

Fluorescence appliquée à la caractérisation des phénomènes d'infiltration dans un milieu poreux non saturé : évaluation des risques de pollution

N.E. Abriak^{1,*}, F. Gandola^{1,2} et R. Haverkamp²

¹ *École des Mines de Douai, 941 rue Charles Bourseul,
BP. 838, 59508 Douai cedex, France*

² *Laboratoire d'Étude des Transferts en Hydrologie et en Environnement,
UMR 5564 du CNRS, UJF-INPG, BP. 53, 38041 Grenoble, France*

* Correspondance et tirés-à-part.

RÉSUMÉ

Cette étude présente une **méthode expérimentale**, non destructive, **développée** en laboratoire, pour la **caractérisation** d'une infiltration réalisée en condition d'axisymétrie dans un milieu poreux non saturé. **Nous** montrons que **cette méthode**, basée sur la visualisation des **phénomènes** par fluorescence, **permet** de **distinguer très nettement** la zone **infiltrée** et de **suivre** avec une **grande précision** l'évolution du front d'humectation **au cours** de la phase **d'infiltration**. **Conjointement**, une technique de traitement des images **basée** sur l'analyse **morphologique binaire** est proposée pour la détermination des paramètres de **l'écoulement**.

Mots **clés** : fluorescence, traitement d'images, milieu poreux non **saturé**, infiltration

ABSTRACT

This study presents an experimental non destructive method which is performed in laboratory, for the characterization of an infiltration achieved under **axisymmetrical** condition, in an unsaturated porous medium. We show that this method based on the visualization of phenomena using fluorescence, allows to distinguish clearly the infiltrated zone and to observe with a great accuracy the evolution of the wet front during the infiltration phase. Simultaneously, a technique of images treatment based on morphological binary analysis is proposed for determining flow parameters.

Key words : fluorescence, images analysis, unsaturated porous medium, infiltration

MATERIELS ET METHODE

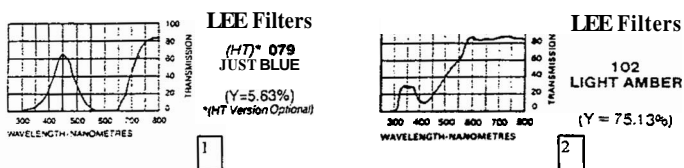
Travaillant en condition d'**axisymétrie**, l'**infiltration** est **réalisée** à partir d'un quart d'**anneau collé** à l'un des angles d'un **bac** en Plexiglas de dimensions 25-30-30 [cm]. Le sable initialement **humidifié**, est **mélangé** au moyen d'un **malaxeur** à train valseur, puis **déposé** par couches successives dans le **bac placé** sur table vibrante. Ce

POSITION DU PROBLEME

La **caractérisation** hydrodynamique de la zone non **saturée** du sol est devenue une **priorité majeure** dans la **recherche** de solutions concernant des problémes divers **tels** que la gestion des **eaux**, l'**évaluation** et le **contrôle** de la pollution d'origine **agricole** ou **industrielle**, le **dimensionnement** des sites de **stockage** de **déchets** divers... . Si, **les** nouvelles techniques d'infiltrométrie de terrain telles que **les infiltromètres** a disques [1] et le **perméamètre** de **Guelph** [2] sont **désormais** très **utilisés** en raison de la **facilité** de mise en **oeuvre** et de la rapidité d'obtention des mesures, **elles nécessitent** cependant la prise en compte du **caractère** multidirectionnel de l'**écoulement** (relatif à ces appareils) dans le **dépouillement** des mesures. Or, l'**étude** des **phénomènes** d'infiltration multidirectionnelle reste **difficile** à aborder avec **les moyens classiques** dont on dispose actuellement (sondes **T.D.R.** ou neutroniques pour la **mesure** de la teneur en eau, **combinées** avec des tensiometres pour la **mesure** de la **succion**). Outre la lourdeur de cet tquipement en sondes, la présence de ces **dernières** dans **un volume** restreint pourrait **perturber** significativement l'**écoulement**.

L'approche **expérimentale** en laboratoire **proposée** repose sur la visualisation des phenomltnes d'infiltration par fluorescence [3]. On **présente ici** la procedure **expérimentale** suivie, la technique de **traitement** et d'**analyse** d'images **associée** et les principaux **résultats** obtenus.

protocole expérimental **déjà testé** [4] assure entre autre une bonne **homogénéité** de remplissage par **couche**, condition **nécessaire** pour se placer en condition **d'axisymétrie**. L'**écoulement** est **marqué** à l'aide de fluorescine de sodium dissoute dans l'eau (**0,5g/l**). Sachant que ce colorant **possède** un pic d'absorption **maximale** à la longueur d'onde $\lambda = 490\text{nm}$ et un pic d'émission à $\lambda = 515\text{nm}$ pour un $\text{pH} = 7$, un filtre bleu (079 just blue -Lee filter- (figure 1)) est **utilisé** en condition d'éclairage et un filtre orange (102 light Amber -Lee filter- (figure 2)) pour la prise d'image, ce dernier **assurant** un contraste **très marqué** en niveau de gris (0-255) entre zone infiltrée et zone non infiltrée.



Figures 1 et 2. Spectres de transmission des filtres bleus et orange utilisés

L'**infiltromètre développé** pour **cette étude** est constitué d'un système de vase de **Mariotte** et d'un vase communiquant (figure 3): Ce dispositif **garantit** simultanément le **maintien** d'une charge H_0 constante et faiblement positive dans l'**anneau**.

La phase d'**infiltration** est **filmée** à l'aide d'une **caméra** CANON X07 CCD. Les images sont **ensuite numérisées** à partir de la carte d'acquisition **vidéo** et du logiciel **associé** SMCAM II, puis **traitées** à partir du **système** de traitement et d'**analyse** d'image PC Scope sous Windows. Le **dispositif-expérimental général** est **représenté** figure 4.

Phénomènes d'infiltration en milieu poreux

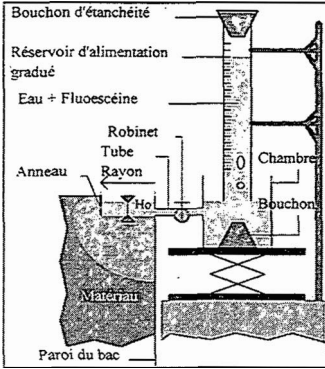


Figure 3. Technique d'infiltrométrie utilisée (Ho constanre etpositive)

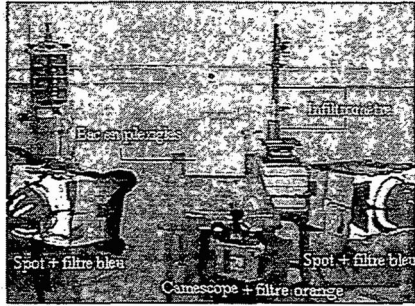


Figure 4. Dispositif expérimental général

L'analyse des images proposée est basée sur la morphologie mathématique binaire [5] : pour un contraste suffisamment marqué entre la zone d'intérêt et le fond de l'image, l'histogramme qui lui est associé permet de définir une valeur de seuil ($0 < \text{seuil} < 255$) pour la binarisation de l'image (Blanc (255) pour l'objet et noir (0) pour le fond). La génération de contour est obtenue par une opération d'ouverture (addition et soustraction au sens de Minkowski), suivie d'une opération d'amincissement avec un élément structurant défini par un voisinage 3x3. Les différents calculs mis en oeuvre dans l'analyse des essais sont réalisés par rapport aux points du contour. La figure 5 donne une représentation des étapes de traitement effectuées sur une image relative à un essai d'infiltration réalisé dans un bac de dimensions restreintes (6-8-12 [cm]).

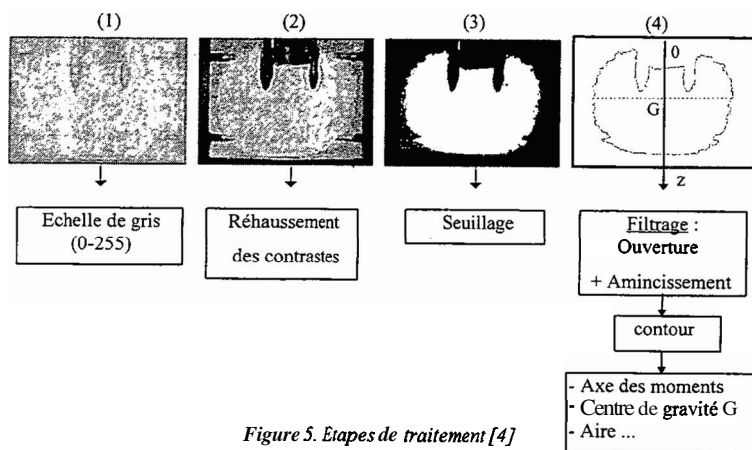


Figure 5. Etapes de traitement [4]

Le calcul des volumes infiltrés à partir de la tâche visualisée repose sur l'application du thortme de Guldin qui établit, pour un corps possédant un axe de revolution, une relation entre son volume V et la demie-surface A dtfinie par l'intersection de ce volume avec un des plans passant par l'axe de revolution. Pour une infiltration réalisée à partir d'un quart d'anneau, la relation s'écrit :

$$V't = \frac{1}{2} \pi X_G \cdot A \quad (1)$$

où $V't$ représente le volume total de la zone infiltrée à un instant donné ;
 A , la surface de la tâche visualisée ;
 et X_G , la distance entre l'axe de révolution et le centre de gravité G' de l'aire A .

Si la teneur en eau volumique initiale θ_i et la porosité ϵ sont supposées uniformes dans le bac, le degré de saturation global du domaine infiltré 9 un instant donné est égal à :

$$S_r = \frac{1}{\varepsilon} \left(\theta_i + \frac{V_{fl}}{V \cdot t} \right) = \frac{1}{\varepsilon} \left(\theta_i + 2 \frac{V_{fl}}{\pi X_G \cdot A} \right) \quad (2)$$

RESULTATS

Trois essais d'infiltration réalisée dans un même sable sont ici présentés figure 6, les conditions initiales d'humidification et de charge appliquée en surface dtant voisines. En revanche, les dimensions de l'anneau different. Les images a, b, c obtenues pour chaque configuration d'anneau (rayon R = 18, 30 et 48 [mm]), ont été prises à des instants successifs de la phase d'infiltration et n'ont subi qu'un rehaussement de contraste. Il est à noter que l'utilisation simultanée de fluorescéine dans la solution injectée et de filtres au niveau de l'éclairage et de la prise d'image, permet de distinguer nettement la zone infiltrée, sans traitement préalable des images. D'autre part, d'un point de ve e qualitatif, on peut déjà remarquer que la diffusion latérale s'avtre être très importante dts les premiers instants de la phase d'infiltration et ce, quelle que soit la configuration testde.

Par ailleurs, les clichés d montrent que l'analyse morphologique qui a été choisie pour le dpouillement des essais dome avec une très grande precision la position du front d'humectation visualisé, et permet de suivre I tout instant son Cvolution durant la phase d'infiltration. Aussi, en superposant ces derniers, il est alors possible de determiner dans une direction donnée les cinétiques d'avancées du front d'humectation.

Le tableau I présente, pour chaque essai, les valeurs du degré de saturation moyen S_r du bulbe calculé à partir de l'équation 2. Pour les anneaux de rayon R = 18 et R = 30mm, on note une diminution de S_r avec le temps d'infiltration. Pour R = 48mm, S_r diminue Cgalement si l'on exclut les premiers instants de l'infiltration.

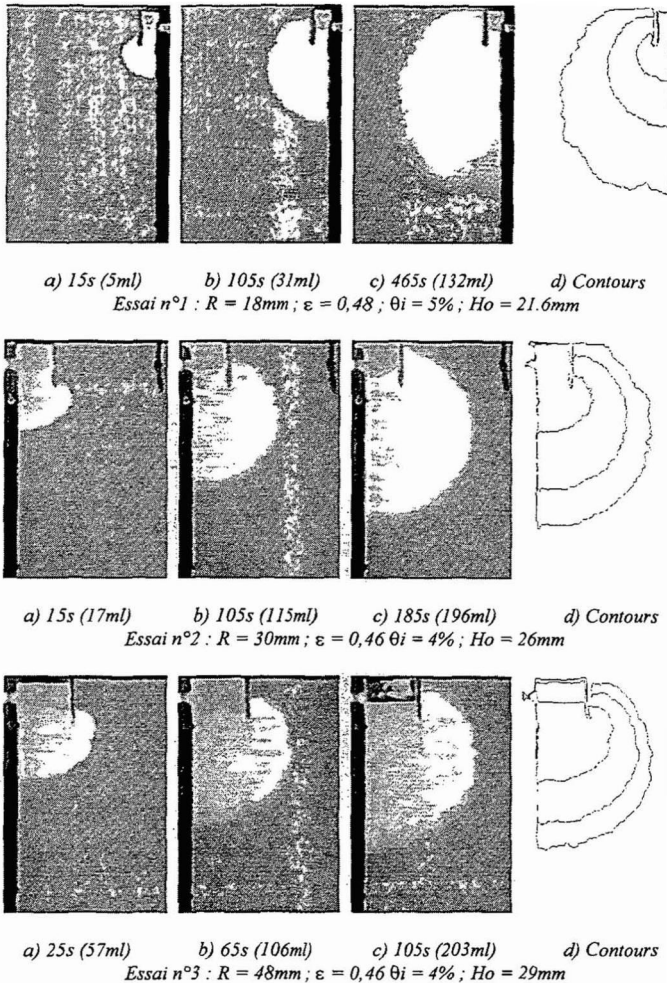


Figure 6. a), b), c) : visualisation de la tâche à deux instants successifs de la phase d'infiltration pour chaque configuration testée. d) : représentation du front d'humectation.

En fin d'alimentation, la valeur de S_r est comprise entre 40 et 65% sur l'ensemble des trois essais. Des coupes réalisées dans le massif en fin d'infiltration lors d'essais préliminaires ont montré que la paroi en Plexiglas n'avait pas d'influence sur l'écoulement et que la diffusion par capillarité au sein du massif s'effectuait de manière homogène [4]. L'état de non saturation du bulbe est donc pleinement vérifié.

Tableau I. Valeurs des volumes injectés V_f en fonction du temps d'infiltration. Estimation des degrés de saturation S_r du bulbe.

Essai n°1 R = 18mm			Essai n°2 R = 30mm			Essai n°3 R = 48mm		
Temps (s)	V_f (ml)	S_r (%)	Temps (s)	V_f (ml)	S_r (%)	Temps (s)	V_f (ml)	S_r (%)
15	5	58	15	17	70			
45	15	54	25	30	67			
105	31	44	45	52	65	45	106	
225	67	41	65	73	61	65	145	76
465	132	40	105	115	56	105	203	67
629	181	40	185	196	56	123	221	

CONCLUSIONS

D'une manière générale, les principaux avantages de cette méthode de visualisation adaptée à la caractérisation des transferts hydriques en milieu poreux non saturé réside d'une part, dans la non intrusivité mais également dans la possibilité d'automatiser le traitement des images. Plus particulièrement, l'utilisation de la technique de visualisation par fluorescence et la mise au point d'une méthode de dpouillement basée sur l'analyse morphologique binaire ont permis de déterminer un nombre important de paramètres nécessaires à la caractérisation de l'infiltration. Toutefois, certaines améliorations peuvent être envisagées dans la détermination des gradients de saturation non visibles en échelle de gris. En effet, si

la **méthode** de **traçage** par technique de fluorescence **permet** dans de nombreuses applications **d'accéder** à la détermination des gradients de concentration de produits fluorescents en milieu transparent par la **mesure** de l'intensité lumineuse remise, **elle même** directement accessible par **une** analyse de l'**image** en échelle de **gris (0-255)**, obtenir cette information dans un milieu triphasique (air, eau, sol), s'avère **être** nettement plus **délicat**. Ainsi, la variation de l'indice de réfraction, les **phénomènes** de **diffusion importants** sont **autant** de **paramètres** pouvant engendrer un chevauchement de niveaux de **gris** correspondant **pourtant** à des **degrés** de saturation **différents** en produits fluorescents [6]. Dans ce cas, la couleur devient un complément d'information **nécessaire** à l'**étude** des **paramètres d'intérêt**.

RÉFÉRENCES

- 1 Perroux K.M. White I. (1988), *Design for disc permeameters*. Soil Sci. Soc. Am. J., 52, 1205-1215.
- 2 Elrik D.E. Reynolds W.D. (1992), *Methods for analysing constant head well permeameter data*. Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 320-323.
- 3 Bouchy M. Andre J.C. (1992), *Processus d'interaction photophysique et photochimique. Ch. 2. Techniques d'utilisation des photons. Principes et applications*. Electra-Dopee, ch. 2.1, 67-95.
- 4 Gandola F. (1998), *Etude des phénomènes d'infiltration par fluorescence*. Actes du Concours jeunes chercheurs de l'A.U.G.C., Avril 1998, Reims, 143-150.
- 5 Coster M. Chermant J.L. (1985), *Précis d'analyse d'image*. Edition du C.N.R.S., 521p.
- 6 Andre J. C. Viriot M. L. (1993), *Photophysique et visualisation en génie des procédés. Visualisation des écoulements des transferts et des structures*. Nancy 1993. Vol. 7, 61-66.