



HAL
open science

Transfert de phase liquide dans du gel d'Agar-Agar sous chargement hydraulique et électrique

Jérôme Boscus, Fabien Cherblanc, Jean-Claude Benet

► To cite this version:

Jérôme Boscus, Fabien Cherblanc, Jean-Claude Benet. Transfert de phase liquide dans du gel d'Agar-Agar sous chargement hydraulique et électrique. 17ème Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. hal-00583007

HAL Id: hal-00583007

<https://hal.science/hal-00583007>

Submitted on 26 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Transfert de phase liquide dans du gel d'agar-agar sous chargement hydraulique et électrique

Jérôme Boscus, Fabien Cherblanc & Jean-Claude Bénéat

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) – UMR CNRS 5508
Université Montpellier 2, CC 048, Place Eugène Bataillon
34095 MONTPELLIER cedex 5
jboscus@lmgc.univ-montp2.fr

Résumé :

L'objet de ce papier est l'étude des couplages entre transport de matière et phénomènes électriques au sein d'un milieu poreux. La relation de transport de la phase liquide est écrite dans le cas d'un milieu poreux saturé, isotherme et non déformable, soumis à un champ électrique. Une étude expérimentale est alors menée pour valider cette relation de transport dans le cas d'un milieu poreux organique : le gel d'agar-agar.

Dans un premier temps, les coefficients (intrinsèques au milieu poreux) présents dans la relation de transport de la phase liquide sont déterminés. Pour cela, des essais de conduction hydraulique et d'électro-osmose sont menés. Dans un deuxième temps, les effets hydraulique et électrique sont appliqués simultanément et nous vérifions alors qu'il y a bien superposition, ce qui valide la relation de transport dans le cas du gel d'agar-agar.

Abstract:

This paper deals with the coupling between mass transport and electric phenomena within a porous medium. In the presence of an electric field, the liquid phase transport relation is written for a saturated porous medium in isothermal conditions, assuming a non deformable matrix. An experimental study is performed in order to validate this transport relation in an organic porous medium: agar gel.

In the first step, we determine the (intrinsic) coefficients that appear in the transport relation. For this, we perform hydraulic conduction and electro-osmosis tests. In the second step, hydraulic and electric constraints are applied simultaneously and we verify the good superposition, what allows the validation of the transport relation in the case of agar gel.

Mots clefs :

couplage ; gel ; agar-agar ; transport ; champ électrique ; électro-osmose.

1 Introduction

Les couplages entre transport de matière (ou déformation) et phénomènes électriques au sein d'un milieu poreux sont une préoccupation pour de nombreux domaines et les applications sont variées, aussi bien en génie civil (dépollution des sols par électro-rémediation [1], stabilité des argiles [2]) qu'en biomécanique (étude des os [3], des cartilages [4] et des membranes [5]).

Parmi les différents milieux poreux utilisés pour décrire ces couplages, les gels ont une place prépondérante dans de nombreux secteurs industriels ou biomédicaux, avec entre autres l'étude des actionneurs électro-actifs du mouvement ciliaire [6], les cils étant les appendices locomoteurs situés à la surface de certaines cellules, ou la modélisation des tissus humains lors de traitements électrochimiques des tumeurs cancéreuses basés sur l'électro-osmose [7]. Une application classique de ces couplages dans les gels (et dans le gel d'agar-agar en particulier) est l'électrophorèse, qui permet de séparer des molécules en les faisant migrer sous l'effet d'un champ électrique.

Un transfert de phase liquide, au sein d'un milieu poreux saturé, peut être provoqué par l'application d'une différence de potentiel hydrique (conduction hydraulique) ou d'un champ électrique (électro-osmose). Lors d'une étude précédente [8], un modèle phénoménologique de transport dans un milieu poreux soumis à un champ électrique a été établi, à l'aide des concepts de la mécanique des milieux continus et de la thermodynamique des processus irréversibles linéaire [9]. La relation de transport de la phase liquide au sein du milieu poreux se réduit, dans le cas saturé, non déformable et isotherme, à une relation classiquement utilisée lors de l'étude des phénomènes électrocinétiques [2,10]. L'objet de ce papier est de valider cette relation dans le cas d'un matériau organique : le gel d'agar-agar.

2 Transport isotherme de la phase liquide en milieu diphasique saturé

On considère un milieu poreux saturé, indéformable, en conditions isothermes. Si le flux est unidimensionnel, la relation de transport de la phase liquide correspond à la relation phénoménologique classique [2,8,10] :

$$v_L = - \underbrace{\frac{k_H}{\mu} \frac{\Delta p_L}{L}}_1 - \underbrace{k_E \frac{\Delta \phi}{L}}_2 \quad (1)$$

où v_L ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) est la vitesse de filtration de la phase liquide, k_H (m^2) et k_E ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$) sont, respectivement, la perméabilité intrinsèque et la perméabilité électro-osmotique du milieu poreux, μ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) est la viscosité dynamique de la phase liquide, L (m) est la largeur du milieu poreux dans le sens du flux, Δp_L (Pa) et $\Delta \phi$ (V) sont, respectivement, les différences de potentiels hydrique et électrique de part et d'autre du milieu poreux. Dans cette équation, le terme 1 correspond à la conduction hydraulique et le terme 2 correspond au flux électro-osmotique.

3 Etude expérimentale du transfert dans du gel d'agar-agar saturé

Trois étapes sont nécessaires pour valider la relation de transport (1). Les deux premières portent sur la détermination des coefficients k_H et k_E au moyen d'expériences indépendantes. La dernière étape consiste à appliquer simultanément les deux forces thermodynamiques (gradients de potentiels hydrique et électrique) et à vérifier si elles se superposent.

3.1 Le milieu poreux modèle : le gel d'agar-agar

Le milieu poreux choisi pour cette étude est le gel d'agar-agar. Il est diphasique (solide - liquide) sur une large gamme de teneurs en eau, dont celle de cette étude (1330% en masse), et son comportement élastique, même en grandes déformations, permet d'étudier les couplages entre transfert et déformation [11]. Le gel d'agar-agar est un biopolymère très utilisé en agroalimentaire, dans l'industrie pharmaceutique et comme milieu modèle de produits biologiques [12] ou de tissus humains [7].

L'agar-agar, ou agarose, est un gélifiant naturel extrait d'algues rouges. Il se présente après extraction et séchage sous forme de filaments jaunâtres et translucides ou sous forme de poudre blanche. Insoluble dans l'eau froide, il se solubilise dans l'eau bouillante et donne, en se refroidissant, un gel consistant dont la matrice poreuse est un réseau tridimensionnel continu de macromolécules structuré en nid d'abeilles [11]. Les nœuds du réseau résultent d'une association partielle des chaînes de polymères sous une forme plus ou moins organisée et peuvent évoluer sous l'influence d'actions extérieures. Le degré de réticulation de ces chaînes influence directement les propriétés mécaniques.

Etant donné que le gel est un matériau organique et que le degré de réticulation dépend fortement de la teneur en eau et de la cinétique de gélification, il est difficile de réaliser des échantillons identiques. De plus, le gel séchant et rétrécissant au contact de l'air, il est nécessaire de le laisser en permanence en contact avec

la phase liquide. Enfin, le gel gonfle pendant les premières minutes après son immersion dans la phase liquide et se sature complètement. Pour ces trois raisons, il est nécessaire de réaliser les différentes étapes de l'étude expérimentale sur un même échantillon, celui-ci restant placé dans un dispositif unique et en contact avec la phase liquide seulement.

3.2 La cellule électro-osmotique

Nous avons développé une cellule expérimentale en Plexiglas formée de trois compartiments. Le compartiment central contient l'échantillon cylindrique de gel d'agar-agar (rayon $R = 32$ mm, longueur $L = 26$ mm). Celui de gauche est rempli d'eau et surmonté d'un tuyau fin (rayon $r = 2$ mm). Celui de droite contient de l'eau de manière à garder l'échantillon de gel immergé. Le niveau d'eau est maintenu constant dans ce dernier compartiment. Le choix du matériau s'est porté sur du Plexiglas parce qu'il est électriquement isolant, transparent, mécaniquement résistant et facile à usiner. Dans le but de limiter les réactions chimiques, les électrodes permettant d'appliquer la tension électrique (qui ne sont pas en contact avec le gel) sont en fibres de carbone. Pour la même raison, les électrodes permettant de mesurer la différence de potentiel effective entre les deux côtés de l'échantillon (qui sont en contact avec le gel) sont en platine.

3.3 Détermination de la perméabilité intrinsèque k_H

La perméabilité intrinsèque du gel d'agar-agar est déterminée par un essai de conduction hydraulique : deux pressions hydrauliques différentes sont imposées de part et d'autre de l'échantillon et le flux d'eau qui en résulte est mesuré. Lorsque aucune tension n'est appliquée aux bornes de l'échantillon, la relation de transport de la phase liquide (1) correspond à la loi de Darcy :

$$\frac{Q}{S} = \frac{k_H}{\mu} \frac{\rho g h}{L} \quad (2)$$

où Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) est le flux hydraulique traversant le gel, S (m^2) est la section du gel, $\rho = 997,13$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ est la masse volumique de l'eau à 25°C , et h (m) est la différence de hauteur entre le niveau d'eau dans le compartiment de gauche et celui dans le compartiment de droite. Pour l'eau à 25°C , $\mu = 8,91 \cdot 10^{-4}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Les valeurs du gradient de charge hydraulique $\rho g h/L$ et de la vitesse de la phase liquide correspondante $v_L = Q/S$ sont relevées (Fig. 1). La pente de la droite correspond à la perméabilité intrinsèque (à un facteur μ près), ce qui nous permet de trouver : $k_H = 1,32 \cdot 10^{-17}$ m^2 . Cette valeur est du même ordre de grandeur dans certaines argiles et correspond à un milieu qualifié de « pratiquement imperméable » [2].

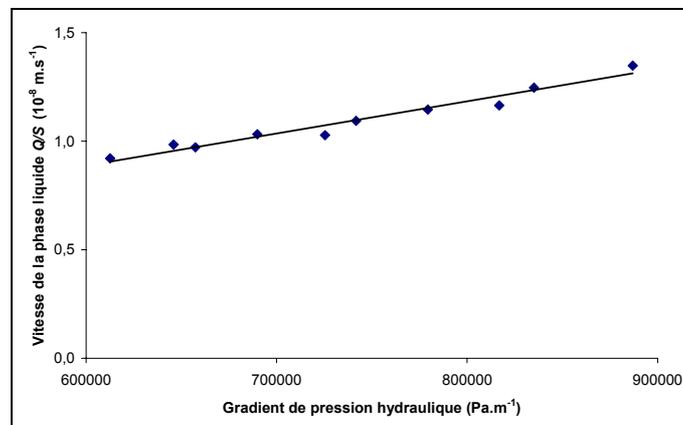


FIG. 1 – Vitesse de la phase liquide en fonction du gradient hydraulique appliqué.

3.4 Détermination de la perméabilité électro-osmotique k_E

La perméabilité électro-osmotique k_E est déterminée par un essai d'électro-osmose (à pression hydraulique égale de part et d'autre de l'échantillon) : une différence de potentiel électrique est appliquée de part et d'autre du gel et le flux d'eau qui en résulte est mesuré. Le pH des compartiments et du gel change rapidement au cours de l'essai et les propriétés du gel sont progressivement modifiées [13]. Pour cette raison, l'essai électro-osmotique ne dure que quelques minutes et nous considérons que le gel reste dans son état initial.

Dans le cas de l'électro-osmose, la relation (1) s'écrit :

$$v_L = \frac{Q}{S} = k_E \frac{E}{L} \quad (3)$$

où E (V) est la différence de potentiel électrique mesurée aux bords de l'échantillon.

Nous appliquons successivement différentes valeurs pour E . On peut voir sur la figure 2 que la vitesse de la phase liquide $v_L = Q/S$ est proportionnelle à la différence de potentiel électrique mesurée E/L . La pente de la droite correspond à k_E , ce qui donne $k_E = 1,22 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$.

Cette valeur est bien dans l'intervalle généralement admis pour ce coefficient. En effet, la perméabilité électro-osmotique d'un matériau est souvent comprise entre $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ et $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ [10]. Cette propriété, intrinsèque au matériau, est relativement indépendante de la taille des pores mais elle est sensible à la concentration électrolytique.

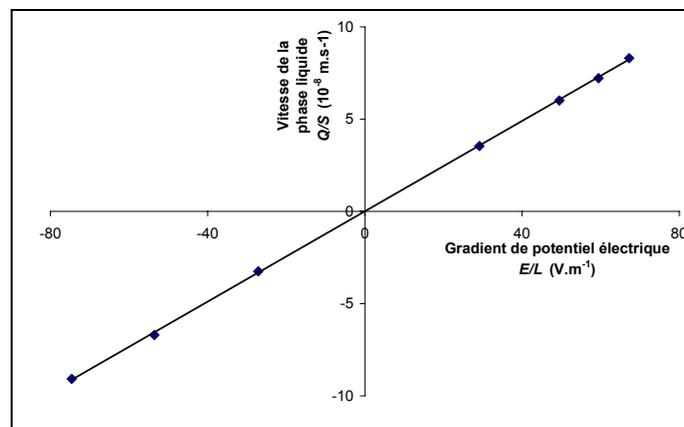


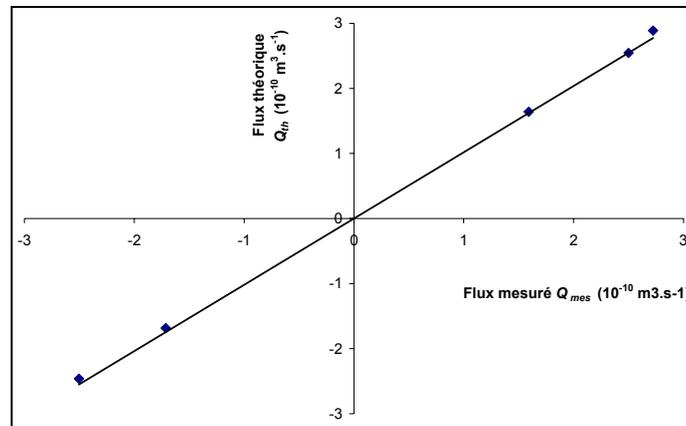
FIG. 2 – Vitesse de la phase liquide en fonction du gradient électrique appliqué.

3.5 Superposition des effets hydrauliques et électriques

Pour vérifier s'il y a superposition des effets hydraulique et électrique, une colonne d'eau et un champ électrique sont simultanément appliqués sur l'échantillon. Ainsi, la relation (1) peut s'écrire :

$$v_L = \frac{Q}{S} = \frac{k_H}{\mu} \frac{\rho g h}{L} + k_E \frac{E}{L} \quad (4)$$

Les valeurs pour les flux hydrauliques mesuré Q_m et théorique Q_{th} (déterminé à partir de (4)) sont comparées (Fig. 3) pour diverses valeurs de h et E . La pente de la droite est 1,02 ce qui signifie que l'application simultanée des deux actions (hydraulique et électrique) provoque un flux qui correspond à la somme des flux hydraulique et électrique dus à chaque force agissant séparément. Cependant, il peut arriver que les actions ne se superposent pas [5].



. 3 – Comparaison des flux hydrauliques mesuré et théorique.

4 Conclusion

La relation phénoménologique de transport de la phase liquide fait apparaître deux coefficients de transport : la perméabilité intrinsèque (liée au gradient de potentiel hydrique) et la perméabilité électro-osmotique (liée au gradient de potentiel électrique). En nous limitant au cas saturé, isotherme, indéformable et unidimensionnel, nous avons déterminé ces deux coefficients pour le gel d'agar-agar, en appliquant séparément la force thermodynamique correspondante.

Par la suite, nous avons appliqué conjointement les gradients de potentiels hydrique et électrique et avons montré qu'il y a bien superposition des deux effets, ce qui valide la relation de transfert dans le cas du gel d'agar-agar saturé non déformable en conditions isothermes.

Références

- [1] Y.B. Acar, R.J. Gale, A.N. Alshwabkeh, R.E. Marks, S. Puppala, M. Bricka & R. Parker. Electrokinetic remediation: basics and technology status. *Journal of Hazardous Materials* 40:117-137, 1995.
- [2] J.K. Mitchell. *Fundamentals of soils behavior*, 2nd edition, New York, Wiley, 1993.
- [3] S.C. Cowin. Bone poroelasticity. *Journal of Biomechanics* 32:217-238, 1999.
- [4] E.F. Kaasschieter, A.J.H. Frijns & J.M. Huyghe. Mixed finite element modelling of cartilaginous tissues. *Mathematics and Computers in Simulation* 61:549-560, 2003.
- [5] V.M. Barragán, C. Ruíz-Bauzá, J.P.G. Villaluenga & B. Seoane. Simultaneous electroosmotic and permeation flows through a Nafion membrane. 1. Aqueous electrolyte solutions. *Journal of Colloid and Interface Science* 277:176-183, 2004.
- [6] O. Tabata, H. Hirasawa, S. Aoki, R. Yoshida & E. Kokufuta. Ciliary motion actuator using self-oscillating gel. *Sensors and Actuators A* 95:234-238, 2002.
- [7] M.L. Avramov Ivić, S.D. Petrović, P.M. Živković, N.D. Nikolić & K.I. Popov. An electrochemical illustration of the mathematical modelling of chlorine impact and acidification in electrochemical tumour treatment and its application on an agar-agar gel system. *Journal of Electroanalytical chemistry* 549:129-135, 2003.

- [8] J.-C. Bénet, J. Boscus & V. Richefeu. Interaction between aqueous solution transport and stress/strain in a deformable porous medium. IUTAM symposium on the mechanics of physicochemical and electromechanical interactions in porous media, Kerkrade, The Netherlands, 2003.
- [9] S.R. de Groot. *Non equilibrium thermodynamics*. Amsterdam, North Holland Publishing Company, 1969.
- [10] J. J. Nitao & J. Bear. Potentials and their role in transport in porous media. *Water Resources Research*, 32(2):225-250, 1996.
- [11] I. Mrani, J.-C. Bénet, G. Frascas & Z. Zrikem. Two dimensional simulation of dehydration of a highly deformable gel: moisture content, stress and strain fields. *Drying Technology* 15(9):2165-2193, 1997.
- [12] A.-L. Raoult-Wack. *Les procédés de déshydratation - imprégnation par immersion dans des solutions concentrées (DII). Etude expérimentale et modélisation des transferts d'eau et de soluté sur gel modèle*. PhD thesis, Université Montpellier 2, 1991.
- [13] K. Beddier. *Sur certains aspects des couplages dans les milieux poreux électrisés. Application à l'électro-osmose dans les argiles*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2001.