

Simulation d'écoulements compositionnels thermiques. Applications à la géothermie haute énergie.

L. Beaude^{a,b,c,d}, K. Brenner^{a,b}, S. Lopez^c, R. Masson^{a,b}, F. Smai^c

^aLaboratoire de Mathématiques J.A. Dieudonné, UMR 7351 CNRS, Parc Valrose 06108 Nice Cedex 02, France

^bUniversity Nice Sophia Antipolis, team COFFEE, INRIA Sophia Antipolis Méditerranée

^cBRGM Orléans France

^dlaurence.beau@unice.fr

Keywords: modèle de Darcy diphasique compositionnel thermique, géothermie, conditions limites pour l'interaction sol-atmosphère, volumes finis

1. Introduction

L'objectif est de modéliser et simuler les transferts de masse (potentiellement diphasique) et d'énergie dans un milieu géologique depuis la surface jusqu'à des interfaces profondes où la température est très élevée. Le cas d'application considéré correspond au champ de Bouillante, en Guadeloupe, caractérisé par une activité géothermale proche de la surface (température du sol proche de 100 ° C, environ 250 ° C à 300m de profondeur). Le but est de comprendre la circulation des fluides et de la chaleur pour expliquer pourquoi la sortie se fait par la mer. Pour le moment nous travaillons avec une géométrie simplifiée du domaine pour nous focaliser sur la modélisation des frontières.

2. Modélisation

Le modèle numérique prend en compte les aspects compositionnels des phases liquide et gazeuse avec notamment le composant H₂O susceptible de se vaporiser dans la phase vapeur et le composant air pouvant se dissoudre dans la phase liquide. Il prend également en compte les changements de phases avec l'apparition et la disparition des phases liquide et gazeuse supposées régies par les lois d'équilibre thermodynamique.

2.1. Formulation T-PSF

Il est possible d'utiliser les variables naturelles comme inconnues (la température T , les pressions P^l et P^g , les saturations S^l et S^g , et les fractions molaires des composants c^α de la phase α). Cependant la présence effective de chaque phase est obtenue par un flash négatif coûteux. Une autre formulation (notée T-PSF) consiste à utiliser comme inconnues la température T , les pressions P^l et P^g , les saturations S^l et S^g , et les fugacités f_i de chaque composant i [2]. Les fractions molaires sont alors exprimées en fonction des inconnues et celles d'une phase absente sont naturellement prolongées par celles à l'équilibre avec les phases présentes. L'avantage est de fixer l'ensemble d'inconnues et d'équations et les apparitions/disparitions de phase prennent la forme d'une contrainte de complémentarité par phase [1].

2.2. Conditions limites

Le but étant de tenir compte de l'atmosphère sans la modéliser, il s'agit de bien définir les conditions limites. Celles-ci sont décrites sur la figure 1. Concernant l'interface entre le domaine et l'atmosphère :

- on impose l'atmosphère loin du sol, soit la pression P^{atm} , la température T^{atm} et les fractions molaires des composants dans l'atmosphère $c_i^{g,atm}$,
- on introduit un terme représentant l'évaporation dans une couche limite d'épaisseur δ_m à l'extérieur du milieu poreux. L'évaporation de chaque composant i est constituée d'un terme de convection approché par un décentrage deux points : $(q_n^g)^+ c_i^g + (q_n^g)^- c_i^{g,atm}$ où q_n^g est le flux molaire normal du gaz à l'extérieur du milieu poreux, et c_i^α est la fraction molaire du composant i de la phase α dans

le milieu poreux. L'évaporation est aussi représentée par un terme de diffusion $\frac{\zeta^g D^g}{\delta_m} (c_i^g - c_i^{g,atm})$ où D^g est le coefficient de diffusion moléculaire du gaz; ζ^α est la densité molaire de la phase α ,

- on ajoute un terme de débordement en phase liquide si nécessaire (pour éviter d'obtenir une humidité relative plus grande que 1). On note δV_n^l la vitesse normale de la phase liquide débordant du milieu poreux à l'interface du côté libre. Le flux de vitesse sortant lié au débordement est donc $c_i^l \delta V_n^l$. On note \mathbf{n} la normal sortante au milieu poreux à l'interface, \mathbf{V}_i le flux molaire du composant i . En écrivant la conservation des flux molaires de chaque composant i à l'interface, on obtient :

$$(q_n^g)^+ c_i^g + (q_n^g)^- c_i^{g,atm} + \frac{\zeta^g D^g}{\delta_m} (c_i^g - c_i^{g,atm}) + c_i^l \delta V_n^l = \mathbf{V}_i \cdot \mathbf{n},$$

- deux lois de fermeture sont obtenues en écrivant les conditions d'apparition du liquide à l'interface dans le milieu libre et dans le milieu poreux. Après quelques transformations on obtient les conditions de complémentarité suivantes [3] :

$$\begin{cases} (1 - \sum_i c_i^l) s^l = 0, \\ 1 - \sum_i c_i^l \geq 0, s^l \geq 0, \\ (P^g - P^l) \delta V_n^l = 0, \\ P^g - P^l \geq 0, \delta V_n^l \geq 0. \end{cases}$$

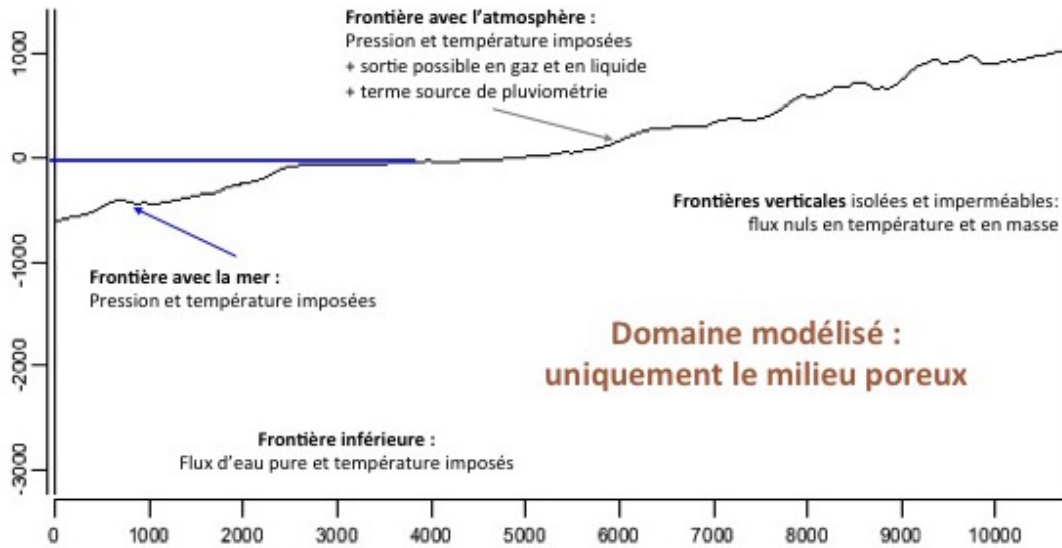


Figure 1: Illustration du domaine d'étude et des conditions limites.

3. Simulation numérique.

La résolution numérique fait appel à la méthode des volumes finis. Nous avons choisi la formulation T-PSF qui a pour avantage que les ensembles d'inconnus et d'équations soient fixés, cependant les inconnus primaires et secondaires changent en fonction des phases présentes. Nous nous concentrons sur la spécification des conditions limites et nous avons choisi dans un premier temps un schéma à deux points (Two Points Flux Approximation). Pour assurer la convergence du schéma, nous utilisons un maillage de Voronoï qui satisfait la condition d'orthogonalité, pour le moment nous travaillons en 2D.

References

- [1] R. Masson, L. Trenty, Y. Zhang. Formulations of two phase liquid gas compositional Darcy flows with phase transitions. International Journal on Finite Volumes, Episciences.org, 2014, 11, pp.34.
- [2] A. Lauser, C. Hager, R. Helmig, B. Wohlmuth. A new approach for phase transitions in miscible multi-phase flow in porous media A. Advances in Water Resources, Volume 34, Issue 8, p. 957-966, 2011.
- [3] Huy Cuong Vu Do, *Numerical methods for flow and transport in porous media*, Numerical Analysis [math.NA]. Université Paris Sud - Paris XI, 2014.