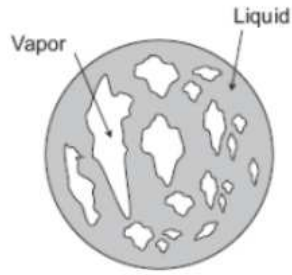


Figure 3 : Section de la fraction de vide

2.1.3. Vitesse massique

La vitesse massique (G) ou le flux massique est définie pour être le rapport du débit massique (\dot{M}) divisé par la section[4]:

$$G = \frac{\dot{M}}{A} \quad (3)$$

Les vitesses massiques du liquide et du gaz sont définies par :

- Pour le liquide :

$$G = \frac{G(1-x)}{1-\alpha} = \rho_L v_L \quad (4)$$

- Pour la vapeur :

$$G = \frac{Gx}{\alpha} = \rho_G v_G \quad (5)$$

2.1.4. Vitesse réelle

Les vitesses réelles des phases V_G et V_L sont les vitesses avec lesquelles les phases s'écoulent réellement [5]:

- Pour le liquide :

$$v_L = \frac{\dot{Q}_L}{A_L} = \frac{\dot{Q}_L}{(1-\alpha)A} \quad (6)$$

- Pour la vapeur :

$$v_G = \frac{\dot{Q}_G}{A_G} = \frac{\dot{Q}_G}{\alpha A} \quad (7)$$

En appliquant l'équation de la continuité [7], il est possible de définir les vitesses moyennes du liquide et de la vapeur dans un canal comme suit :

- Pour le liquide :

$$v_L = \frac{(1-x) \dot{M}}{(1-\alpha) \rho_L A} = \frac{G (1-x)}{\rho_L (1-\alpha)} \quad (8)$$

- Pour la vapeur :

$$v_G = \frac{x \dot{M}}{\alpha \rho_G A} = \frac{G x}{\rho_G \alpha} \quad (9)$$

2.1.5. Glissement

C'est le rapport des vitesses moyennes des deux phases dans une section :

$$\gamma = \frac{v_G}{v_L} \quad (10)$$

II.1.2/ Vitesse apparente

Les vitesses superficielles (appelées également les flux volumétriques) des phases V_{GS} et V_{LS} sont définies comme le rapport du débit volumétrique de la phase considérée à la section totale de l'écoulement diphasique [8].

- Liquide

$$v_{LS} = \frac{\dot{Q}_L}{A} = \frac{G}{\rho_L} (1-x) = (1-\alpha) v_L \quad (11)$$

- Vapeur

$$v_{GS} = \frac{\dot{Q}_G}{A} = \frac{G}{\rho_G} x = \alpha v_G \quad (12)$$

2.2. **Modèle d'ébullition nucléée sous pression dans la conduit**

2.2.1. Apparition de l'ébullition nucléée

Le taux de présence de la vapeur α_G , reste très faible, cela correspond à l'apparition de l'ébullition nucléée sur la paroi. Les bulles de vapeur n'apparaissent pas sur la paroi dès que sa température T_p atteint la température de saturation T_{sat} . Il faut, en effet, que la surchauffe $T_p - T_{sat}$ de la paroi atteigne une certaine valeur liée à la tension interfaciale σ entre le liquide et la vapeur. Cette valeur peut être calculée à l'aide de la corrélation de Frost et Dzakowic [10]

$$T_p - T_{sat} = \left(\frac{(8\sigma Q T_{sat})}{(\lambda_L L_V \rho_G)} \right)^{0.5} Pr_L \quad (13)$$

A de faibles vitesses massiques, l'apparition significative de la vapeur est contrôlée par les effets thermiques. Les bulles de vapeur se détachent de la paroi si la densité de flux thermique est suffisante pour contrarier la sous saturation.

A des vitesses massiques élevées, l'apparition significative de la vapeur est contrôlée par les effets hydrodynamiques. La couche de bulles en contact avec la paroi peut être assimilée à une rugosité. Quand les bulles ont une hauteur suffisante, elles se détachent de la paroi et le taux de présence de la vapeur augmente de façon appréciable.

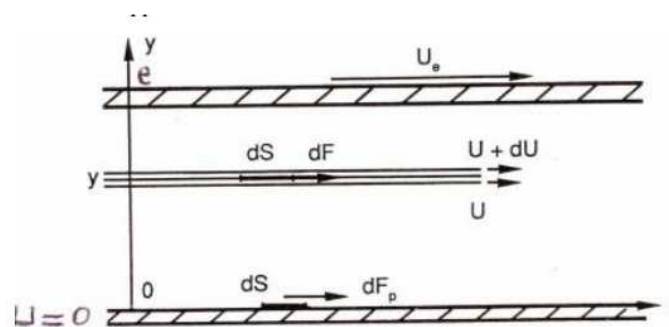


Figure 4 : Ecoulement de Couette

Les corrélations d'échange de chaleur en ébullition nucléée ne sont pas très précises mais cela n'est pas très important. En revanche, la détermination de la densité de flux thermique maximal, pour les équipements fonctionnant à flux imposé, est d'un intérêt primordial pour éviter toute augmentation brutale et dangereuse de la température de l'élément chauffant.

2.2.2. Crise d'ébullition

Partant d'un point de fonctionnement en ébullition nucléée, lorsqu'on augmente progressivement la densité de flux thermique, de plus en plus de vapeur apparaît sur l'élément chauffant sous forme de colonnes de vapeur. Le refroidissement de l'élément chauffant est assuré par le liquide qui retombe, vers l'élément chauffant.

Si la production de vapeur devient trop intense, la vitesse de la vapeur dans les colonnes atteint une valeur telle que le liquide est arrêté dans sa descente vers l'élément chauffant. La crise d'ébullition correspond à la disparition de tout contact entre le liquide et l'élément chauffant.

Dans l'écoulement horizontal, la partie supérieure du tube peut s'assécher périodiquement alors que la partie inférieure reste mouillée. Cela peut avoir des conséquences importantes quant aux transferts de chaleur. En effet, la température de la paroi asséchée peut dépasser la température de fusion du matériau. Si la paroi est suffisamment chaude, elle peut s'assécher complètement. On obtient alors un écoulement à brouillard (spray) dans lequel le liquide se trouve uniquement sous forme de gouttelettes.

La densité de flux de chaleur critique dépend du rayon r du cylindre et elle est donnée par la relation de Sun et Lienhard (1970) :

$$Q_c = \left[0.116 + 0.3 \exp \left(3.44 r^{1/2} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{1/4} \right) \right] L_V \rho_G^{1/2} [\sigma(\rho_L - \rho_G) g]^{1/4} \quad (14)$$

2.3. Résolution numérique et simulation

MathWorks est le leader du développement de logiciels de calcul mathématique. MATLAB, langage pour le calcul scientifique, est un environnement de programmation pour le développement d'algorithmes, l'analyse des données, leur visualisation et le calcul numérique. Simulink est un environnement graphique de simulation et de conception par modélisation destiné aux systèmes dynamiques et embarqués multi-domaines. Les ingénieurs et les scientifiques du monde entier utilisent ces familles de produits pour accélérer le rythme de la recherche, de l'innovation et du développement dans de nombreux secteurs, dont l'automobile, l'aérospatial, l'électronique, la finance, la biotechnologie et l'industrie pharmaceutique. MATLAB et Simulink constituent également des outils essentiels pour l'enseignement et la recherche dans les universités et les établissements d'enseignement du monde entier. Fondée en 1984, la société MathWorks emploie plus de 3000 personnes dans 15 pays. Son siège est implanté à Natick (Massachusetts) aux États-Unis.

La figure 5 schématise le dispositif d'écoulement.

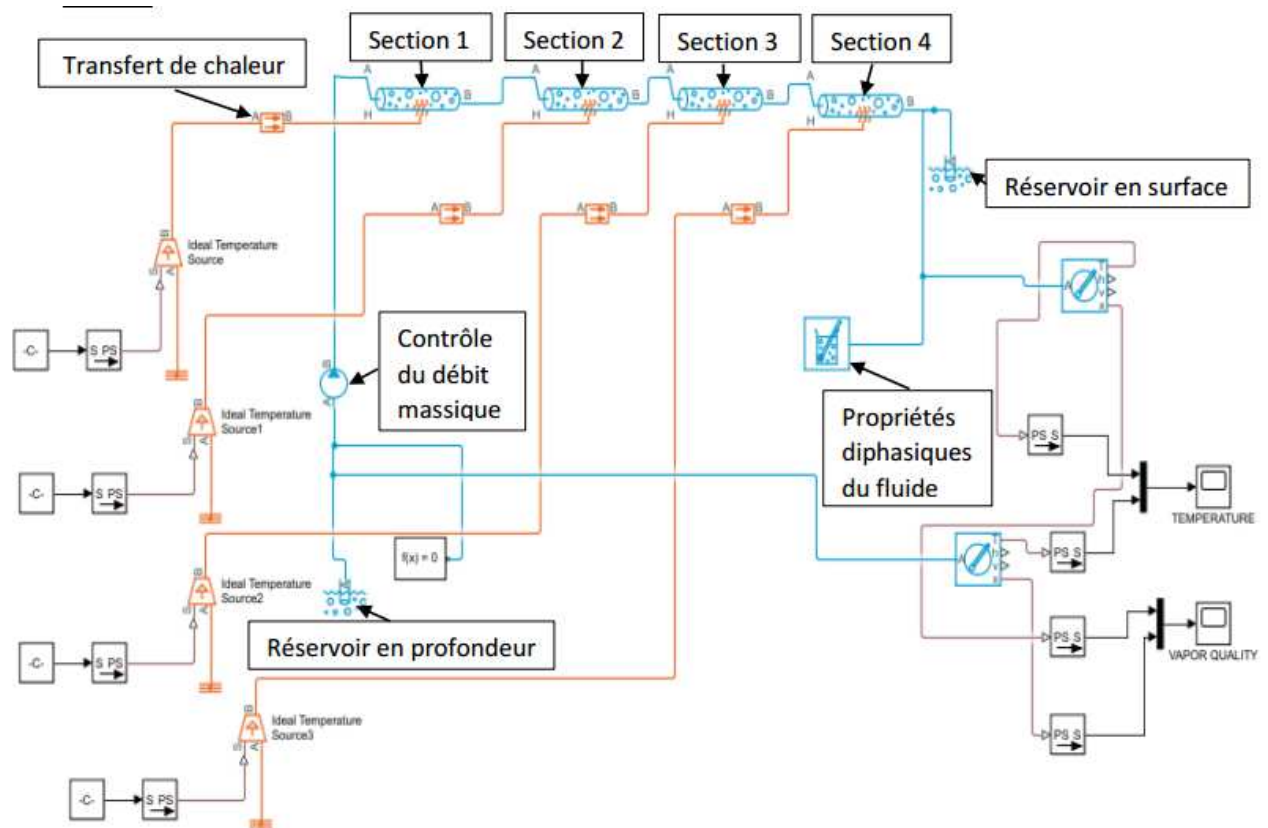


Figure 5 : Schéma du dispositif élaboré en MATLAB

La résolution numérique est réalisée par le logiciel Matlab R2017b. La conduite de 600m est divisée en quatre sections de 150 m afin de simuler la vaporisation de l'eau. La section 1 est chauffée à une température de 423,15 K. La seconde section est chauffée à une température de 373,15 K, la troisième est à 323,15 K et la dernière section est chauffée à 298,15 K. Avec le contrôle du débit massique, on peut varier le débit massique du fluide en écoulement dans la conduite. On peut également varier la longueur et le diamètre de la conduite mais pour notre cas on n'a pas varié la longueur de la conduite. Pour le résultat, il y a une fenêtre qui s'affiche montrant la courbe du résultat.

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

L'évolution de la qualité de vapeur est représentée par les courbes suivantes pour les réservoirs et les conduites de propriétés différentes.

3.1. Variation de diamètre de la conduite (Propriétés du réservoir : pourcentage de vapeur 0% ; Pression $P = 4.5\text{MPa}$)

La figure 6 montre qu'au tout début de la simulation on a 20% de vapeur. Cette vapeur augmente jusqu'à atteindre un pic de 38% de vapeur. Ce pic est atteint pendant quelque dizaine de seconde (environ 30s). Ensuite la qualité de vapeur diminue progressivement. Pour le pipeline de 25 cm de diamètre, l'état stable est atteint à partir de 250 secondes et la vapeur produit par ce puits est de 16%. Pour l'autre pipeline dont le diamètre est de 40 cm l'état stable est atteint pendant environ 450 secondes de simulation mais la vapeur recueilli est la même que celle de l'autre puits (16%).

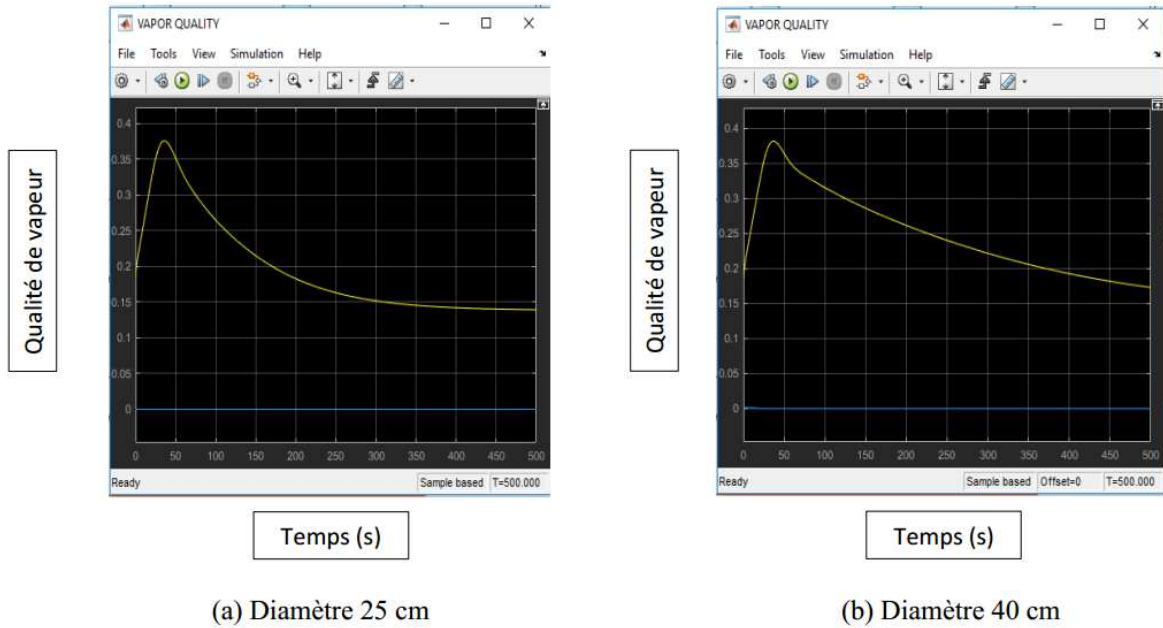
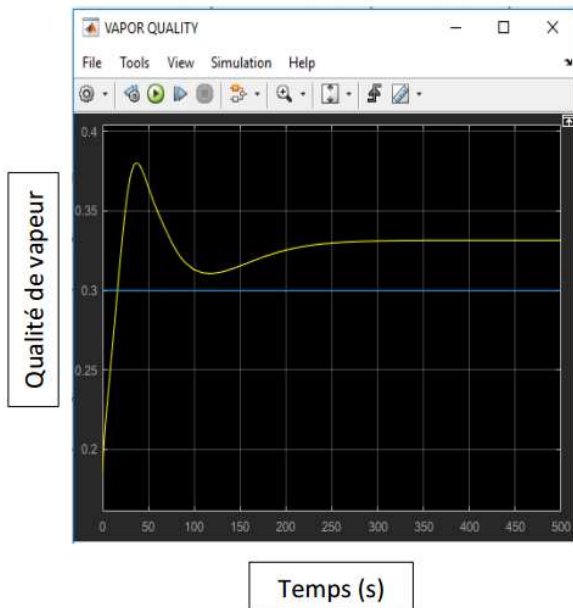


Figure 6 : Courbe de la qualité de vapeur pour $P=2\text{MPa}$, $\dot{M}=0,5\text{kg/s}$ (0%)

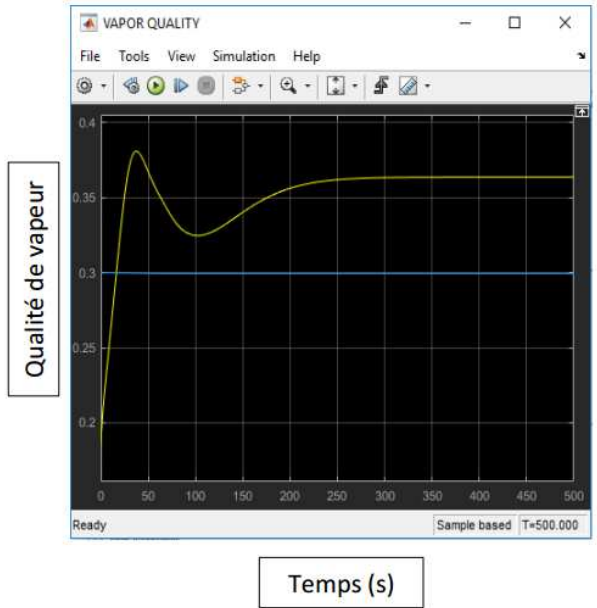
Selon les figures 7 (a) et (b), on observe qu'au tout début de la simulation on a 15% de vapeur. Cette vapeur augmente jusqu'à atteindre un pic de 38% de vapeur. Ce pic est atteint pendant quelque dizaine de seconde (environ 30s). La qualité de vapeur diminue progressivement jusqu'à 31% de vapeur à environ 120s pour ensuite remonter et atteindre son état stable à partir de 270s dont la vapeur produit est de 33%. La courbe de la figure 7(b) montre que la qualité de vapeur diminue jusqu'à 33% (environ 100s) pour ensuite augmenter et atteindre son état à partir de 250s (36% de vapeur).

3.2. Variation de pression P du réservoir (Propriétés du réservoir : pourcentage de vapeur 30% ; Diamètre D = 40 cm)

La figure 7 représente la courbe de la qualité de vapeur pour D=25 cm, $\dot{M}=0,5\text{kg/s}$ (30%).



(a) Pression $P = 2$ MPa

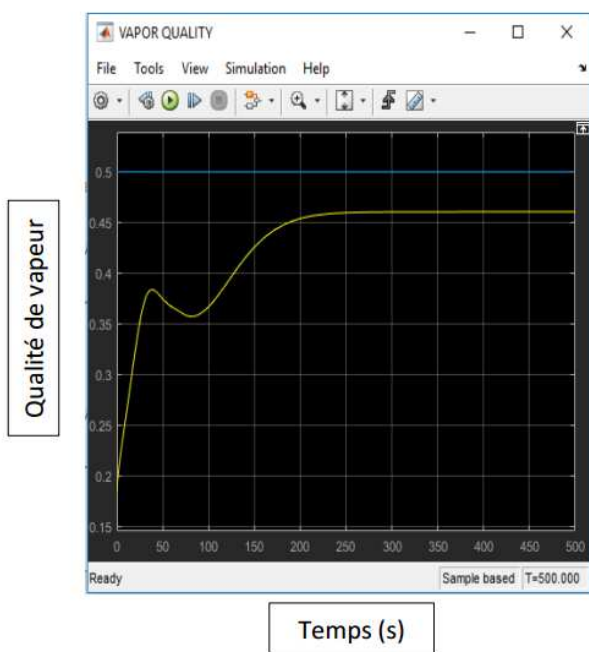


(b) Pression $P = 4,5$ MPa

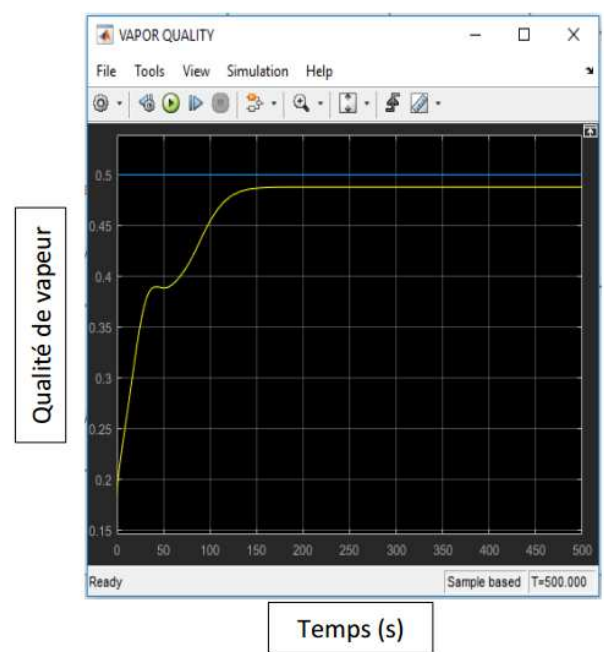
Figure 7 : Courbe de la qualité de vapeur pour $D=25$ cm, $\dot{M}=0,5$ kg/s (30%)

7.3. Variation du débit massique \dot{M} du réservoir (Propriétés du réservoir : pourcentage de vapeur 50% ; Diamètre $D = 25$ cm)

La figure 8 représente la courbe de la qualité de vapeur pour $P=2$ MPa, $D=25$ cm (50%).



(a) Débit massique $\dot{M} = 0,5$ kg/s



(b) Débit massique $\dot{M} = 1$ kg/s

Figure 8 : Courbe de la qualité de vapeur pour $P=2$ MPa, $D=25$ cm (50%)

Selon les figures 8 (a) et (b), on observe qu'au tout début de la simulation on a 20% de vapeur. Cette vapeur augmente et atteint de 38% pendant quelque dizaine de seconde (environ 30s).

La qualité de vapeur diminue progressivement jusqu'à 36% de vapeur à environ 90s pour ensuite remonter et atteindre son état stable à partir de 250s dont la vapeur produit est de 46%. La courbe de la figure 8 (b) montre que la vapeur produit reste stable pendant quelque seconde seulement pour ensuite remonter et atteindre son état stable à partir de 150s dont la qualité de vapeur est de 49%.

On constate que le diamètre de la conduite n'a pas d'influence sur la production de vapeur mais par contre plus le diamètre est important plus l'atteinte l'état stable nécessite beaucoup plus de temps

Dans le tableau 2, on remarque que plus la pression du réservoir n'augmente, plus la vapeur produite n'est importante.

Tableau2 : Variation du diamètre.

	Diamètre 25 cm	Diamètre 40 cm
Débit massique \dot{M}	0,5 kg/s	0,5 kg/s
Pression P	2 MPa	2 MPa
% de vapeur du réservoir	0 %	0 %
Etat stable à la récupération (temps 500 secondes)	14% (450s)	Pas atteint

	Diamètre 25 cm	Diamètre 40 cm
Débit massique \dot{M}	0,5 kg/s	0,5 kg/s
Pression P	4,5 MPa	4,5 MPa
% de vapeur du réservoir	0 %	0 %
Etat stable à la récupération (temps 500 secondes)	21% (350s)	Pas atteint

	Diamètre 25 cm	Diamètre 40 cm
Débit massique \dot{M}	1 kg/s	1 kg/s
Pression P	2 MPa	2 MPa
% de vapeur du réservoir	0 %	0 %
Etat stable à la récupération (temps 500 secondes)	16% (250s)	16%(450s)

	Diamètre 25 cm	Diamètre 40 cm
Débit massique \dot{M}	1 kg/s	1 kg/s
Pression P	4,5 MPa	4,5 MPa
% de vapeur du réservoir	0 %	0 %
Etat stable à la récupération (temps 500 secondes)	24% (200s)	24% (400s)

4. DISCUSSION

D'après ces tableaux, on constate que plus le débit massique du réservoir augmente, plus la vapeur produite n'est importante. Le diamètre de la conduite n'a pas d'influence sur la production de vapeur mais seul le temps pour atteindre l'état stable de la production de vapeur est affecté par le diamètre de la conduite puisque plus le diamètre de la conduite est important plus l'état stable pour la production de vapeur nécessite beaucoup plus de temps. La pression du réservoir a beaucoup d'influence sur la production de vapeur. Avec une pression élevée, on peut avoir une importante production de vapeur. Le débit du réservoir a beaucoup d'influence sur la production de vapeur.

Avec un débit massique élevé, on peut avoir une importante production de vapeur. On constate aussi d'après les résultats que pour un réservoir d'eau qui a un pourcentage de vapeur inférieur à 50%, on peut récupérer plus de de vapeur que celle produit par le réservoir. Mais pour un réservoir de contenant plus de 50% de vapeur on ne pourrait pas récupérer ces 50% mais un taux inférieur. Le seuil pour la production de vapeur dans notre cas est donc de 50% de vapeur dans le réservoir.

5. CONCLUSION

Des forages géothermiques à grande profondeur permettent de produire de l'eau chaude qui peut satisfaire de nombreuses utilisations : chauffage de bains, de serres agricoles, jusqu'à l'alimentation de réseaux de chaleur pour le chauffage urbain.

La particule fluide est une portion de fluide à laquelle correspondent, à un instant t , une vitesse, une pression, une température, une masse volumique, etc. Le volume envisagé est très petit à notre échelle, mais doit contenir encore un très grand nombre de molécules pour que les chocs moléculaires puissent être remplacés par la pression moyenne. Les particules fluides ne sont pas des particules microscopiques sur lesquelles le mouvement brownien dû à l'agitation moléculaire est très perceptible ; la notion de continuité repose sur celle de la compacité du réseau moléculaire intrinsèquement lacunaire¹.

Cet ouvrage a pour objectif principal de montrer comment modéliser la vaporisation de l'eau pour générer de la vapeur additionnelle. L'eau entre dans la conduite à 423,15 K à un débit massique compris entre l'intervalle : $0,5 \leq \dot{M} \leq 1$ kg/s. La conduite est sectionnée en quatre qui sont chauffées à des températures différentes. La vapeur ainsi récupérée peut être utilisée pour l'exploitation géothermique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Collectif BRGM-ADEME, La géothermie, Orléans, Angers, Editions BRGM, ADEME Editions, 2004 ; Coll. "Les Enjeux des Géosciences"
- [2] Collectif ADEME-ARENE-BRGM, Guide technique Pompe à chaleur géothermique sur aquifère - Conception et mise en œuvre, , Angers, Paris, Orléans : Editions BRGM, ADEME Editions, 2008
- [3] Philippe Laplaige, Jean Lemale, Énergie Géothermique, Paris : Technique de l'Ingénieur, traité, Génie énergétique BE 8 590 Volume BE, 2001
- [6] Pierre Saramito , Modélisation et calcul des interfaces bi-fluides, cours, 19 décembre 2001

- [7] Hervé Lemonnier, Une introduction aux écoulements diphasiques : Occurrence industrielle et régimes d'écoulement, cours, Phelma 2012-2013.
- [8] Philippe Helluy, Simulation numérique des écoulements multiphasiques : de la théorie aux applications, Habilitation à Diriger des Recherches soutenue le 6 janvier 2005 à l'Université du Sud Toulon Var.
- [9] Florent Ravelet, Laboratoire DynFluid Arts et Métiers Paris Tech, cours, 7 novembre 2012
- [10] Jacques Padet, FLUIDES EN ÉCOULEMENT : Méthodes et modèles, cours
- [11] Romain Denèfle, Modélisation locale diphasique eau-vapeur des écoulements dans les générateurs de vapeur, thèse soutenue le 14 novembre 2013 à l'Université Bordeaux 1 ; Ecole Doctorale des Sciences Physiques de l'Ingénieur
- [12] Florent Ravelet, Thermohydraulique des écoulements internes, cours, 18 juillet 2019
- [13] Salah Zouaoui, Modélisation et Simulation des Ecoulements Multiphasiques basées sur une Approche Multi-Echelles. Application au Transport Solide, thèse soutenue le Soutenue le 04 Juin 2016 à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou Tasdawit Lmulud At Maemmar.
- [14] Bamdad Salemi, Contributions expérimentales sur les écoulements diphasiques dans un évaporateur de climatisation : essais en eau-air et en réfrigérant R134a, thèse soutenue le 18 décembre 2014 à l'Université de Lorraine, Ecole Doctorale : Énergie Mécanique Matériaux ;
- [15] Jean-Baptiste Dupont, Etude des écoulements diphasiques dans les mini-canaux d'une pile à combustible, thèse soutenue le 20 décembre 2007 à l'Institut National Polytechnique de Toulouse
- [16] Rainier Hreiz, Etude expérimentale et numérique de séparateurs gaz-liquide de type cyclone, thèse soutenue le 07 décembre 2011 à l'Institut National Polytechnique de Lorraine