

Technique de fluorescence appliquée à la caractérisation d'une infiltration tridimensionnelle dans un milieu poreux non saturé

F. GANDOLA

École des Mines de Douai,
941, rue Charles-Bourseul,
BP 838, 59508 Douai cedex
LTHE (Laboratoire d'Étude
des Transferts
en Hydrologie et
Environnement),
UMR 5564, CNRS-UJF-
INPG, BP 53,
38041 Grenoble

N.E. ABRIAK

École des Mines de Douai,
941, rue Charles-Bourseul,
BP 838, 59508 Douai cedex

R. HAVERKAMP

CNRS, LTHE,
Laboratoire d'Étude des
Transferts en Hydrologie et
Environnement,
UMR 5564, CNRS-UJF-
INPG, BP 53,
38041 Grenoble

J. TOUMA

ORSTOM,
34170 Montpellier

Résumé

Cette étude présente une méthode expérimentale, non destructive pour la caractérisation d'une infiltration réalisée en condition d'axisymétrie dans un milieu poreux non saturé. On montre 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.

Fluorescence technique used for the characterization of a three dimensional infiltration in unsaturated porous medium

Abstract

This study presents an experimental non-destructive method for the characterization of an infiltration achieved under axisymmetrical condition, in an unsaturated porous medium. It is showned that this method, based on the visualization of phenomena by the use of 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 the determination of the flow parameters.

Introduction

La caractérisation hydrodynamique de la zone non saturée du sol est devenu un préalable incontournable dans la recherche de solutions concernant des problèmes 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. Aussi, le besoin de mieux comprendre les mécanismes de transferts hydriques sur le terrain est-il à l'origine, ces dernières décennies, du développement de nouvelles techniques d'infiltrométrie. Parmi les plus courantes, on distingue les infiltromètres à disques (Clothier et White, 1981 ; Perroux et White, 1988 ; Ankeny *et al.*, 1988) et le perméamètre de Guelph (Elrik et Reynolds, 1992). Cependant, l'étude des phénomènes d'infiltration multidirectionnelle, relatifs à ces appareils de mesure, reste difficile à aborder avec les moyens classiques dont on dispose actuellement (sondes TDR ou neutroniques pour la mesure de la teneur en eau, combinées avec des tensiomètres pour la mesure de la succion). Outre la lourdeur de cet équipement en sondes, la présence de ces dernières dans un volume restreint pourrait perturber significativement l'écoulement. Par ailleurs, les volumes impliqués dans la mesure de la teneur en eau avec les appareils existants actuellement s'avèrent être encore trop importants par rapport à l'échelle d'étude que l'on se fixe (notamment pour les expérimentations en laboratoire), pour pouvoir considérer la mesure comme ponctuelle, même si de récents travaux concernant la mesure de la teneur en eau dans un sable par une méthode électrique (Gandola *et al.*, 1997) laissent envisager la possibilité de déterminer ce paramètre sur de petits volumes de matériaux. L'approche expérimentale en laboratoire proposée est basée sur la visualisation des phénomènes d'infiltration par fluorescence (Bouchy et André 1992 ; André et Viriot, 1993). On présente ici la procédure expérimentale suivie, la technique de

traitement et d'analyse d'images associée et les principaux résultats obtenus.

Matériels et méthodes

Dispositif expérimental

L'infiltration est réalisée à partir d'un demi-anneau (diamètre intérieur : 35 mm) collé contre l'une des parois en Plexiglas d'un bac de dimensions 250 x 300 x 300 mm. L'écoulement est marqué à l'aide de fluorescéine de sodium dissoute dans l'eau (0,5 g/l). Sachant que ce colorant possède un pic d'absorption maximale à la longueur d'onde $\lambda = 490$ nm et un pic d'émission à $\lambda = 515$ nm pour un pH = 7, un filtre bleu (079 just blue (Lee filter)) est utilisé en condition d'éclairage et un filtre orange (102 light Amber (Lee filter)) pour la prise d'image (Fig. 1).

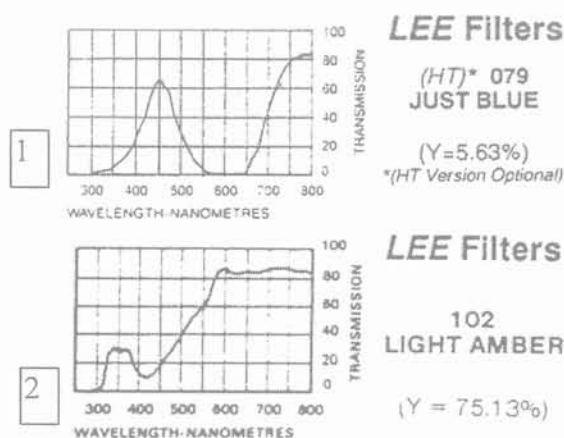


FIG. 1 Spectres de transmission des filtres utilisés.
Transmission spectra of used filters.

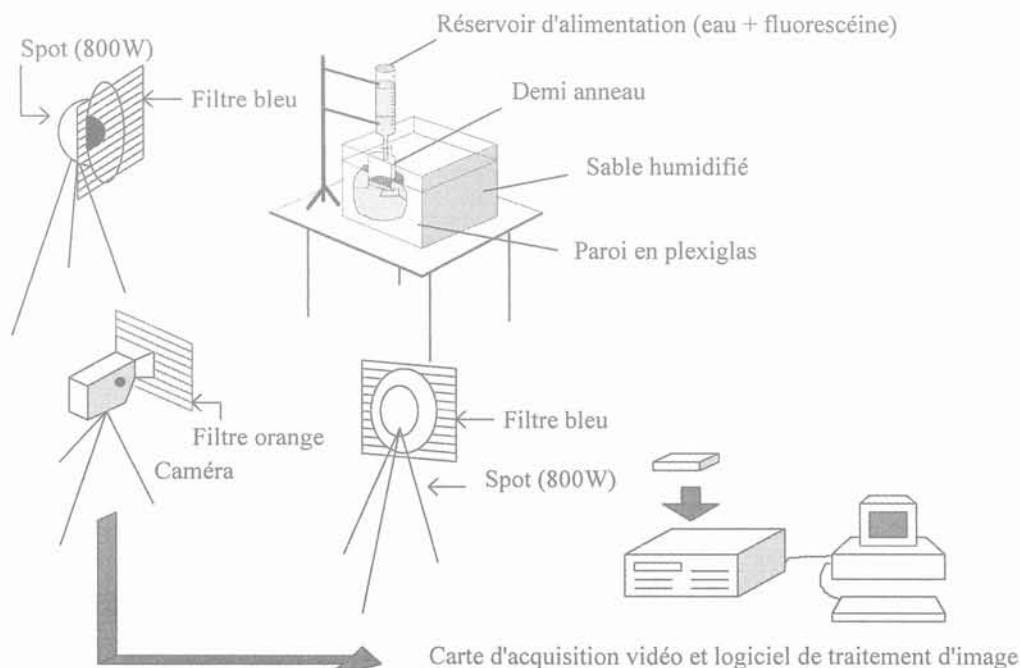


FIG. 2 Dispositif expérimental.
Experimental device.

La charge à l'intérieur de l'anneau est maintenue constante et égale à 1 cm. Le matériau utilisé est du sable de Fontainebleau. L'infiltration est filmée à l'aide d'une caméra Sony CCD-TR2000E-Hi 8. Les images sont ensuite numérisées à partir de la carte d'acquisition vidéo couleur 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 2.

2. 2

Mode opératoire de remplissage

Travaillant avec des volumes de matériaux importants (quelques dizaines de kilogrammes), un protocole expérimental spécifique a été mis au point concernant l'homogénéisation du matériau et le remplissage du bac afin de respecter au mieux l'hypothèse d'axisymétrie faite sur l'écoulement. Le sable initialement séché à l'étuve (à 105 °C) est placé dans un malaxeur vertical à train valseur. Au préalable, d'autres essais ont été réalisés à partir d'un malaxeur vertical à pale centrale unique mais les résultats d'homogénéité se sont avérés peu satisfaisants. Travaillant en condition initiale non saturée, l'ajout de l'eau est ensuite réalisé à l'aide de vaporisateurs manuels pendant la phase de malaxage, dont la durée est fixée à 20 minutes. Le bac est ensuite placé sur table vibrante puis rempli par couches successives (2 kg de matériau), à une fréquence de 40 secondes.

Le profil initial de teneur en eau et la porosité sont déterminés en fin d'essai par carottages ($\phi = 50$ mm) successifs effectués en différents horizons, loin de la zone infiltrée. Les échantillons sont ensuite passés à l'étuve à 105 °C.

2. 3

Technique d'analyse d'image

L'analyse des images réalisées lors des essais d'infiltration est basée sur la morphologie mathématique binaire (Coster et Chermant, 1985) : 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 3×3 . Les différents calculs mis en œuvre dans l'analyse des essais sont réalisés par rapport aux points du contour.

Les coordonnées du centre de gravité G sont données (en pixels) par les relations :

$$X_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (1)$$

$$Y_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (2)$$

La surface S, définie par le contour (pixel x pixel), est obtenue à partir de l'expression :

$$S = \frac{1}{2} \left| \sum_i (Y_i X_{i+1} - Y_{i+1} X_i) \right| \quad (3)$$

L'angle d'orientation ϕ , défini en degré par rapport à l'horizontal et servant à vérifier dans notre étude la symétrie de l'écoulement, est donné par la relation :

$$\phi = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (4)$$

M_{11} , M_{20} , M_{02} , représentent respectivement les moments d'ordre 2 en XY, X et Y :

Cet angle définit en fait l'inclinaison par rapport à l'horizontal de la droite des moments passant par le centre de gravité.

2. 4

Méthode d'estimation des volumes infiltrés

Le calcul des volumes infiltrés à partir de la tâche visualisée repose sur l'application du théorème de Gul-din qui établit, pour un corps possédant un axe de révolution (Fig. 3), une relation entre son volume V et la demi-surface A, définie par l'intersection de ce volume avec un des plans passant par l'axe de révolution. Pour une infiltration réalisée à partir d'un demi-anneau collé contre l'une des parois du bac, la relation s'écrit :

$$V't = \pi X_G A \quad (5)$$

où : V't représente le volume total de la zone infiltrée à un instant donné ;

A, la demi-surface de la tâche visualisée d'axe de révolution Oz ;

et X_G , la distance entre l'axe de révolution et le centre de gravité G' de l'aire A.

La teneur en eau volumique moyenne q du domaine infiltré à un instant donné est définie par la relation :

$$\theta = \frac{V'ei + Vfl}{V't} \quad (6)$$

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

$$Sr = \frac{1}{n} \left(\theta_i + \frac{Vfl}{V't} \right) = \frac{1}{n} \left(\theta_i + \frac{Vfl}{\pi X_G A} \right) \quad (7)$$

où Vfl représente le volume d'eau colorée injecté dans le matériau.

Si l'on suppose que la saturation est atteinte dans la zone infiltrée ($Sr = 1$), le volume injecté Vc, calculé à partir de la tâche visualisée est donné par l'expression :

$$Vc = \pi X_G A (n - \theta_i) \quad (8)$$

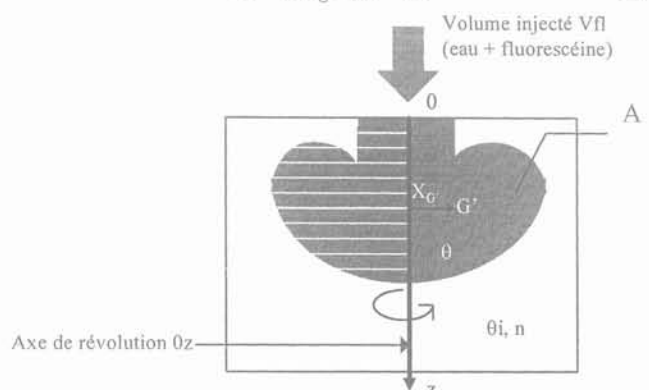


FIG. 3 Paramètres de l'infiltration.
Parameters of infiltration.

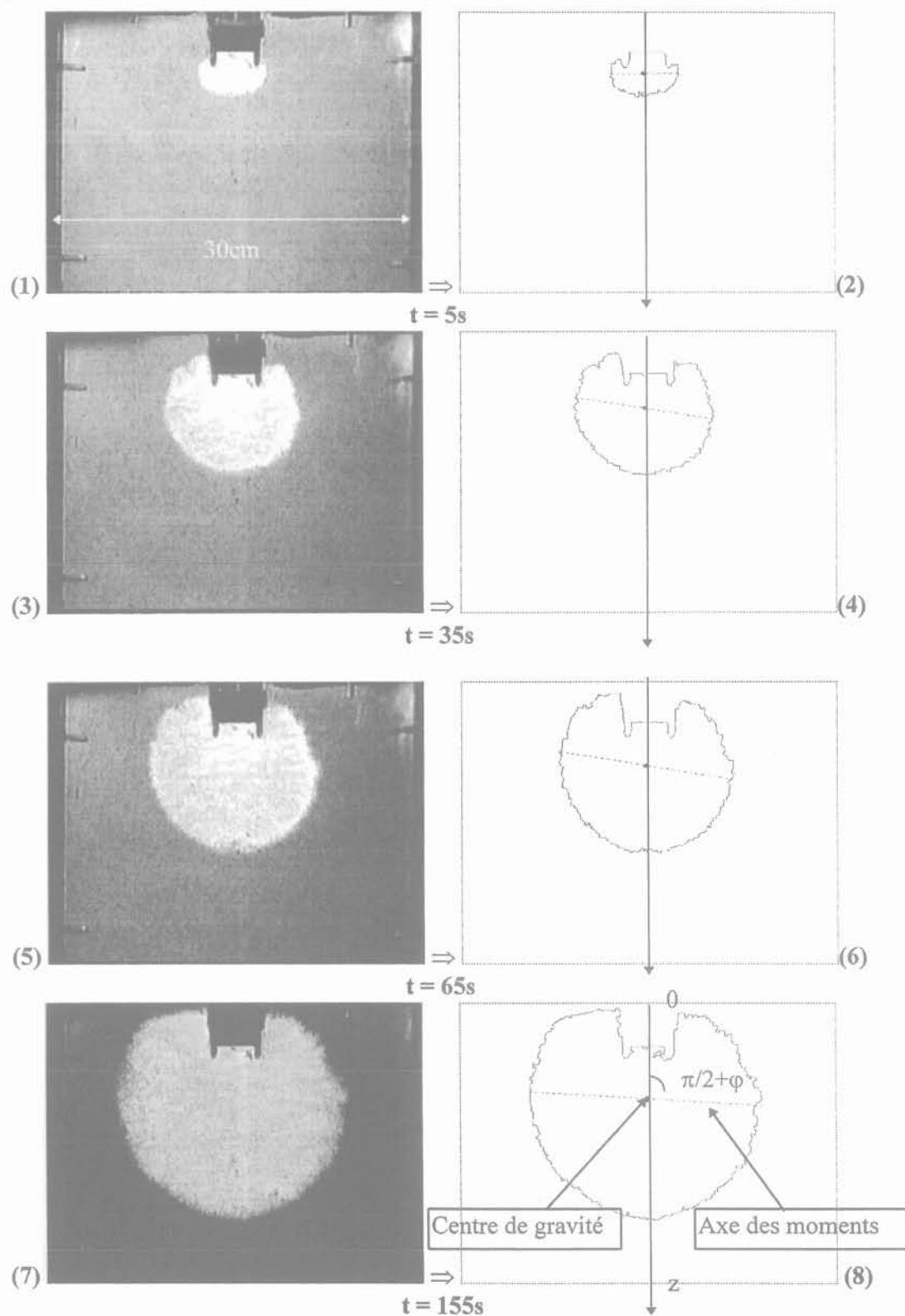


FIG. 4

Essai n° 1. Visualisation de l'infiltration à différents instants. Détermination du contour, du centre de gravité et de la droite des moments de la tâche infiltrée.
Test n° 1. Visualization of the infiltration at different time steps. Determination of the border, the mass center and the moments curve of the infiltrated zone.

Résultats et discussion

3.1

Validation de la condition d'axisymétrie

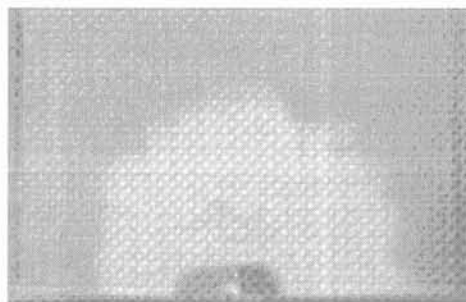
Les images numérisées n° 1, 3, 5 et 7 (Fig. 4) ont été prises à des instants successifs de la phase d'infiltration et n'ont subi qu'un rehaussement de contraste. Il est à noter que l'utilisation simultanée de fluorescéine dans la solution injectée et de filtres au niveau de l'éclairage et de la prise d'image permet de distinguer nettement la zone infiltrée, sans traitement préalable des images. De plus, d'un point de vue qualitatif, on peut déjà remarquer que la tâche visualisée présente une certaine symétrie par rapport à l'axe central vertical de l'anneau et que la diffusion latérale s'avère être très importante dès les premiers instants de la phase d'infiltration.

Concernant la technique de traitement et d'analyse des images, les opérations successives de seuillage, d'ouverture et d'amincissement permettent de déterminer la géométrie du domaine infiltré. Partant de là, il est alors possible de calculer l'aire de la tâche visualisée, de connaître les coordonnées de son centre de gravité ainsi que l'inclinaison de l'axe des moments. Les clichés 2, 4, 6 et 8 de la figure 4 montrent que l'analyse morphologique qui a été choisie pour le dépouillement des essais, donne avec une très grande précision la position du front d'humectation visualisé, et permet de suivre à tout instant son évolution durant la phase d'infiltration. Par ailleurs, la condition d'axisymétrie dans le plan visualisé, est, d'une manière générale, bien vérifiée tout au long de l'essai. En effet, les centres de gravité des surfaces infiltrées à différents instants sont confondus avec l'axe central vertical (Oz) même si l'on constate sur certains clichés une légère inclinaison de l'axe des moments par rapport à ce dernier. Par ailleurs, des coupes en différents horizons ont été réalisées en fin d'essai d'infiltration. On remarque, au vu des clichés 1 et 2 de la figure 5, que la diffusion par capillarité dans le plan de coupe et à la surface du sol s'effectue de manière homogène (propagation du front en demi-cercle) et que la paroi n'a pas d'influence sur l'écoulement. L'hypothèse d'axisymétrie de l'infiltration est donc pleinement validée.

3.2

Cinétiques d'avancée du front d'humectation

Afin de déterminer les cinétiques d'avancée du front d'humectation, les images traitées, sur lesquelles sont représentés les contours, sont superposées (opérateur logique « and » appliqué entre pixels de chaque image), permettant dès lors de mesurer avec précision la distance entre deux positions du front dans une direction donnée (Fig. 6). Les vitesses reportées dans le tableau I et relatives à l'essai n° 1 d'infiltration sont estimées sur l'axe central vertical (Oz) de l'écoulement, en prenant un intervalle de temps Δt égal à 30 secondes. On peut remarquer que les cinétiques atteintes pour cet essai sont de l'ordre du millimètre par seconde et diminuent asymptotiquement avec le temps d'infiltration.



(1). Vue de dessus. $z = 0$



(2). Coupe à $z = 10$ cm

FIG. 5 Visualisation de la diffusion de la tâche en différents horizons.
Visualization of the zone diffusion at different horizontal locations.

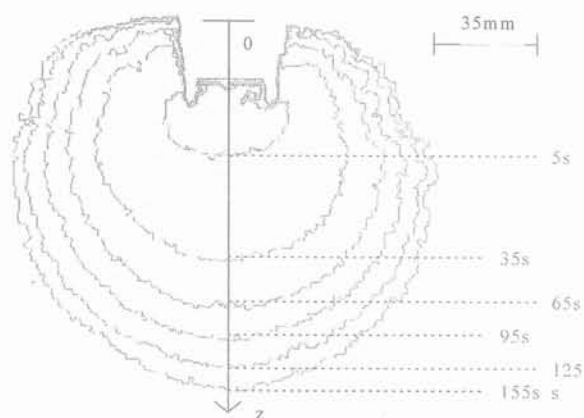


FIG. 6 Essai n° 1. Visualisation de l'évolution du front au cours de l'infiltration.
Test n° 1. Visualization of the evolution of the front during the infiltration phase.

TABLEAU I Détermination des cinétiques d'avancée v du front sur l'axe vertical Oz.
Determination of the kinetics of the front on the vertical axis location Oz.

Δt (s)	Δz (mm)	v (mm/s)	estimée entre
30	41,4	1,38	5 et 35 s
30	17	0,57	35 et 65 s
30	14,4	0,48	65 et 95 s
30	10	0,33	95 et 125 s
30	8,3	0,28	125 et 155 s

Estimation des volumes infiltrés

Le tableau II présente les estimations des volumes infiltrés (eq. 8) ainsi que les valeurs du degré de saturation (eq. 7) du bulbe pour trois essais d'infiltration réalisés dans le même sable, avec des conditions initiales voisines. Les volumes infiltrés V_c calculés à partir des valeurs moyennes de la teneur en eau initiale θ_i et de la porosité n au sein du bac, en supposant le bulbe saturé, sont très largement surestimés par rapport aux volumes réellement injectés V_{fi} , si l'on exclut les premiers instants de l'infiltration. En effet, dans ce dernier cas, le calcul peut être entaché d'une certaine erreur liée notamment aux faibles volumes de mesure mis en jeu. Le degré de saturation S_r du bulbe diminue dans le temps pour atteindre en fin d'infiltration une valeur comprise entre 40 et 55 % sur l'ensemble des trois essais présentés. Les prélèvements d'échantillon en différents horizons ont montré que les écarts respectifs de θ_i et n par rapport aux valeurs moyennes (prises pour les calculs) restaient faibles, ceci validant alors correctement l'hypothèse d'homogénéité des conditions initiales. Aussi, l'axisymétrie de l'écoulement ayant été vérifié précédemment, l'hypothèse de saturation du matériau en amont du front d'infiltration est donc à rejeter.

4

Conclusion

Ainsi, plusieurs points essentiels ressortent de cette étude. D'une manière générale, les principaux avantages de cette méthode de visualisation adaptée à la caractérisation des transferts hydriques en milieu poreux non saturé résident, d'une part, dans la non-intrusivité et, d'autre part, dans la possibilité d'automatiser le traitement et le dépouillement des mesures. Plus particulièrement, l'utilisation de la technique de visualisation par fluorescence et la mise au point d'une méthode de dépouillement basée sur l'analyse morphologique binaire ont permis de déterminer un nombre important de paramètres tels que l'aire de la tâche visualisée, son contour, la position de son centre de gravité, paramètres nécessaires à la caractérisation de l'infiltration. Par ailleurs, le protocole expérimental de remplissage, qui a été mis au point, permet de travailler correctement en condition d'axisymétrie. Toutefois, certaines améliorations peuvent être envisagées dans l'estimation du degré de saturation du domaine infiltré. En fait, pour une surface élémentaire donnée, la concentration moyenne de fluorescéine s'avère être,

TABLEAU II

Calcul des volumes infiltrés V_c avec l'hypothèse de saturation du bulbe visualisé – Estimation du degré de saturation S_r du bulbe à partir du volume V_{fi} réellement injecté.

Calculation of infiltrated volume V_c assuming the saturation state of visualized zone. – Estimation of the degree of saturation S_r of the zone from the real infiltrated volume V_{fi} .

Essai d'infiltration n° 1 : $\theta_i = 6,7$; $n = 0,47$

Temps (s)	V_{fi} (ml)	V_c Saturé (ml)	Écart relatif entre V_{fi} et V_c (%)	θ (cm ³ /cm ³)	S_r (%)
5 s	10	10	4	0,51	109
35 s	42	127	202	0,21	46
65 s	76	245	223	0,20	44
95 s	102	387	280	0,18	39
125 s	142	491	246	0,20	42
155 s	178	632	255	0,19	41

Essai d'infiltration n° 2 : $\theta_i = 7,9$ % ; $n = 0,48$

Temps (s)	V_{fi} (ml)	V_c Saturé (ml)	Écart relatif entre V_{fi} et V_c (%)	θ (cm ³ /cm ³)	S_r (%)
5 s	12	24	97	0,29	61
35 s	54	158	192	0,22	45
65 s	98	290	196	0,22	45
95 s	136	435	220	0,20	43
125 s	170	565	232	0,20	42
145 s	198	648	227	0,20	42

Essai d'infiltration n° 3 : $\theta_i = 5,2$ % ; $n = 0,5$

Temps (s)	V_{fi} (ml)	V_c Saturé (ml)	Écart relatif entre V_{fi} et V_c (%)	θ (cm ³ /cm ³)	S_r (%)
10 s	11	9	-15	0,58	117
45 s	46	83	82	0,30	60
75 s	74	144	95	0,28	57
105 s	102	216	112	0,27	53
135 s	132	273	107	0,27	54
165 s	160	338	111	0,26	53
195 s	188	420	124	0,25	51

d'une part, directement liée au degré de saturation de la zone infiltrée et, d'autre part, proportionnelle à l'intensité réémise qui elle-même, dépend de la loi d'absorption et de réémission de la fluorescéine (loi de Beer Lambert). Ainsi, la mesure du taux de flux lumineux réémis par fluorescence devrait donc permettre de déterminer localement la teneur en eau du milieu considéré.

Bibliographie

- André J.-C., Viriot M.L. – « Photophysique et visualisation en génie des procédés. Visualisation des écoulements des transferts et des structures ». Nancy, vol. 7, p. 61-66, 1993.
- Ankeny M.D., Ahmed M., Kaspar T.C., Horton R. – « Design for an automated tension infiltrometer ». *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, p. 893-896, 1988.
- Bouchy M., André J.-C. – *Processus d'interaction photophysique et photochimique*.

- Ch. 2.1 « Techniques d'utilisation des photons. Principes et applications. » Electra-Dopee, p. 67-95, 1992.
- Clothier B.E., White I. – « Measurement of sorptivity and soil water diffusivity in the field ». *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, p. 241-245, 1981.
- Coster M., Chermant J.-L. – *Précis d'analyse d'image*. Éd. du CNRS, 521 p., 1985.
- Elrik D.E., Reynolds W.D. – « Methods for analysing constant head well permea-

meter data ». *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, p. 320-323, 1992.

Gandola F., Abriak N.E., Haverkamp R. – *Méthode transitoire appliquée à la mesure de la teneur en eau dans un milieu poreux*. Actes du 13^e Congrès français de Mécanique, Poitiers, vol. 2, p. 389-392, septembre 1997.

Perroux K.M., White I. – « Design for disc permeameters. » *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, p. 1205-1215, 1988.