



Doctoral Thesis

Multiscale investigation and numerical modeling of imbibition, drainage and drying of a macroporous medium

Author(s):

Lal, Sreeyuth

Publication Date:

2016

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010725628> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 23628

MULTISCALE INVESTIGATION AND NUMERICAL
MODELING OF IMBIBITION, DRAINAGE AND DRYING OF
A MACROPOROUS MEDIUM

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

SREEYUTH LAL

M.Sc. in Nuclear Engineering,
ETH Zurich - EPF Lausanne
born on 21.11.1988
citizen of Republic of India

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jan Carmeliet, examiner
Prof. Dr. Gilles Pijaudier-Cabot, co-examiner
Dr. Marc Prat, co-examiner
Dr. Lily Poulikakos, co-examiner
Dr. Dominique Derome, co-examiner

2016

ABSTRACT

This thesis proposes an integrated multiscale methodology to study wetting and drying in macroporous media exposed to environmental loads. The motivation behind this work arises from the fact that the durability of many porous materials exposed to the environment is significantly influenced by the residence time of water in them under typical environmental conditions. In this thesis, multiscale experimental investigations and numerical modeling of fluid transport are performed for a highly complex, macroporous material, namely porous asphalt (PA), with the aim to determine the most important environmental conditions and material characteristics that determine the residence time of water in PA.

At the smallest scale, neutron radiography experiments of imbibition, drainage and drying in PA, using a custom-built mini wind tunnel, are coupled with three-dimensional pore space characterization using X-ray microcomputed tomography to understand the physics of air and water transport in PA. The interaction of airflow with PA is further investigated using two techniques. At the smaller scale, computational fluid dynamics (CFD) simulations of airflow in a real PA geometry are performed to identify the influence of air entrainment on convective vapor removal from the internal pore space of PA. In addition, full-scale wind tunnel experiments are coupled with particle imaging velocimetry to characterize the air boundary layer above the air-PA interface and to identify the organized, turbulent flow structures in the boundary layer.

Since gravity-driven drainage and drying are found to be the most important factors determining the residence time of water in PA, pore network model (PNM) simulations of drainage in PA and subsequent drying of the residual liquid are performed. Gravity-driven drainage is simulated using a modified invasion percolation algorithm that includes the effect of gravity while drying is simulated using a cluster-based approach. An insight into the evolution of capillary pressure with saturation for macroporous media during gravity-driven drainage is obtained. It is also observed that a higher hydrophobicity in the pore network, simulated by increasing the number of pores that do not retain water after drainage, leads to shorter constant drying rate periods (CDRP) at the beginning of the drying simulations. To model the experimental observation of no CDRP at the beginning of drying in PA, a further improvement in the pore network is required in order to capture the high hydrophobicity and complex connectivity in PA as they are responsible for the low hydraulic connectivity and high vapor diffusion resistance during drying in PA. Finally, the PNM simulations are coupled to a heat-air-moisture continuum approach to show that the macroscopic drying behavior of a complex macroporous medium can be

modeled with such a coupling approach, subject to more realistic pore networks. Such a continuum approach to drying is extremely computationally efficient and can be used to easily understand the influence of dynamic environmental loads on the drying process of a macroporous medium.

RESUMÉ

Cette thèse propose une méthodologie multi-échelle intégrée pour étudier le mouillage et le séchage de matériaux macroporeux exposés à des charges environnementales. La motivation derrière ce travail provient du fait que la durée de vie d'un grand nombre de matériaux poreux exposés à l'environnement est fortement influencée par le temps de séjour de l'eau sous conditions ambiantes typiques. Dans cette thèse, des recherches expérimentales multi-échelles et des modélisations numériques du transport des fluides sont effectuées pour un matériau macroporeux très complexe, à savoir le revêtement bitumineux drainant (RBD), dans le but de déterminer les conditions environnementales et les caractéristiques du matériau qui déterminent le temps de séjour de l'eau dans le RBD.

À la plus petite échelle, des expériences utilisant la radiographie à neutrons pour documenter l'imbibition, le drainage et le séchage d'éprouvettes de RBD placées dans une mini-soufflerie faite sur mesure, sont couplées à une caractérisation tridimensionnelle du système poreux obtenue par microtomographie à rayons X pour comprendre le transport de l'air et de l'eau dans le matériau. L'interaction du flux d'air avec le RBD est en outre étudiée en utilisant deux techniques. À petite échelle, des simulations de flux d'air dans une géométrie réelle de RBD sont effectuées par dynamique computationnelle des fluides pour identifier l'influence de l'entraînement de l'air sur l'élimination par convection de la vapeur d'eau des pores de RBD. En outre, des expériences en soufflerie à grande échelle utilisent la vélocimétrie par imagerie de particules afin de caractériser la couche limite d'air au-dessus de l'interface air-RBD et d'identifier les structures d'écoulement turbulent organisé dans la couche limite.

Étant donné que le drainage par gravité et le séchage se trouvent être les facteurs les plus importants déterminant le temps de séjour de l'eau dans le RBD, des simulations par modèle de réseau de pores (MRP) du drainage dans le RBD et du séchage subséquent du liquide résiduel sont effectués. Le drainage par gravité est simulé en utilisant un algorithme modifié d'invasion par percolation qui inclut l'effet de la gravité. Quant au séchage, il est simulé en utilisant une approche fondée sur la méthode des grappes. L'évolution de la pression capillaire avec le degré de saturation du matériau macroporeux pendant le drainage par gravité est bien obtenue. On observe également qu'un caractère hydrophobe plus élevé dans le réseau de pores, simulé en augmentant le nombre de pores qui ne retiennent pas l'eau après le drainage, mène à de plus courtes périodes constantes du taux de séchage (PCTS) au début de la simulation de séchage. Pour modéliser l'absence de PCTS au début du séchage, tel que observé expérimentalement, une amélioration du modèle part

réseau de pores serait nécessaire afin de capturer la forte hydrophobie et la connectivité complexe du RBD, responsables de la basse connectivité hydraulique et de la résistance à la diffusion de vapeur élevée notées pendant le séchage du RBD. Enfin, la simulation par MRP couplée à un modèle en milieux continus du transport de la chaleur, de l'air et de l'eau modéliseraient adéquatement le comportement macroscopique du séchage d'un milieu macroporeux complexe, sous réserve de l'obtention de réseaux de pores plus réalistes. Une telle approche de modèle en milieux continus pour le séchage est extrêmement efficace informatiquement et peut être facilement utilisée pour comprendre l'influence des charges environnementales sur le processus de séchage d'un matériau macroporeux.