



HAL
open science

Caractérisation des chemins d'écoulements préférentiels dans un sol macroporeux par tomographie d'absorptions des rayons X et traçage coloré.

Anne-Sophie Lissy

► **To cite this version:**

Anne-Sophie Lissy. Caractérisation des chemins d'écoulements préférentiels dans un sol macroporeux par tomographie d'absorptions des rayons X et traçage coloré.. Biodiversité et Ecologie. 2014. hal-02793256

HAL Id: hal-02793256

<https://hal.inrae.fr/hal-02793256>

Submitted on 5 Jun 2020

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.



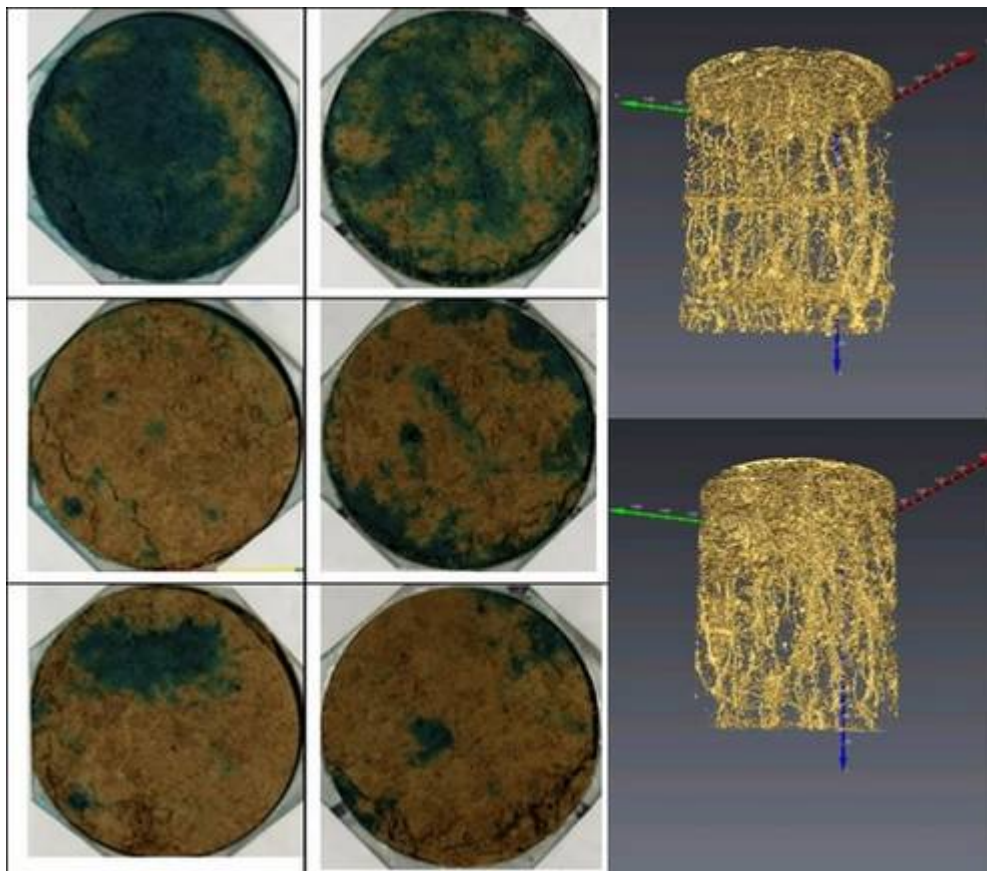
Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Master Sciences de l'Eau et de l'Environnement

**Hydrosystèmes et Bassins Versants :
diagnostic et risque environnemental**

**Rapport de stage de fin d'études pour l'obtention
de la 2nde année de Master**

**Caractérisation des chemins d'écoulements préférentiels dans
un sol macroporeux par tomographie d'absorption des rayons
X et traçage coloré.**



LISSY Anne-Sophie
Avril - Septembre 2014

Année universitaire : 2013 - 2014

Encadrement : Stéphane Sammartino - Sophie Cornu - Romain Van den Bogaert
Organisme d'accueil : INRA PACA - EmmaH Sol (Domaine Saint Paul, 84000 Avignon)

Remerciements

Je souhaiterais remercier Stéphane Sammartino de m'avoir offert la possibilité de faire mon stage de fin d'études au sein de l'UMR 1114 EMMAH Sol de l'INRA d'Avignon (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes) et de m'avoir formée au traitement et à l'analyse d'images. Je souhaiterais également remercier Romain Van den Bogaert et Sophie Cornu (INRA Aix-en-Provence) pour leur présence, leur encadrement durant ce stage et leurs conseils, surtout pendant la rédaction.

Je souhaite remercier le personnel de la plateforme CIRE (INRA - Centre Val de Loire) pour avoir rendu possible cette expérimentation, le bon déroulement de l'imagerie et de la découpe sur place grâce notamment à François Lecompte. Je tenais également à remercier vivement Christina Bogner (Université de Bayreuth) de m'avoir formée à l'utilisation de Halcon 11. Je remercie grandement Franck Tison et Bruno Jouaud pour avoir conçu les plans, et fabriquer les différents matériels nécessaires. Je souhaite remercier l'ensemble du personnel de l'unité EMMAH Sol de l'INRA d'Avignon de m'avoir si bien accueilli durant ces 5 mois. Et enfin, je remercie l'ANR pour son soutien financier dans ce projet.

Sommaire

Introduction	2
Matériels et méthodes	4
I - Colonnes étudiées	4
II – Simulations de pluies	5
III – Traçage au Bleu Brillant	5
A – Faisabilité du traçage Bleu Brillant de différents types d’écoulements d’eau	5
B – Méthodologie du traçage au Bleu Brillant.....	6
C – Analyse d’image pour le traçage Bleu Brillant.....	8
IV - Imagerie tomographie Rayons X	9
A – Principe de la tomographie d'absorption des rayons X	9
B – Acquisition et traitements des images	11
Résultats	14
I - Bilan hydrique des colonnes	14
II - Traçage au Bleu Brillant	15
III - Suivi dynamique par tomographie d'absorption des rayons X.....	18
A - Difficultés expérimentales et prétraitements.....	18
B - Caractérisation de la macroporosité des colonnes L20-1 et L6-4.....	19
C - Caractérisation de l'eau dans le sol	22
Discussion	26
I - Comparaison des deux techniques	26
II - Apport des techniques de traçage à la compréhension du fonctionnement hydrique des colonnes étudiées.....	31
Conclusion	32
Bibliographie	34
Annexes	37
Liste des Figures	41
Liste des Tableaux	42
Liste des Annexes	43
Résumé	44

Introduction

J'ai effectué mon stage dans l'unité EMMAH Sol du département Environnement Agronomie de l'INRA dont les missions principales sont d'étudier le fonctionnement global des écosystèmes cultivés et l'impact de la pression et des perturbations liés aux usages et changements globaux. Ce stage s'inscrit, plus particulièrement, dans le cadre du projet ANR AgriPed (ANR 10 Blanc 605- AgriPed) qui s'intéresse au processus de lessivage des sols et, également dans le cadre de la thèse de Romain Van den Bogaert.

Le sol, interface entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère, évolue en permanence du fait de flux d'eau et de matière (Chadwick et Chorover, 2001). Cette évolution modifie les services éco-systémiques qu'il rend. Ainsi la compréhension des flux d'eau dans le sol constitue un enjeu majeur dans le contexte de changement climatique et de prise en compte plus importante de l'environnement pour la préservation des ressources en sol et en eau (quantité et qualité).

L'eau est en outre un vecteur important de propagation et dissémination des éléments majeurs (nutrition des plantes et altération des minéraux), de pollutions diverses, de colloïdes et particules. Ces colloïdes peuvent, à leur tour, transporter des contaminants non solubles (des pesticides, par exemple) vers la nappe. Comprendre et modéliser le devenir de l'eau dans le sol n'est pas aisé du fait de la complexité des transferts, des hétérogénéités multi-échelles et des processus et mécanismes multiples qui interviennent.

Suivant l'état hydrique initial du sol et l'intensité de la pluie, différents processus peuvent apparaître et modifier l'état hydrique des pores (vides du sol) communément classés selon la taille. D'après Brewer (1964), deux grandes gammes de taille de pores peuvent être identifiées d'après l'état physique de l'eau. Les limites sont globalement (i) *macropores* : $\varnothing > 75 \mu\text{m}$ (jusqu'à $> 5\,000 \mu\text{m}$), (ii) *micropores* : $5 < \varnothing < 30 \mu\text{m}$. La macroporosité, étudiée ici, est la part des vides du sol où l'eau va pouvoir circuler sous l'effet de la gravité. Une partie de la macroporosité, composée d'espaces interagrégats « ouverts », est considérée comme étant d'origine structurale. Elle varie sous l'effet du retrait-gonflement plus ou moins intense des argiles présentes, est sensible au tassement et augmente en présence de particules grossières (sables, graviers) non recouverts de particules plus fines (Girard et al., 2011). La macroporosité est également d'origine biologique par l'action de la macrofaune du sol (principalement des galeries de lombrics en milieu tempéré ou de fourmis et termites en milieu tropical, Gobat et al., 2004) et des racines des plantes (espaces de dessiccation le long des racines, dégradation de la matière organique d'anciennes racines ... Kodesova et al., 2011).

Associé à ces deux types de porosités (macro et microporosité), deux grands types d'écoulements peuvent être identifiés (Bogner et al., 2013) : (i) l'écoulement matriciel, qui consiste en la propagation d'un front d'infiltration et (ii) l'écoulement préférentiel, qui consiste en la propagation de l'infiltration dans certaines zones localisées. Ce deuxième type d'écoulement peut mettre en jeu des phénomènes complexes, dits à surface libre (films épais, ruisselets, intermittence ...), contrôlés par les échanges à l'interface entre la matrice de sol la macroporosité et la morphologie et topologie de celle-ci. Les écoulements préférentiels se développent du fait de la structuration du sol permettant une circulation plus rapide de l'eau dans la partie connectée de la macroporosité.

Ainsi, dans les milieux poreux hétérogènes, comme les sols, l'eau ne va pas s'infiltrer de façon homogène mais plutôt circuler rapidement le long de certains macropores, en

transportant des éléments solubles (nutriments, contaminants et éléments issus de l'altération des phases minérales) et en entraînant des particules du sol. Dans la perspective de changement climatique, avec l'alternance de pluies intenses et de périodes de sécheresses accrues, les transferts d'eau par écoulements préférentiels devraient être prépondérants. Comme le soulignent De Vries et Simmers (2002), entre 50 et 90 % de la recharge en zone semi – aride serait d'origine préférentielle. Enfin l'infiltration de l'eau dans le sol est régie par de nombreux processus complexes dont la compréhension et l'intégration dans un modèle reste une question ouverte. L'eau s'infiltré dans le sol en fonction des propriétés morphologiques et topologiques de la macroporosité et de l'équilibre dynamique du potentiel hydrique, les chemins d'écoulements préférentiels ainsi les modalités d'écoulements ne peuvent pas être modélisés par la loi de Darcy (écoulement dans un milieu poreux isotrope). Il faut donc développer de nouveaux modèles. Par exemple Zavala et al. (2012) ont développé une approche numérique uni-dimensionnelle simulant les flux d'eau dans un sol avec une grande proportion de macropores (d'autres modèles existent). Comme les écoulements macroporeux sont très variables dans le temps et l'espace (Flury et al., 1994 ; Dragila and Weisbrod, 2003) une meilleure compréhension et caractérisation du phénomène d'écoulement dans les sols est nécessaire.

Deux techniques d'imagerie ont été utilisées à ce titre dans la littérature : la tomographie d'absorption de rayons X et le marquage au Bleu Brillant (BB) des voies de passage de l'eau, suivi par la réalisation de coupes sériées et la reconstruction numérique du volume découpé. Le marquage des voies d'infiltration par un colorant est l'approche la plus couramment utilisée. Après infiltration du colorant, le volume de sol étudié est découpé et photographié pour reconstituer les chemins d'écoulements. Cette technique permet d'accéder à une échelle assez fine (de l'ordre de 70 μm dans la coupe et de l'ordre 5 mm entre les coupes). Cependant, elle est destructive et intégrative à l'échelle de l'infiltration. La tomographie d'absorption de rayons X, très répandue maintenant dans le domaine des géosciences, est non destructive et non invasive. Cette technique, ainsi que le traitement et l'analyse d'images conjoints, a été adaptée récemment pour la réalisation de séries d'images 3D résolues dans le temps (Sammartino et al. 2012). Elle permet une acquisition simultanée de la structure et de la dynamique de l'eau d'infiltration dans cette structure et ainsi, contrairement au marquage au Bleu Brillant, le suivi des processus d'infiltration dans le temps et du devenir de l'eau dans les macropores. La résolution des images obtenues est de l'ordre de 400 μm , ainsi une partie de la structure et une partie de l'eau ne sont pas visibles (macropores en dessous de la résolution et films d'eau trop fins, par exemple, Sammartino et al. 2012).

La finalité de ce travail est d'acquérir des informations quantitatives sur les processus d'écoulement préférentiels dans les sols pour les deux techniques sus-citées et de confronter les données issues de ces deux techniques afin, en particulier, de déterminer en quoi elles se complètent. Cette comparaison a permis de déterminer l'existence ou non d'une corrélation entre la distribution spatiale de l'eau dans les macropores et la distribution spatiale du traceur coloré. Ensuite il a été déterminé la différence de détection d'eau par l'imagerie 3D et la quantité de traceur vu autour des macropores.

Matériels et méthodes

Cette partie décrit les caractéristiques des colonnes de sols étudiées dans cette étude. Il est ensuite abordé les protocoles de simulation de pluie, les méthodologies de traçage de l'eau au Bleu Brillant et par tomographie RX et enfin l'analyse des images acquises.

I - Colonnes étudiées

Les quatre colonnes de sol étudiées ont été prélevées dans l'horizon E d'un luvisol, entre 35 et 50 cm de profondeur, au lieu-dit "La Brosse" (commune de Saint-Ouen de la Cour, 61130) par Quénard (2011). Cet horizon est de couleur brun-jaune, avec une texture argilo-limoneuse et une activité biologique importante. Les caractéristiques des colonnes sont récapitulées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des colonnes (d'après la Thèse de Quénard, 2011)

Densité apparente	1,6
Porosité	0,4
Teneur en eau à saturation (cm ³ .cm ⁻³)	0,37

Ces quatre colonnes ont subi une trentaine pluies simulées à deux intensités différentes (Cornu et al., 2014). Des précipitations sont simulées à 20 mm.h⁻¹ (événement orageux) pour les colonnes L20, et des pluies de 6 mm.h⁻¹ (pluie fine d'hiver) pour les colonnes L6 (Tableau 2).

Tableau 2 : Historique des colonnes étudiées (Cornu et al., 2014)

Colonnes	Intensité (mm. h ⁻¹)	Pluie (mm)	Drainage moyen total (mm)	Drainage moyen total (en % de la pluie)	Drainage rapide moyen à 1h30 (en % du drainage)
L20-1	22 ± 3	33 ± 5	13 ± 6	38	18
L20-2	19 ± 4	28 ± 6	22 ± 5	79	7
L6-3	6,7 ± 0,7	33 ± 4	26 ± 6	77	2
L6-4	6,2 ± 1,0	33 ± 5	26 ± 7	83	9

Cornu et al. (2014) ont montré que ces colonnes, issues du même horizon de sol, ont un fonctionnement très dissemblable. Ainsi, les colonnes L6-3 et L20-2 (soumises à deux intensités différentes) ne présentent pas de drainage rapide, i.e. elles ne drainent quasi jamais en bas de colonne pendant la première heure et demie de la simulation de pluie contrairement aux colonnes L6-4 et L20-1 qui percent souvent sur cette durée (Tableau 2). Avant le début de la simulation au traceur coloré sur les colonnes, celles-ci ont subi une à deux pluies de ré-humectation, les colonnes avaient été 10 mois environ sans pluie et conservées hermétiquement fermées en chambre froide.

II – Simulations de pluies

Sur chacune de ces colonnes, une simulation de pluie au Bleu Brillant a été réalisée, à l'aide d'un simulateur de pluie sous forme d'un réservoir comportant une multitude d'aiguilles hypodermique, connecté à une pompe à impulsion. Ce simulateur est étalonné de façon à produire l'intensité voulue. La masse de la colonne est enregistrée en continu à l'aide d'une balance et l'eau drainée est récupérée à l'aide d'un tube placé sous la colonne. La masse d'eau drainée est également suivie et enregistrée en continu (voir dispositif en Annexes 1 et 2). Afin de poursuivre les séquences de pluies reçues précédemment par les colonnes, une pluie de 30 mm est appliquée avec une intensité de 20 mm.h^{-1} et de 6 mm.h^{-1} pour les colonnes L20 et L6 respectivement. Après la fin de la pluie, la colonne reste sur le dispositif jusqu'au drainage complet (ou quasi) de l'eau de la colonne. La surface du sol est labourée avant le début de la pluie afin de casser la croûte de battance créée par la pluie précédente et de permettre l'infiltration. Ce protocole de simulation de pluie a été choisi afin de rester le plus près possible des simulations antérieures (Cornu et al., 2014) réalisées sur ces colonnes. Il est à noter une différence importante de protocole, entre les simulations de pluies précédentes et celle-ci : ici tout le drainage est réalisé sans succion, tandis qu'une succion de 30hPa était appliquée à la base des colonnes par Cornu et al. (2014).

Seules les simulations au Bleu Brillant pour deux des quatre colonnes ont été réalisées dans le scanner, L20-1 et L6-4 qui ont été choisies sur la base de leurs comportements hydriques antécédents. En effet, celles-ci percent le plus souvent pendant la première heure et demie de pluie et avec un temps de drainage plus rapide ce qui permet d'envisager une découpe de la colonne 24 à 48h après la pluie. Les deux autres colonnes font l'objet seulement d'une simulation de pluie au Bleu Brillant (Tableau 3).

Tableau 3 : Récapitulatif des mesures réalisées sur les colonnes.

Colonnes	Intensité (mm.h^{-1})	Suivi	Intervalle d'acquisition pour les colonnes suivies au scanner
L20-1	20	BB - Scanner	5min (30 1ères min) ; 10 min (pendant 1h) ; 15min (2h) + 1 (lendemain)
L20-2	20	BB	-
L6-3	6	BB	-
L6-4	6	BB - Scanner	15 min (pendant 5h) ; 5 min (pendant 1h) + 4 toutes les heures (lendemain)

III – Traçage au Bleu Brillant

A – Faisabilité du traçage Bleu Brillant de différents types d'écoulements d'eau

Le traceur Bleu Brillant (BB, E133 classification européenne), colorant alimentaire, est l'un des traceurs le plus utilisé en science du sol, la formule brute est : $\text{C}_{37}\text{H}_{34}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_9\text{S}_3$, de masse molaire est de $792,9 \text{ g.mol}^{-1}$ (index de couleur 42090). C'est un traceur peu toxique et assez visible (avec une faible absorption par le sol). Il est très stable pour de grandes plages de pH et de force ionique (Persoon et al. 2005b, et Kasteel et al. 2007).

Nobles et al. (2010) a comparé le BB à l'ion Br^- , qui est considéré comme un traceur "parfait" de l'eau de par sa taille moléculaire (18.10^{-11} m), en les appliquant *in situ* dans plusieurs points spécifiques d'une toposéquence. Ils ont constatés que le BB réagit avec certains composants

du sol tel que les ions calcium (Ca^{2+}) et que sa mobilité en est alors diminuée. Weiler et al. (2004) démontrent la faisabilité du traçage des types d'écoulements au BB et défini 5 types d'écoulements, trois représentent des flux d'écoulement à dominante macroporeuse et les deux autres représentent les flux d'écoulement principalement dans la matrice du sol.

B – Méthodologie du traçage au Bleu Brillant

Il n'existe pas de méthode standardisée de traçage au BB. L'application, par différents auteurs, a été faite par simulation de pluie (d'intensité « réaliste ») avec une concentration en BB variant entre 3 et 5 g.L^{-1} (Mooney et al. 2008, Kasteel et al. 2013, Persoon et al. 2005, Flury et al. 1994).

Les images sont réalisées 24 h après la simulation (Mooney et al., 2008). L'étude verticale de la couverture colorée permet de voir la succession des types d'écoulement, alors que l'étude horizontale permet de détailler les interactions entre les macropores et la matrice du sol (Weiler et al. 2004). Par ailleurs, ces auteurs se basent sur une analyse par méthode stéréologique qui suppose l'isotropie de la couverture colorée du sol (i.e. l'analyse d'une coupe unique de sol). Bogner et al. (2013) considérant que les mouvements d'eau dans le sol ont des propriétés d'anisotropie avec des orientations préférentielles verticales et horizontales (écoulement selon la plus grande pente sur une surface plus imperméable), proposent un échantillonnage fait à intervalle régulier et parallèle entre eux. C'est cette dernière option que nous avons retenue. Nous avons opté pour une découpe horizontale à intervalle régulier des colonnes, perpendiculaire au flux d'eau appliqué.

La prise de vue de découpe de sol a été très étudiée par Weiler et al. (2004) et Persoon et al. (2005) qui définissent les recommandations essentielles de réalisation des images : une lumière et une distance objectif - sol constantes et l'utilisation des échelles Kodak (gris et couleur).

Sur la base de ces recommandations générales, nous avons effectué des tests préliminaires de faisabilité afin de déterminer notamment la durée optimale entre la fin du traçage et la découpe.

Les tests ont été réalisés avec une concentration égale à 4 g.L^{-1} (concentration moyenne indiquée dans la littérature) et une pluie de 20 mm.h^{-1} . Les colonnes utilisées pour ces tests sont issues d'un horizon E d'un luvisol prélevé au lieu-dit "La Pilotière" (Ruillé-sur-Loir, 72) et présentent des caractéristiques pédologiques très proches des précédentes (Quénard, 2011).

Afin d'avoir des conditions de prise de vue constantes, l'ensemble découpe-prise de vue a été réalisé dans une salle de type « laboratoire photo » (sans lumière extérieure naturelle). Une table de découpe a été confectionnée de façon à pouvoir maintenir la distance surface du sol - appareil photo constante, l'appareil étant fixé à la table de découpe par un bras (Annexe 3). L'éclairage, aussi constant, est réalisé par 4 spots fixés également à la table. La table de découpe permet de « pousser » le sol hors de l'enveloppe PVC à l'aide d'un cric hydraulique. La remontée de la colonne est mesurée. La colonne de sol, posée sur le cric, est maintenue droite par les supports autour de l'enveloppe PVC. Le plateau de la table est percé et avec un couteau fin et tranchant, la surface du sol est découpée par tranches de 0,5 cm. Pour corriger les distorsions d'images, une mire de calibration est au préalable photographiée avec des variations d'inclinaison dans les directions x, y et z de l'espace au minimum une vingtaine de

fois. Plus le jeu de vues est important, meilleure sera la correction. Sur chaque prise de vue une échelle de gris et de couleur (type Kodak) est positionnée afin de pouvoir corriger des variations de couleurs éventuelles (Figure 1).

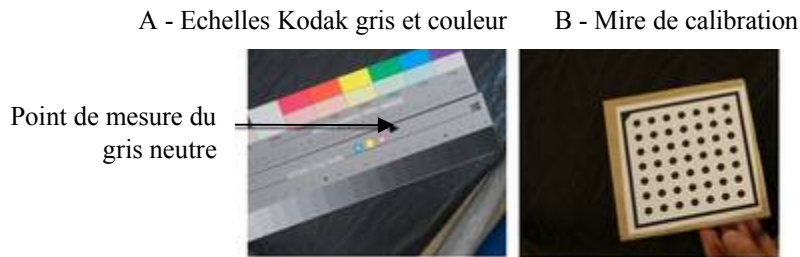


Figure 1 : Echelles de gris et de couleur (A) et mire (B) pour les corrections ultérieures des images. Afin de tester l'impact de la durée entre la simulation et la découpe, une colonne test a été découpée comme suit : une 1^{ère} partie (0-2 cm) 48 h après la fin de la simulation, une 2^{nde} partie (2-8 cm) 72h, et une 3^{ème} partie (8-15 cm) 96 h après la fin de la simulation. La seconde colonne testée est quand a elle découpée 24 h (0-8cm) et 48 h (8-13cm) après la fin de la pluie. La comparaison visuelle des images faites de la dernière surface tout juste découpée et après 20h permet de voir si la diffusion du colorant est importante ou non (Figure 2). Pour limiter le séchage, la surface supérieure est isolée par recouvrement avec une plaque de plastique opaque.

Ces tests préliminaires montrent que les images présentent une différence suffisamment contrastée entre les parties du sol teintées et non teintées, pour ces conditions expérimentales. La découpe de la colonne étalée sur 72 h montre que le colorant est assez stable dans le temps, et que sa diffusion après arrêt de la pluie est assez limitée (Annexe 4). En effet, la comparaison de deux photos de la même surface faite à 20h d'intervalle (Figure 2) montre une progression de l'ordre du millimètre du colorant dans la zone encerclée en orange.

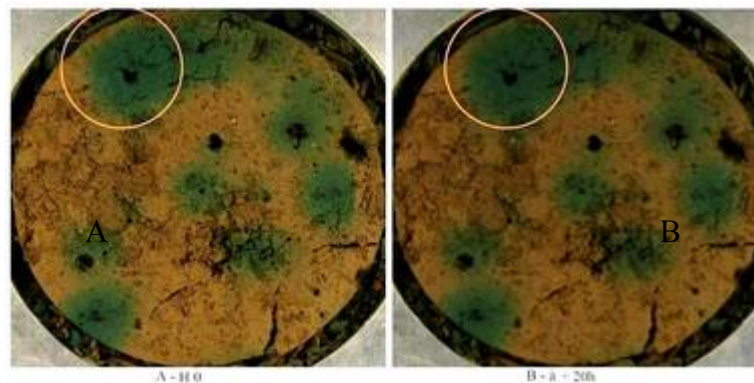


Figure 2 : Photos de la surface à 8cm de profondeur : A - Immédiatement après la découpe ; B - 15h plus tard.

Ainsi le temps d'attente entre la fin de la pluie et la découpe peut être augmenté si besoin (drainage inachevé, par exemple) car la diffusion du traceur est faible après l'arrêt de la pluie. Par contre, il est préférable de maintenir ce temps d'attente constant pour les différentes colonnes.

La colonne L20-1 n'ayant pas drainé totalement 24 h après la simulation de pluie, les deux colonnes (L20-1 et L6-4) ont donc été découpées 48h après la fin de la pluie. La

découpe et les prises de vues des sections se font globalement en une demi-journée. Les spots ne sont allumés qu'au moment de la prise de vue pour éviter tout séchage de la surface.

C – Analyse d'image pour le traçage Bleu Brillant

C-1. Corrections des images et prétraitements

Les photographies sont prises en format RAW, effectuant très peu de traitements préliminaires (i.e. fait à l'enregistrement par l'appareil). Avant toute analyse d'image, il est nécessaire de corriger les photographies des défauts géométriques et de calibrer les couleurs. Ces corrections visent à produire des images exploitables par la suite. Bogner et al. (2014) propose la procédure de correction suivante. Premièrement, il faut étalonner les couleurs de l'image à l'aide de l'échelle Kodak comportant le "gris neutre" (Figure 1). Le logiciel, RawTherapee 4.1.1, permet, à partir de cette couleur, de définir la balance des blancs et d'appliquer une correction/étalonnage des couleurs de l'image. Ensuite, le second prétraitement vise à corriger la distorsion géométrique produite par l'appareil photo (déformation des lignes droites sur l'image). Elle se fait à l'aide du logiciel, Halcon 11® et des photographies de la mire de calibration. Le programme reconnaît la mire, l'oriente (bord interne, ronds noirs, coin tronqué, axes x et y, Figure 3) et calcule la distorsion géométrique sur l'ensemble des photos de calibration. Il génère des paramètres de correction qui permettent de les « redresser » afin que la géométrie de la mire sur l'image soit égale à la géométrie « réelle » (établie lors de l'impression de la mire). Ces paramètres, appliqués ensuite aux photos de sol, permettent de réaliser la correction. A la fin de la procédure, le logiciel quantifie l'erreur faite en pixel. Pour l'ensemble des tests calibration, l'erreur est comprise entre 0,4 et 0,7 pixel.

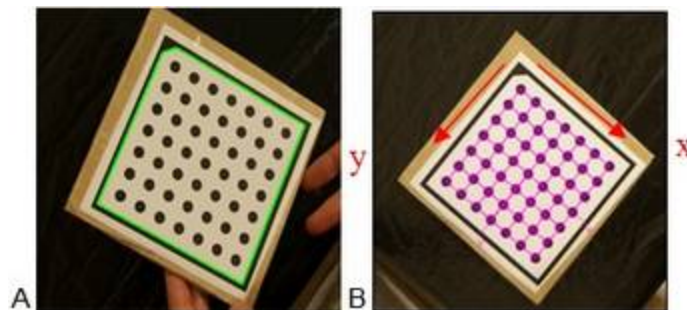


Figure 3 : Mire de calibration, A - Détection de la mire (cadre vert) ; B - Orientation des axes x, y à partir du coin tronqué

C-2. Traitement des images

Afin de déterminer la présence/absence de colorant, ou l'intensité d'imprégnation du sol par celui-ci, plusieurs méthodologies sont proposées dans la littérature.

Weiler et al. (2004) développe une analyse de l'intensité de BB par une méthode de seuillage des niveaux de gris de zones colorées et non colorées. Pour ce faire, ils transforment leurs images RGB (Red Green Blue) dans le repère colorimétrique HSV (Hue, Saturation, Value) pour lequel le bleu et le marron du sol sont bien discriminés. Ils obtiennent ainsi des histogrammes bimodaux pour lesquels ils définissent comme seuil, la valeur minimale séparant les deux maxima de l'histogramme. Il leur est possible d'établir une relation entre H et V et le logarithme de la concentration de colorant.

Forrer et al. (2000) propose une relation entre la couleur des images et une calibration de la concentration en BB dans le sol après extraction de celui-ci dans une solution eau-

acétone et dosage au spectrophotomètre (630 nm longueur d'onde visible) pour des concentrations connues de BB. A partir d'une analyse statistique par régression, ils établissent un modèle prédictif du logarithme de la concentration du colorant par une équation polynomiale de deuxième ordre de la couleur de l'image (avec un ajustement non linéaire par la méthode des moindres carrés). Le modèle prévoit assez bien les valeurs de concentration dans la partie supérieure du sol et pour une large gamme de couleur, mais pour les zones peu ou pas colorées la modélisation est de moindre qualité.

D'autres auteurs, Wang et al. (2009) et Bogner et al. (2013) par exemple, proposent un système d'encodage des images de sol avec le colorant (binarisation), où le sol teinté a pour valeur 1 et le sol non teinté 0. Cette dernière méthode est la plus simple et la plus rapide. Elle permet d'accéder facilement à la présence - absence d'écoulement dans le sol et a été retenue dans cette étude après transformation des images dans le repère HSV comme préconisé par Weiler et al. (2004).

IV - Imagerie tomographie Rayons X

A – Principe de la tomographie d'absorption des rayons X

La tomographie d'absorption des rayons X est une technique d'imagerie 3D, non destructive, non invasive, qui donne accès à la structure interne d'un objet (cartographie de la densité apparente) sous la forme d'un empilement de sections reconstruites. La reconstruction est réalisée par rétroprojection filtrée d'un ensemble de projections de l'objet (ou radiographies) prises sous des angles d'incidences multiples. Une radiographie est une image (2D) obtenue après transmission du flux de photons traversant l'objet. L'atténuation suit deux grands processus d'interactions photons - matières : l'effet photoélectrique (pour des énergies initiales inférieures à 100 keV) et la diffusion Compton¹ (pour des énergies comprises entre 100keV et 1 MeV).

Il existe plusieurs types de tomographes, le scanner médical et les tomographes industriels avec tube à rayons X ou à partir du rayonnement synchrotron. Le scanner médical est, du fait de son mode d'acquisition hélicoïdal, le seul qui permette d'obtenir des acquisitions rapides (temps d'acquisition de quelques secondes à quelques dizaines de secondes) d'images 3D de nos colonnes de sol. Le principe de l'acquisition hélicoïdale est que l'ensemble tube - détecteur tourne à grande vitesse dans un anneau pendant que l'échantillon posé sur la table du scanner traverse cet anneau. Le détecteur enregistre une hélice d'atténuation à partir de laquelle sont interpolées les vues et les sections reconstruites. Pour plus de détails voir par exemple Kalender (2005).

Plusieurs revues ont été publiées sur les applications de l'imagerie par scanner médical à l'étude des milieux poreux artificiels ou naturels notamment, Ketcham et Carlson (2001), Wildenschild et al. (2002), Wildenschild et al. (2013). Leur étude a permis de fournir des recommandations générales sur l'utilisation de cette technique par la comparaison d'images obtenues avec trois appareils (Tableau 4). Ainsi ces techniques permettent d'étudier des objets

¹ Diffusion Compton : nom donné à la collision d'un photon et d'un électron : le photon rebondit sur un électron cible et perd de l'énergie. L'électron est mis en mouvement. L'effet Compton contribue à l'atténuation du rayonnement gamma. (Source : http://www.laradioactivite.com/fr/site/pages/Effet_Compton.htm)

facilement, et assez finement (sans destruction). Le choix de l'appareil doit être motivé par le but de l'étude.

Tableau 4 : Comparatif des différentes techniques d'acquisitions tomographiques.

Type de scanner	Résolution	Taille de l'objet étudié	Temps d'acquisition Mini – moyen	Calibration en densité	Faisceau
Scanner médical	200 µm dans la coupe / > 600 µm entre coupes	Pluri-décimétrique (corps humain)	Quelques s à quelques dizaines de s	Oui Echelle Hounsfield	Faisceau conique épais, polychromatique
Tomographe de laboratoire	dépend de l'objet et du détecteur quelques µm si cm ³	Très variable généralement centimétrique à décimétrique	20 mn à plusieurs heures	Non	Faisceau conique polychromatique
Tomographe sur rayonnement synchrotron	dépend de l'objet et du détecteur µm si mm ³	Très variable généralement millimétrique à centimétrique	20 mn à plusieurs heures (difficile d'accès à l'appareil)	non	Faisceau de rayons parallèles monochromatiques

La comparaison des caractéristiques des différents appareils de tomographie des rayons X, indique que le scanner médical est l'appareil le plus adapté à l'étude de la dynamique d'infiltration de l'eau dans des colonnes de sol, du fait des temps d'acquisition très courts avec une résolution spatiale adaptée à la grosse macroporosité. Mais également du fait de sa calibration en densité par rapport à l'échelle Hounsfield [1] et de sa grande reproductibilité indispensable dans le domaine médical :

$$D_{HU} = (\mu - \mu_w) / (\mu_w - \mu_{air}) * - 1000 \quad (HU = \text{Unité Hounsfield}) \quad [1]$$

Les propriétés des scanners médicaux évoluent avec le nombre de rangées de détecteurs qui ne cessent d'augmenter et qui permet de réaliser plusieurs coupes simultanément. Hu (1998) a montré qu'un scanner à 4 rangées de détecteurs fournit des images équivalentes mais dans un temps d'acquisition deux à trois fois plus rapide qu'un scanner avec une seule rangée de détecteurs. Cela signifie que plus le nombre de détecteurs est grand, plus la durée d'acquisition de l'image est rapide sans pour autant perdre en qualité d'image.

Sammartino et al. (2012) ont utilisé le scanner médical 4 coupes afin d'imager les transferts d'eau dans des colonnes de sol subissant des simulations de pluies (intensités de 12 et 22 mm.h⁻¹ avec au total 30 mm) et une durée d'acquisition de 100 s environ par volume.

Ils ont procédé à des soustractions d'images entre l'image référence (à t₀ avant la pluie) et l'image faite à un temps t (pendant la pluie). Sur les images soustraites, lorsque le voxel² contient de l'eau d'infiltration ou mobile, alors la densité Hounsfield est égale à 1000, et si le voxel contient de l'air (l'eau remplacé par l'air) alors la densité Hounsfield est égale à -1000. Le contraste net entre la valeur de gris de l'eau, de l'air et de la matrice de sol permet, par des seuillages adaptés, d'extraire des images de la macroporosité, et de l'eau arrivant au cours du temps et procéder ensuite à des visualisations 3D. Cette étude de la macroporosité par suivi au scanner médical dans le temps, montre que cette méthode est fiable et permet de visualiser la répartition de l'eau entre les macropores, la macroporosité diffuse (i.e. macropores + macroporosité dont la taille est inférieure à la résolution) et la matrice de sol. Pour un régime

² voxel : volume élémentaire de l'image 3D (comme le pixel "Picture x element" pour les images 2D)

quasi stationnaire, l'eau est retrouvée à hauteur de 55%, 36% et 9% respectivement dans les trois "compartiments" (macropores, macroporosité, et matrice du sol).

B – Acquisition et traitements des images

Le scanner médical utilisé est celui de l'INRA Val de Loire (37, Siemens). Les caractéristiques techniques des acquisitions réalisées sont : une tension d'accélération de 140 kV ; intensité du courant de 500 mA ; un champ de vue 170 mm qui conduit à une résolution spatiale dans la coupe de 332 μm (taille du voxel) ; un pitch³ de 0,35 qui permet d'améliorer la qualité des images par recouvrement. La durée des acquisitions pour ce réglage est de 15 s environ. Lors de chaque simulation de pluie au scanner, une première image complète de la colonne est faite avant afin d'avoir une référence hydrique et structurale (t_0) ensuite des images sont faites à différents intervalles de temps pendant la pluie et les phases de drainage et de ressuyage de la colonne. Une fois les images 3D acquises, la partie concernant leur traitement est relativement longue et suit 3 grandes étapes suivantes :

- Mise en forme des données

L'imagerie par scanner médical produit des coupes sériées verticales de l'objet étudié, il est nécessaire dans un premier temps de les transformer en coupe horizontales de section circulaire constante (Figure 4).

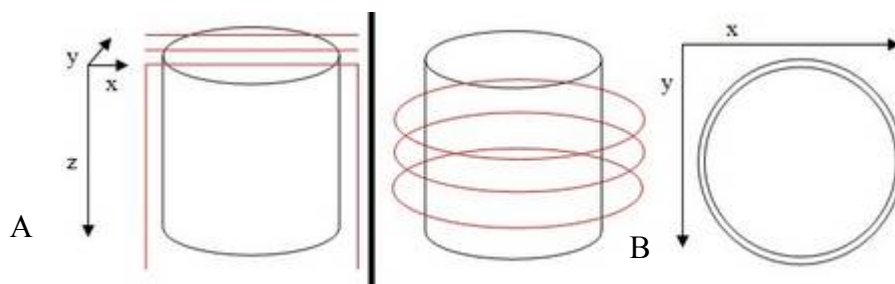


Figure 4 : A - Plans de coupe (en rouge) obtenus au scanner ; B - Section constante obtenue après reconstruction.

Ce prétraitement est fait sur le logiciel libre ImageJ ®. Certaines images présentant un décalage selon les trois axes x, y, z, une procédure de recalage a été appliquée. En effet, la pluie créant une flaque en surface augmente la masse de la colonne. Cette dernière étant posée sur deux balances, il résulte un décalage en fonction de l'axe z. Cette procédure de recalage a pour principe de soustraire l'ensemble des images du volume acquis au temps t et celles du volume de référence (à chaque coupe), puis de trouver les meilleurs paramètres x, y et z à appliquer afin que l'évolution du minimum de la variance permettent que les images correspondent au mieux. Les images sont ensuite découpées selon deux ROIs (*Region Of Interest*). Tout d'abord en éliminant le PVC de la colonne mais en conservant les 512 coupes (dont la flaque formée en surface, Figure 5-A). La seconde reprend le même diamètre mais, ôte la partie supérieure et inférieure (suppression de la flaque en surface et du PVC de bas de colonne, voir Figure 5-B). Les images prétraitées sont ensuite seuillées pour extraire d'une part des caractéristiques de la macroporosité sur l'image de référence et d'autre part la présence d'eau ou d'air dans cette macroporosité à chaque temps t acquis.

³ pitch : rapport entre le pas de l'hélice (distance parcourue par la table pendant une rotation de 360° du tube) et l'orientation du faisceau de RX. (Solacroup et al. 2001)

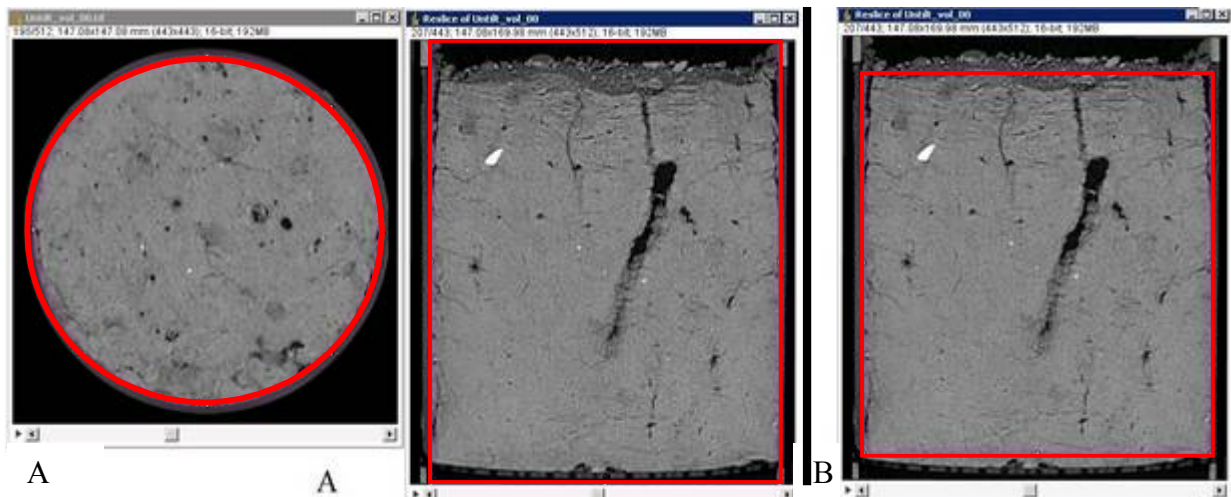


Figure 5 : A - ROI 1 (plans x,y et x,z) et B : ROI 2 (plan x,y idem, x,z)

- Seuillage de la macroporosité

L'histogramme de fréquence permet de discriminer l'air libre (à une valeur de -1000 UH), l'eau libre (à une valeur de 0 UH) et la matrice de sol à sa teneur en eau (à une valeur de +1000 UH ; Figure 6-A). Ainsi, la valeur seuil des macropores remplis d'eau ont une valeur de 0 et ceux remplis par l'air une valeur de -1000. La Figure 6-A montre une distribution continue des intensités Hounsfield (UH) entre la matrice de sol à +1000UH et les pôles eau et air. La Figure 6-B montre un histogramme réel obtenu pour la colonne L6-4. Sammartino et al. (2012) interprète cette distribution comme la contribution plus ou moins importante de porosité remplie d'eau ou d'air à cette matrice de sol. De plus, ils supposent qu'un voxel est composé, en volume, à 50% de matrice de sol (+1000 UH) et 50% d'eau ou d'air (0UH ou -1000UH) ce qui permet de définir un seuil dit de macroporosité diffuse égal à la moitié du pic de la matrice de sol. Dans ce travail, nous avons considéré comme faisant partie de la macroporosité, la somme des macropores plus ces voxels composés de 50% d'air (ou eau) ce qui permet de seuiller une partie plus importante de la macroporosité, qui est inférieure à la résolution.

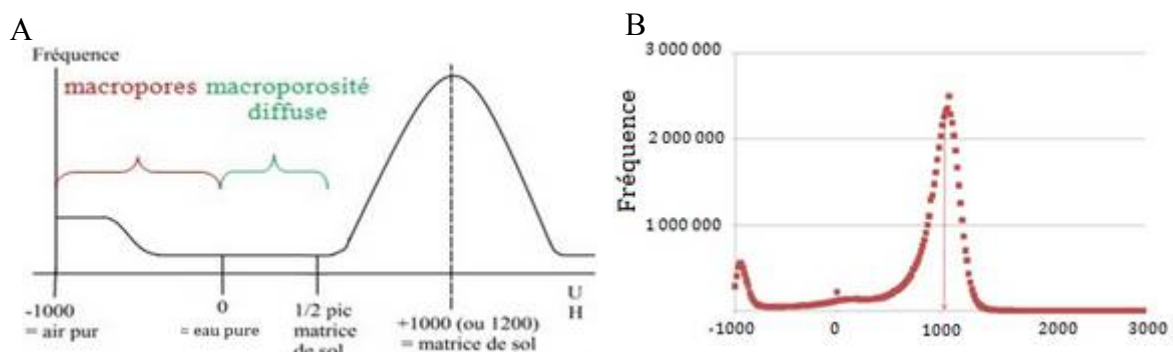


Figure 6 : A - Schéma histogramme des niveaux de gris du sol, B - Histogramme "réel" d'une acquisition de la colonne L6-4.

La structure de la macroporosité peut être caractérisée à l'aide d'un certain nombre d'indicateurs. Nous avons choisi d'utiliser des indicateurs simples définis sur les coupes horizontales : le nombre d'objets macropores, l'aire moyenne de l'ensemble des macropores de chaque coupe et deux indicateurs de forme, la circularité moyenne (par coupe) et le diamètre

de Feret moyen (par coupe). La circularité est rapport entre le périmètre et l'aire de chaque macropore. L'indice de circularité est compris entre 0 et 1, plus il est proche de 1, plus le macropore considéré a une forme proche du cercle. Le diamètre de Feret est un paramètre de taille. Il mesure l'étendue dans une direction donnée. Par coupe, il est équivalent à l'ouverture maximum de la section du macropore interceptée par la coupe. L'indice de Feret n'a pas de borne, mais plus celui-ci est élevé, plus la taille, en terme de diamètre apparent du macropore considéré est importante.

- *Seuillage des mouvements d'eau*

Une fois les images seuillées, la soustraction entre les volumes acquis au temps t de la pluie et le volume t_0 (référence) permet de visualiser les variations de la présence d'eau et d'air dans la macroporosité. La couleur blanche représente l'eau et le noir l'air sur la Figure 7-A. L'histogramme de distribution des valeurs de gris (en UH, Figure 7-B) de l'ensemble des volumes soustraits d'une même colonne permettent de déterminer les seuils inférieurs et supérieurs des voxels dit "eau" et "air". Les voxels avec pour valeur -1000 UH sont ceux ne contenant que de l'air (et qui ne contenaient que de l'eau à t_0). Les voxels avec pour valeur $+1000$ UH sont ceux contenant de l'eau (et qui ne contenaient que de l'air à t_0 , Figure 7-B). Ces deux valeurs de références permettent de centrer deux couples de seuils pour le seuillage des mouvements d'air et d'eau dans les colonnes à chaque pas de temps (volume t_i - volume t_0 , Sammartino et al. 2012).

En intégrant l'information de la localisation de l'eau extraite à chaque temps d'acquisition, nous pouvons construire un volume dit "somme eau", ce volume est analogue à l'approche de marquage au colorant. Il intègre, de plus, la fréquence de passage de l'eau dans un voxel durant l'expérience, ainsi sur la Figure 8, le bleu foncé indique les voxels où l'eau a le plus été détectée. Ceci nous permet d'accéder à une information supplémentaire, à savoir les voies de passage très préférentiellement empruntées par l'eau durant la durée de la pluie.

Il a été possible d'intégrer les 34 acquisitions faites de la colonne L6-4, et seulement 13 (sur 22 volumes acquis) pour la colonne L20-1.

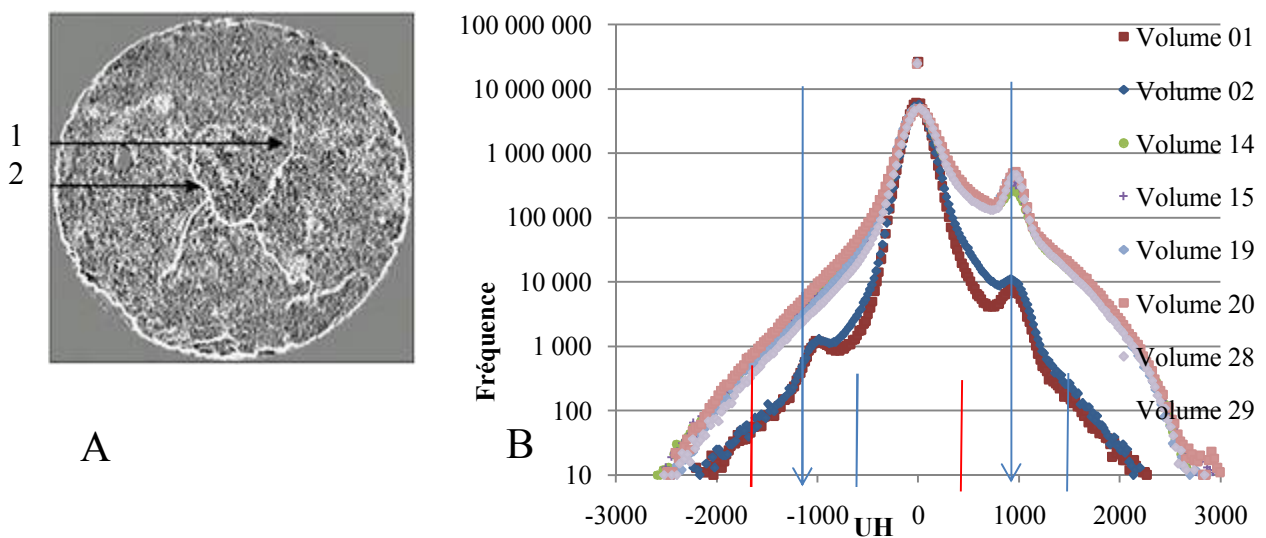


Figure 7 : A - Image de la soustraction entre un volume t et le volume t_0 (avec 1 = noir et 2 = blanc) ; B - Distribution des valeurs de gris (Unité Hounsfield) pendant le test d'infiltration.

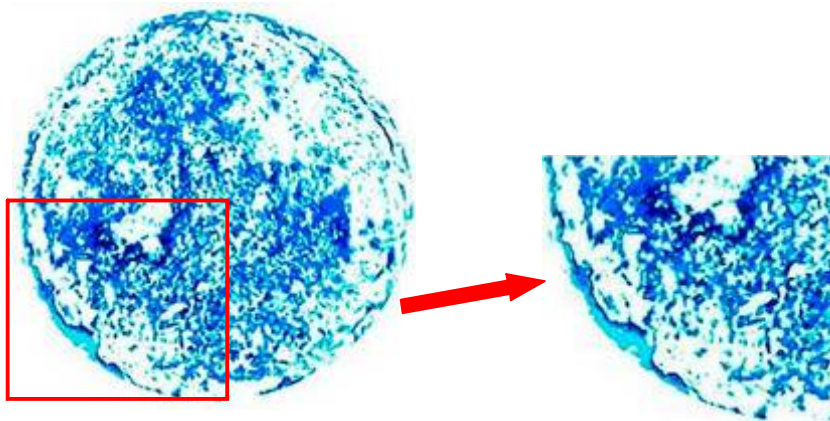


Figure 8 : A - Illustration du volume « somme eau » ; B - Zoom du volume « somme eau ».

Résultats

Des caractéristiques géométriques sont obtenues sur la macroporosité seuillée, sur l'eau cumulée (à partir du volume « somme eau ») et sur la distribution spatiale du BB. Ces caractéristiques sont soit globales (moyennes par coupe sur le volume), ou soit présentées sous la forme de profils sur la hauteur des colonnes : nombre d'objets, volume, surface, circularité et nombre de Feret. Ces données sont extraites soit du logiciel libre ImageJ soit avec le logiciel Avizo Fire 8.0®. Pour compléter ce travail, des représentations 3D de la répartition spatiale de l'eau seuillée et de la macroporosité sont également fournies

Dans une première partie, les bilans hydriques des colonnes à l'issue des simulations sont présentés, puis les résultats obtenus par le traçage au Bleu Brillant et le suivi dynamique par scanner médical.

I - Bilan hydrique des colonnes

Les bilans hydriques sont résumés dans le tableau 5. Au début de l'expérimentation (zéro pluie) les colonnes avaient une humidité volumique proche de $0,3 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Cette humidité correspond à un potentiel d'environ -100 hPa d'après la courbe de potentiel hydrique (pF) - teneur en eau déterminée pour ces colonnes par Quénard (2011). Lors des simulations précédentes, les pluies étaient déclenchées, à l'exception de la première, pour un pF de -300hPa à 5 cm de profondeur, pF mesuré par un capteur. Dans la réalité, Quénard (2011) montre que les pF enregistrés au début des simulations sont assez variables. La valeur moyenne pour les colonnes à $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ étant de -400 (± 117 hPa), et de -325 (± 143 hPa) pour les colonnes à $6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. Les simulations de pluie réalisées ici ont néanmoins eu lieu pour des teneurs en eau des colonnes en début de pluie supérieures aux valeurs relevées pour la 1^{ère} pluie de Quénard (2011). Cependant Quénard (2011) mentionne qu'une variation de 100 hPa n'a pas de signification sur le plan physique, on peut considérer que, mise à part la première pluie, les expériences sont réalisées dans le même état hydrique moyen.

Les quantités d'eau apportées sont de 30 mm à l'exception de la colonne L20-1 qui n'avait pas drainée complètement 20 heures après la pluie et pour laquelle le reste de la flaque a été supprimée de façon à pouvoir faire le découpage de la colonne dans un laps de temps comparable aux autres. Les drainages obtenus sont dans les fourchettes obtenues pour les autres pluies par Cornu et al. (2014, Tableau 2). Le drainage des colonnes L20-1 et L6-3 est dans la fourchette haute comparé aux pluies précédentes, contrairement aux colonnes L20-2 et L6-4 qui ont un drainage plus faible (partie basse de la fourchette).

A la fin de la simulation, l'humidité volumique est proche de la teneur en eau à saturation, l'eau remplit donc la quasi-totalité de la porosité qui avait été libérée pendant la phase de séchage contrôlée.

Tableau 5 : Bilan hydrique des colonnes pluie n°34

	L20-1	L20-2	L6-4	L6-3
Densité apparente (g.cm ⁻³)	1,62	1,64	1,65	1,65
Intensité de pluie réelle (mm.h ⁻¹)	17	20,2	5,7	6,3
Quantité d'eau apportée (mm)	25	30	28	31
Drainage (mm)	21	17	21	29
Pourcentage d'eau drainée	84	57	81	94
Humidité volumique initiale (cm ³ .cm ⁻³)	0,32	0,34	0,30	0,31
Humidité volumique finale (cm ³ .cm ⁻³)	0,39	0,39	0,37	0,38
Temps de percée (min)	213	70	150	80

II - Traçage au Bleu Brillant

La Figure 9 présente des photographies de sol après traçage au BB et découpe pour différentes profondeurs. La Figure 10 présente le pourcentage de la surface teintée selon la profondeur. Globalement ces deux figures montrent qu'entre 0 et 2,5 cm de profondeur, les coupes montrent une coloration quasi totale de la matrice de sol (entre 60 et 100% de couverture colorée selon les colonnes). A partir de 2,5 cm de profondeur, la couverture en BB diminue nettement. De 2,5 à 4 cm les pourcentages de surface colorée passent de 75 à 90% (exception faite de la colonne L20-2, plus faible encore), à 30 à 50% à 4 cm pour les colonnes L6 et de 10 à 20% pour les colonnes L20. Au delà de 4 cm, seules quelques voies de passage sont marquées au BB. L'écoulement devient donc très localisé (préférentiel) quelque soit les colonnes. Leur marquage est cependant différent entre les colonnes à 6 et 20 mm.h⁻¹, à partir de 4 cm de profondeur.

Les colonnes L6 montrent des voies de passage intensément teintées (bleutées) et étendues, alors que les colonnes L20 montrent plutôt des voies de passages ponctuelles où l'intensité de la coloration est moindre (vert). Entre 4 et 14 cm de profondeur, le pourcentage de surface colorée des colonnes L6 est significativement supérieure (environ 20%) comparées aux colonnes L20 (entre 5 et 10%).

Sur les images de la colonne L20-1, des zones de grandes surfaces et très colorées sont visibles à 8 cm et à 12 cm. L'évolution du pourcentage de surface colorée de la colonne L20-1 est marquée par la présence de deux pics : le 1^{er} est situé vers 8 cm, et le 2nd à 12 cm. Ces deux pics correspondent à des zones interprétées comme des "magasins de nappe" (i.e. zone de stockage de l'eau). A 2 cm de profondeur, l'écoulement, dans la colonne L20-2, se fait préférentiellement au niveau de la limite sol - PVC contrairement aux trois autres colonnes. Il est à noter la présence de macropores non marqués par le colorant (exemple cercle à 8 cm, Figure 9). Ceci peut s'expliquer comme des pores non fonctionnels qui ne sont pas connectés au reste de la porosité.

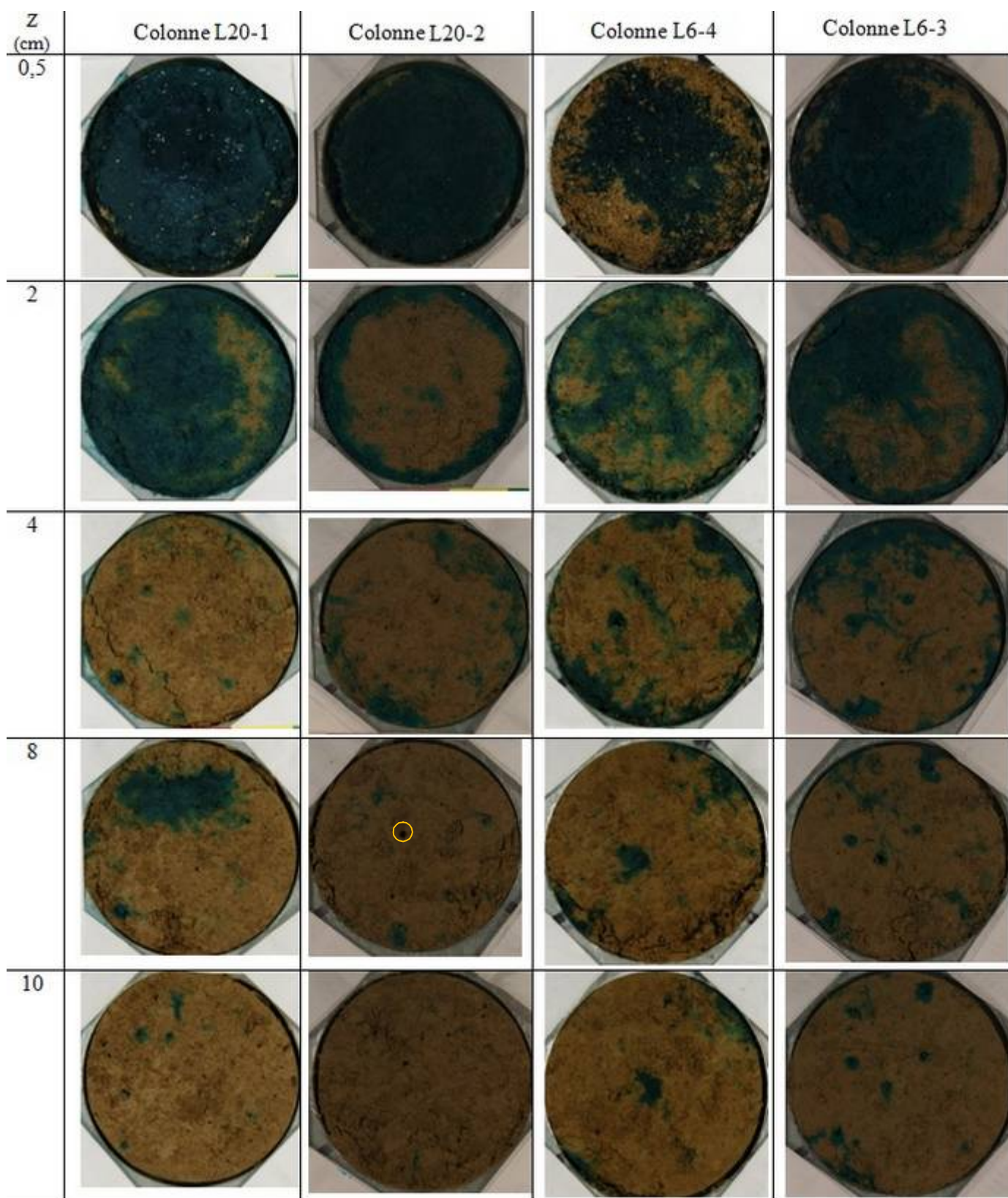


Figure 9 : Photographies de la surface du sol découpée selon la profondeur.

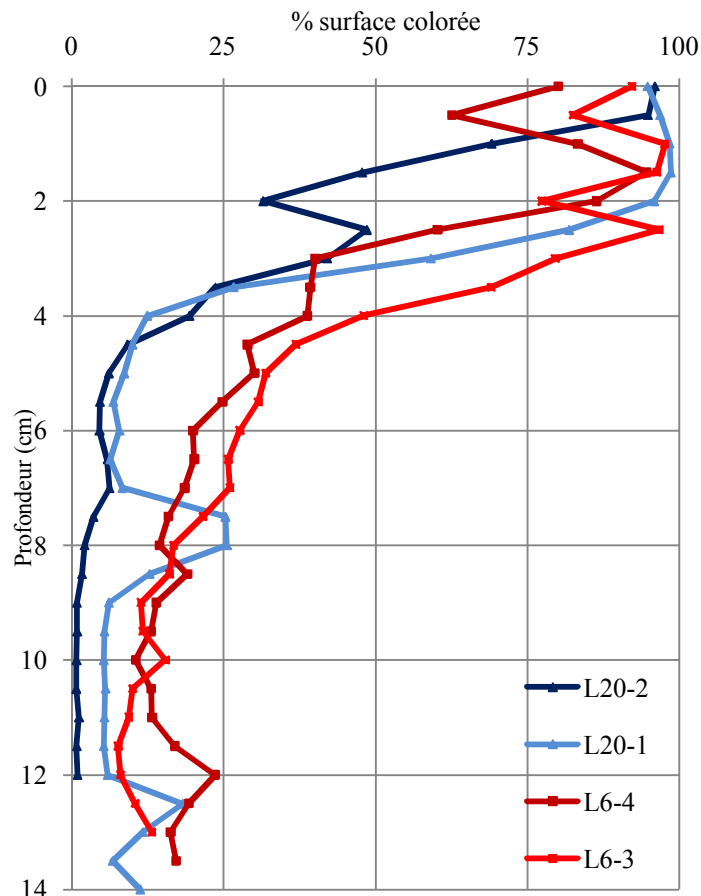


Figure 10 : Evolution de la surface colorée (%) selon la profondeur pour les colonnes L20-1, L20-2, L6-3, L6-4.

Les surfaces teintées mesurées tous les 0,5 cm, ont été intégrées sur toute la hauteur de la colonne, afin d'en estimer un volume teinté, par une intégration linéaire basée sur la somme des aires du trapèze définies entre deux coupes successives. Les volumes teintés sont exprimés en cm^3 et % (Tableau 6).

Tableau 6 : Résultats des volumes teintés pour les 4 colonnes

Colonnes	L20-1	L20-2	L6-4	L6-3
Profondeur maximale de photos (cm)	14	12	13,5	13
Volume colonne analysé (cm^3)	1945	1667	1875	1806
Volume teinté (cm^3)	568	330	623	713
Volume teinté (%)	29	19	33	39

Les profondeurs maximales atteintes par la découpe différant entre colonnes, seuls les pourcentages teintés sont comparables. Les colonnes à 6 mm.h^{-1} (L6-3 et L6-4) présentent un volume total teinté plus élevé que les colonnes à 20 mm.h^{-1} (L20-1 et L20-2). Ces différences sont significatives d'après un test ANOVA (test de comparaison de moyenne Fisher au seuil de 5%) réalisé sans prendre en compte les magasins de nappe de la colonne L20-1 (Tableau 7). Par contre, la différence de volume teinté entre les deux colonnes de même intensité n'est pas significative.

Tableau 7 : ANOVA sur les surfaces teintées au-dessous de 4cm de profondeur et excluant les magasins de nappe (test Fisher à 5% de confiance)

Colonnes	Moyenne des surfaces (cm ²)	Moyenne des pourcentages	Groupe
L20-1	10,64	7,66	A
L20-2	5,70	4,10	A
L6-3	27,79	19,99	B
L6-4	26,73	19,23	B

Au vue de la différence de coloration sur les photographies (Figure 9) et de la diminution importante des surfaces colorées entre 2,5 et 4 cm (Figure 10), deux volumes fonctionnels ont été définis avec une limite établie entre 3,5 et 4 cm de profondeur. Le pourcentage coloré dans chacun des deux sous-volumes (entre 0 - 3,5 cm et entre 4 - 14 cm) a été calculé (Tableau 8).

Tableau 8 : Pourcentage moyen des surfaces colorées des sous-volumes fonctionnels

	L20-1	L20-2	L6-3	L6-4
% sous-volume « foisonnement » (0-3,5cm)	82	57	86	68
% sous-volume « non perturbé » (4-14 cm)	10	4	20	19

En surface, zone de « foisonnement » (0 - 3,5 cm), les 4 colonnes sont teintées entre 70 et 86% sans différence notable entre les 2 intensités de pluie. Par contre, les colonnes L20 sont peu teintées (10% et 4%) en profondeur, zone « non perturbé », comparées aux colonnes L6. Les 2 colonnes L6 présentent un pourcentage de coloration quasi égal en profondeur (20%). La colonne L20-2 présente une proportion colorée très inférieure à l'ensemble des colonnes et notamment L20-1. Les colonnes L6 semblent donc avoir un écoulement macroporeux « moins préférentiel » que les colonnes L20.

III - Suivi dynamique par tomographie d'absorption des rayons X

A - Difficultés expérimentales et prétraitements

Seules les colonnes L20-1 et L6-4 ont fait l'objet d'un passage au scanner. La figure 11 présente la chronologie des acquisitions réalisées lors des simulations de pluie au scanner pour ces deux colonnes. Les prétraitements ont été faits sur l'ensemble des volumes acquis. Cependant, lors de la pluie sur la colonne L20-1, une fuite a eu lieu sur la colonne nécessitant une intervention et la colonne a été déplacée dans le scanner après 92 minutes. Malgré plusieurs procédures automatiques de recalage, puis des recalages manuels, les images acquises après cette intervention présentent toujours un décalage et ne sont pas utilisables à l'heure actuelle.

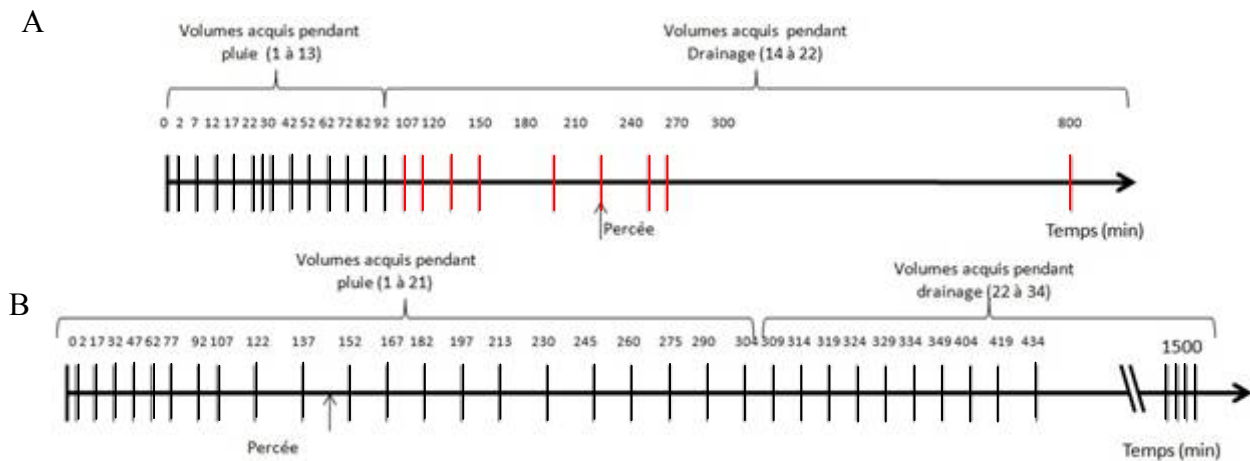


Figure 11 : Chronologie des acquisitions en tomographie RX. A - Colonne L20-1 et B - L6-4 (rouge = acquisition non exploitable)

B - Caractérisation de la macroporosité des colonnes L20-1 et L6-4

Une fois la macroporosité seuillée, les images binaires sont affichées en rendu surfacique 3D. Trois angles d'incidences sont présentés sur la Figure 12.

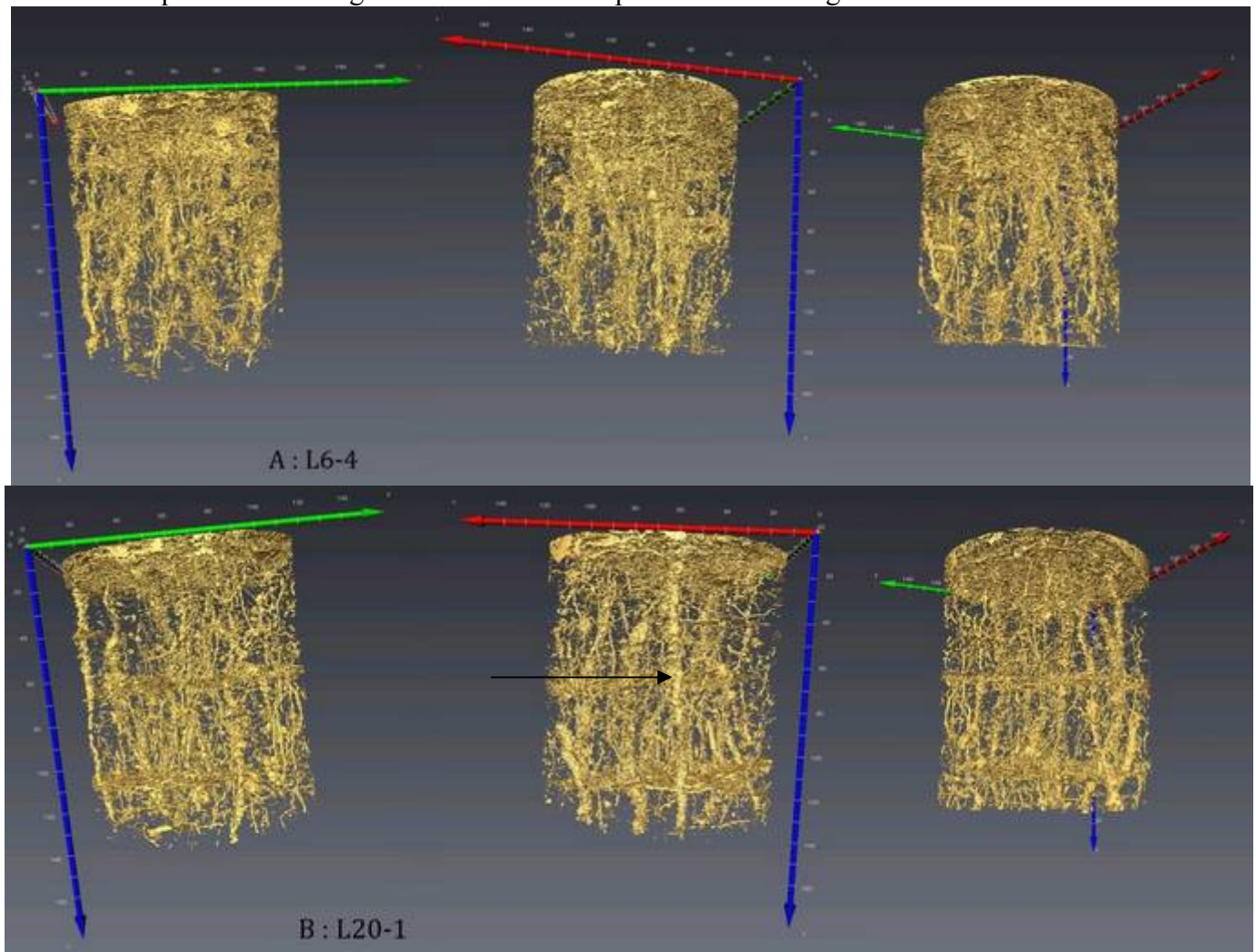


Figure 12 : Illustrations en 3D de la macroporosité des colonnes L6-4 (A) et L20-1 (B) (x = rouge ; y = vert ; z = bleu ; unité millimètre)

La figure 12 illustre la répartition spatiale de la macroporosité (extraite du volume de référence à t_0) des colonnes L6-4 et L20-1. Même à cette résolution spatiale (taille de voxel 332 μm), la structure macroporeuse seuillée est relativement complexe et présente de nombreux détails. La macroporosité est plus importante en surface (0 à 2 cm de profondeur environ) pour les deux colonnes par rapport à la profondeur. Ce compartiment macroporeux correspond à une zone de foisonnement déjà identifiée. Dans les colonnes, les macropores les plus importants (plusieurs mm de diamètres apparents) sont des macropores verticaux assez continus. La macroporosité de L6-4 forme une sorte de « chevelu de voies d'écoulement potentielles ». Par contre, la colonne L20-1 présente une macroporosité qui semble plus concentrée, avec des « chenaux » principaux assez larges et qui rencontrent des plans horizontaux repérés vers 8 cm et 12 cm qui ont été interprétés comme des « magasins de nappe ». Un macropore semble être connecté depuis la surface vers la profondeur (flèche noire, Figure 12).

Des indicateurs globaux de la macroporosité ont été calculé à l'échelle de la colonne (Tableau 9) et sont représentés en fonction de la profondeur (Figure 13).

Tableau 9 : Indicateurs globaux de la macroporosité

		L6-4 (t_0)	L20-1 (t_0)
Nombres de macropores	Dans la colonne	2759	3461
	<i>Par m^3</i>	1 350 036	1 712 706
Macroporosité	Dans la colonne (cm^3)	161,0	103,2
	<i>Par m^3 (m^3/m^3)</i>	0,079	0,051
Surface de la macroporosité	Dans la colonne (cm^2)	5276	3728
	<i>Par m^3 (m^2/m^3)</i>	258,1	184,5

Ils montrent que le nombre de macropores est plus élevé dans la colonne L20-1 que dans la colonne L6-4. Cependant, cette dernière présente un volume et une surface de macroporosité plus élevés que la colonne L20-1 ; cela signifie que le volume macroporeux est plus interconnecté.

Consécutivement aux deux compartiments de macroporosité identifiés, le nombre de macropores diminue exponentiellement avec la profondeur dans les deux colonnes. Ce nombre de macropores de surface est plus élevé pour la colonne L20-1, expliquant le plus grand nombre total de macropores observés pour cette colonne.

Pour les deux colonnes, le volume macroporeux et la surface moyenne des macropores diminuent également exponentiellement de 0 à 7,5 cm de profondeur, par contre des pics apparaissent ensuite. Ces pics proviennent de structures macroporeuses, comme les « magasins de nappes » identifiés auparavant.

La circularité moyenne des macropores fluctue entre 0,65 et 0,70 selon la profondeur pour la colonne L6-4, avec une tendance à l'augmentation avec la profondeur. Cette indice fluctue entre 0,7 et 0,85 pour la colonne L20-1 avec deux chutes de l'indice entre 6,5 et 8 cm environ, entre 10,5 et 13 cm de profondeur qui correspond à la présence d'autres structures macroporeuses. L'indice de circularité de la colonne L20-1 est plus élevé que pour la colonne L6-4, les macropores semblent donc être plus circulaires pour cette colonne que pour l'autre.

L'ouverture maximale moyenne des macropores est fournie par l'indice de Feret. Dans la zone de foisonnement (0 à 4 cm) où la structure est perturbée et plus ouverte, cet indice moyen varie de 3,0 à 1,7 mm. Ensuite, cet indice est relativement stable, en excluant les zones où sont présentes d'autres structures macroporeuses.

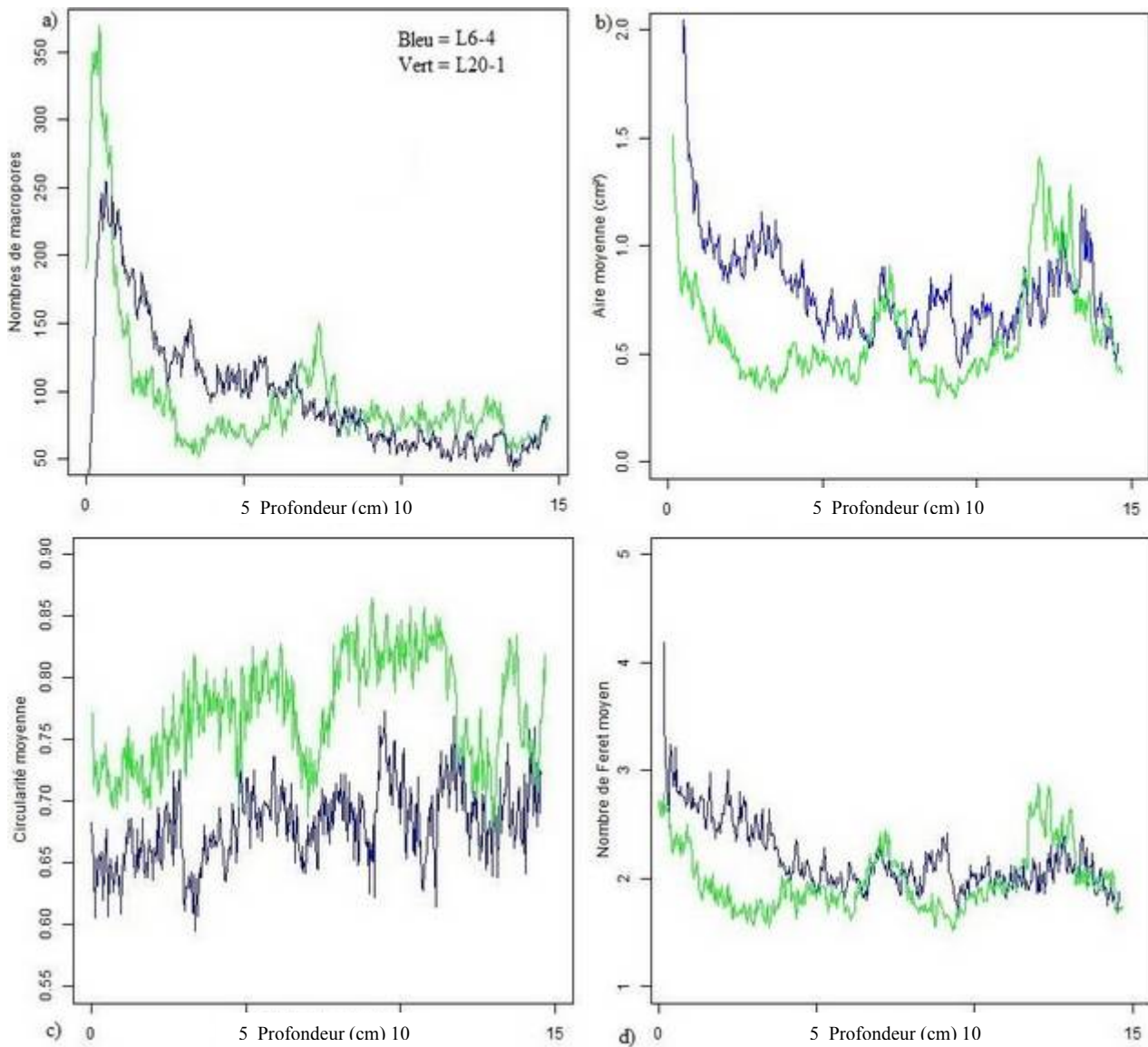


Figure 13 : Nombre et principales caractéristiques des macropores des colonnes L20-1 (vert) et L6-4 (bleu), a) Nombre de macropores, b) Surface moyenne, c) Circularité moyenne, d) Nombre de Feret moyen.

La représentation 3D (Figure 12), les indicateurs globaux (Tableau 9) ainsi que les profils (Figure 13) montrent que la macroporosité est très développée en surface, jusqu'à 3,5-4 cm de profondeur environ. Plus en profondeur, on voit que la macroporosité se réduit (en nombre et en surface) pour les deux colonnes.

C - Caractérisation de l'eau dans le sol

L'eau dans la colonne est caractérisée par les mêmes indicateurs globaux que la macroporosité (Tableau 10) calculés sur l'ensemble des voxels remplis d'eau au cours des 92 premières minutes de l'expérimentation pour L20-1 et sur l'ensemble de l'expérimentation (soit 1500 minutes) pour L6-4. Pour L20-1, la prise en compte des 92 premières minutes coïncide à la fin de l'évènement pluvieux (durée 90 minutes) par contre, c'est un arrêt bien avant la percée qui a lieu à 230 minutes. Les deux séries d'images ne nous livrent donc pas tout à fait la même information sur l'eau s'écoulant dans les colonnes de sol.

Pour la colonne L6-4, le volume et la surface occupés par l'eau correspondent aux deux-tiers de la macroporosité (Tableau 9). Cela signifie que la pluie simulée n'a pas saturée la macroporosité de cette colonne et que la phase eau (vue au scanner) est fragmentée.

Pour la colonne L20-1, le volume et la surface d'eau dans la colonne L20-1 correspondent à la moitié des valeurs de ces paramètres pour la macroporosité. A ce stade de l'expérience (92 minutes), une flaque importante s'est formée sur la colonne et un peu plus d'un dixième de son volume (45 cm³) est détecté dans la colonne de sol. Par contre, la visualisation à 90 minute figure 14-B montre que de l'eau est détectée en bas de colonne. Le fait d'être en drainage libre peut induire un retard à la percée.

Les volumes « somme eau » nous permettent d'avoir une approche du passage fréquemment emprunté par l'eau en cumulant l'eau détectée tout au long de l'expérience dans un seul volume. Intuitivement, cette approche est similaire au marquage au colorant si on considère que les surfaces de macropores qui voient le plus de colorant seront plus colorées.

La détection de l'eau « fréquente » (vue 24 fois sur 34 et 9 fois sur 13 respectivement pour les colonnes L6-4 et L20-1) est respectivement 3 et 5 fois environ plus faible que l'eau totale détectée, ce qui confirme bien le caractère préférentiel du flux d'écoulement dans ces colonnes

Tableau 10 : Indicateurs globaux de l'eau dans la colonne après 1500 min et 92 min d'expérimentation pour les colonnes L6-4 et L20-1 respectivement (les valeurs correspondent à l'eau vue au moins une fois sur cette durée) et l'eau fréquemment détectée.

Colonnes		L6-4	L20-1 (à 92 min)	L6-4 (eau "fréquente")	L20-1 (eau "fréquente")
Quantité d'eau dénombrée	Dans la colonne	3546	3104	1202	937
	Par m ³	1 735 132	1 536 041	588 164	463 683
Volume d'eau	Dans la colonne (cm ³)	108,2	45	34	9,7
	Par m ³ (m ³ /m ³)	0,053	0,022	0,0166	0,0048
Surface de l'eau	Dans la colonne (cm ²)	5010,3	2225,9	1814,5	459,2
	Par m ³ (m ² /m ³)	245,2	110,1	88,8	22,7

La figure 14 montre la répartition de l'eau dans les colonnes en fonction du temps. Dans la colonne L6-4, le foisonnement de surface et la faible intensité de pluie font que l'eau commence par saturer la macroporosité de surface. Au bout de 30 minutes de pluie aucun macropore n'est actif. A 60 minutes, un macropore au centre de l'échantillon et des macropores en bordures (avec l'enveloppe PVC) commencent à être activés. Par la suite, l'eau s'infiltré plus rapidement sur les bords qu'au centre. Des voies préférentielles se distinguent, notamment un macropore subvertical (bien suivi de 60 à 270 min). A 90 minutes, de l'eau d'infiltration est détectée en bas de colonne mais la percée n'arrive qu'à 140 min environ. A la fin de l'expérience, les deux compartiments de porosité sont bien identifiés : l'eau est

présente sur la quasi-totalité de la surface (4 cm de la zone de « foisonnement ») et des macropores en profondeur (zones « non perturbés ») sont marqués par l'eau d'infiltration détectée. Des zones marquées fragmentées apparaissent également en bordure ce qui peut identifier des processus d'écoulements particuliers ou des problèmes de détection de films fins.

La répartition de l'eau dans la colonne L20-1 (Figure 14-B) est assez différente. En effet, dès 30 min, l'eau s'est infiltrée plus profondément que dans la colonne L6-4, et en surface l'eau est moins présente, elle atteint au maximum 2 cm de profondeur. Ceci peut être dû à un effet combiné du foisonnement de surface moins important et de l'intensité de la pluie plus élevée.

On peut voir par ailleurs assez bien l'une des deux zones « magasins de nappe » à 60 min (celle à 8 cm de profondeur). La seconde zone est moins bien marquée. Une visualisation sous un autre angle de vue est disponible en Annexe 5 pour les deux colonnes.

Les volumes « somme eau » nous permettent de comparer la localisation de l'eau détectée pendant l'expérience et la localisation de l'eau détectée la plus fréquemment au même endroit. La figure 15 présente donc la visualisation de tous les voxels eau ayant vu au moins une fois l'eau, ceux ayant vu l'eau au moins 9 fois / 13 pour L20-1 et 24 fois / 34 pour L6-4. Il est difficile de comparer les deux informations prises à des temps différents dans l'expérience, cependant le volume macroporeux de L20-1 est déjà très marqué et la structure la plus active seillée pour L6-4 semble relativement similaire à la structure visible à 90 minutes (Figure 14-A).

Pour L6-4, on remarque un effet du foisonnement de surface très marqué avec un macropore central et des zones macroporeuses de bordures très actives, par contre, l'échantillon L20-1 présente un foisonnement beaucoup moins marqué et plusieurs macropores actifs qui peuvent alimenter des « magasins de nappe » créant des réservoirs.

Une visualisation sous un autre angle de vue est disponible en Annexe 6.

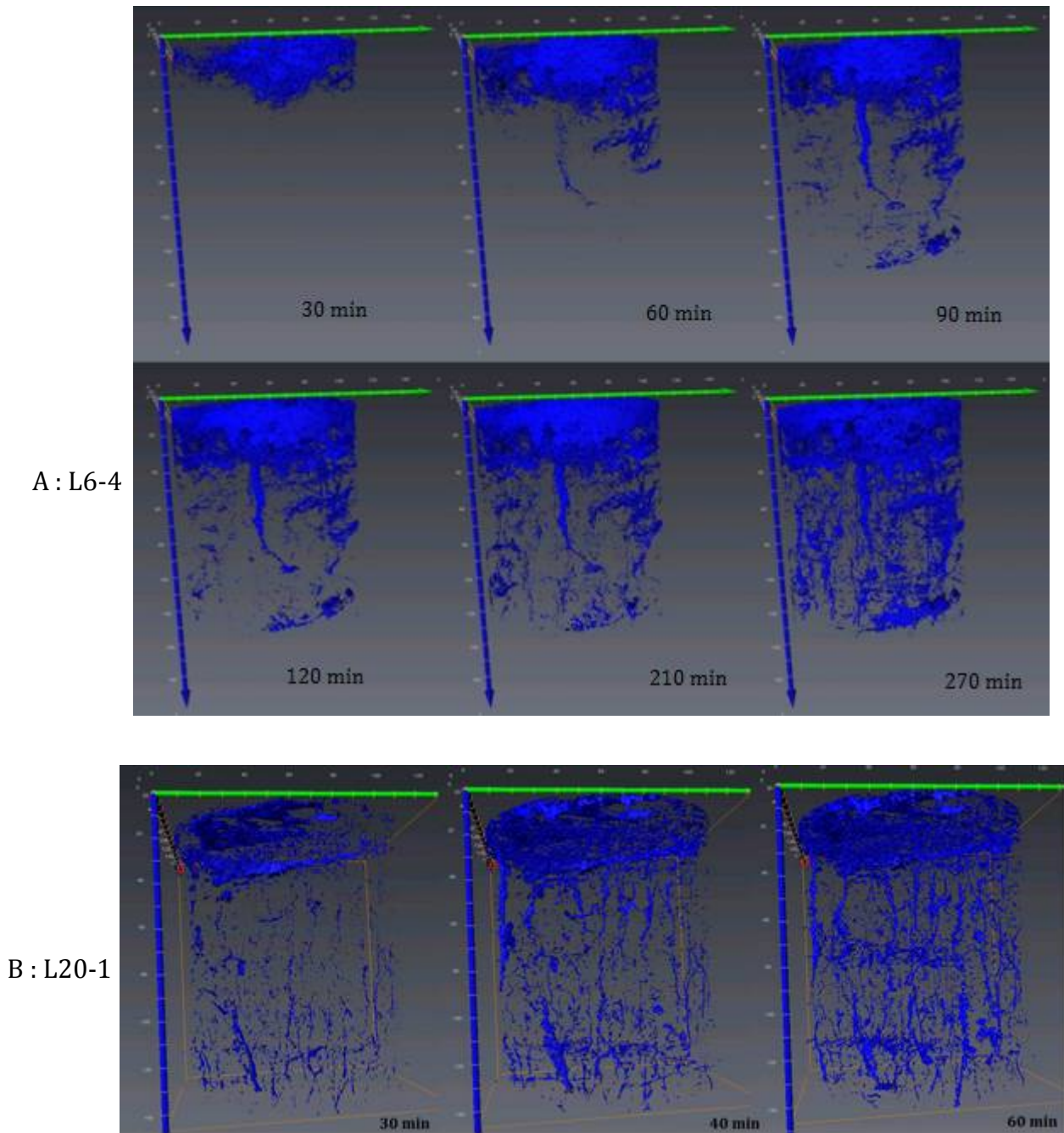
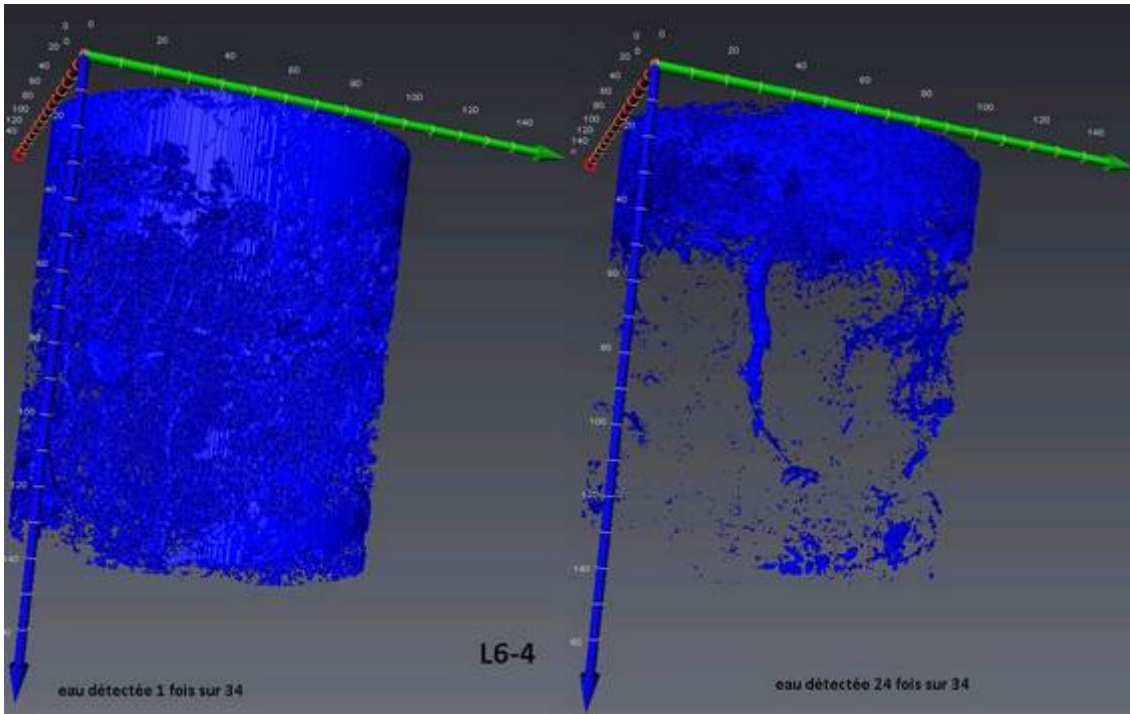
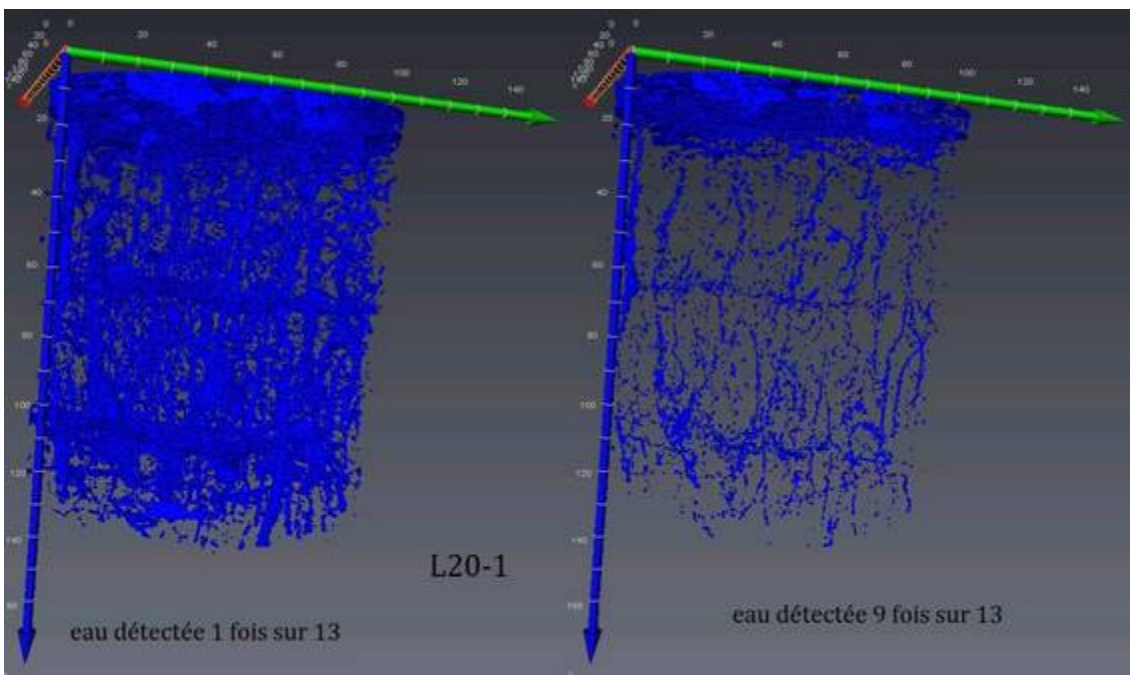


Figure 14 : A - Répartition de l'eau après 30, 60, 90, 120, 210 et 270 min d'expérimentation pour la colonne L6-4
 B - Répartition de l'eau après 30, 40 et 60 minutes d'expérimentation pour la colonne L20-1 selon le plan y (vert) - z (bleu)



A



B

Figure 15 : Visualisation 3D l'ensemble des macropores ayant vu l'eau (1) ou des macropores ayant vu au moins 24 fois l'eau à la fin de l'expérience (i.e. après 1500 min - 34 acquisitions) pour L6-4 (A) et après 92 min pour L20-1 (B) vue en plan y (vert), z (bleu).

Discussion

I - Comparaison des deux techniques

Pour comparer les deux techniques de détection de l'eau dans le sol, nous avons comparé les images binarisées du sol teinté par le colorant avec les images binaires de l'eau détectée dans la colonne, au moins une fois au cours de l'infiltration, à différentes profondeurs (2, 4, 8, 10 et 12 ; Figures 16 et 17). Une comparaison avec les macropores les plus actifs serait également possible en tenant compte de l'intensité de teinte bleue aux abords des macropores, mais cette information n'a pas été obtenue actuellement.

Les images du traçage intègrent, du fait de la rugosité créée par la découpe, une profondeur de l'ordre du mm, et les images du scanner correspondent à une épaisseur de 332 μm . La comparaison des images du traçage a été faite par rapport à la somme de 5 images acquises au scanner autour de la profondeur ciblée. Enfin, un recalage manuel dans le plan de coupe des deux types d'images a été nécessaire avant de pouvoir les comparer par soustraction. Cependant, les difficultés de calage dans le plan de coupe et en hauteur entre les deux volumes sont importantes du fait du manque de repères absolus dans les colonnes et de l'imprécision de la découpe. En effet, la précision de la découpe des colonnes ne peut être estimée comme inférieure à ± 2 mm. Ces premiers résultats comparatifs sont donc à être interprétés à travers cette marge d'incertitude importante.

Les figures 16 et 17 présentent les comparaisons de coupes, respectivement pour les colonnes L6-4 et L20-1. La première colonne montre la distribution du BB, la seconde la distribution de l'eau (sommée sur 5 coupes), la troisième la macroporosité (attention cette dernière n'est pas sommée sur 5 coupes) et la quatrième colonne présente la comparaison eau (en blanc) – BB (en noir).

A ce stade de l'étude, on peut voir que les deux informations ne sont pas liées simplement (Figures 16 et 17). En effet, certains macropores marqués au BB ne montrent pas de marquage à l'eau au scanner. Ceci n'est pas impossible si on considère que des processus d'écoulement de type films d'eau peu épais ne sont pas détectés au scanner du fait d'une résolution spatiale insuffisante (Sammartino et al. 2012). Inversement, certaines zones détectées au scanner ne sont pas marquées au BB. Bien que Kodesova et al. (2011) ont montré qu'un revêtement de la surface des macropores par des argiles ou de la matière organique pouvait créer une barrière imperméable et limiter la pénétration d'un traceur, ce résultat semble cependant très peu probable. Il est aussi envisageable que le flux d'eau peut avoir circulé très rapidement dans les macropores, ainsi le marquage du sol par le colorant peut ne pas être avoir eu lieu ou avec une imprégnation moindre. Il est également possible le flux d'eau a circulé plus tardivement dans l'échantillon (après les dernières acquisitions) ce qui explique un marquage au colorant mais pas de détection au scanner. De notre point de vue, cela ne peut être expliqué que par des problèmes expérimentaux : découpe, recalage, seuillage ... ; d'autant plus que le volume correspondant aux zones marquées au bleu, détecté dans le volume de sol, est très supérieur au volume d'eau détecté au scanner. Les bordures noires des images au BB sont les limites entre le sol et la colonne PVC. Elles ne sont pas prises en compte lors des quantifications (Figure 18).

Il est à noter également que l'intégration de l'eau dans le temps des images scanner de la colonne L20-1 est uniquement faite jusqu'à 90 min après le début de la pluie, alors que les images au BB intègrent l'entièreté de la pluie, du drainage et du ressuyage (découpe faite à 44h environ après le début de la pluie). Ceci peut accroître l'écart de résultat entre les deux techniques pour cette colonne.

De plus, un artéfact de détection du BB a été mis en évidence lors de cette comparaison. En effet, certains macropores non actifs (non colorés par le BB, par exemple flèche jaune sur la Figure 18) sont seuillés comme étant colorés par la méthode de seuillage utilisée (flèches bleues sur la Figure 18).

Néanmoins, des structures communes aux deux techniques sont visibles pour les deux colonnes (Figures 16 et 17). Elles permettent de quantifier des informations importantes sur l'échange entre les deux domaines de porosité classiquement étudiés (macropores et matrice de sol), par la quantification de la longueur de diffusion du halo coloré autour des macropores actifs. Par exemple, à 4 cm de profondeur (colonne L6-4), une fissure est active. La longueur de diffusion moyenne du colorant, autour de cette fissure est estimée à 5 mm (zone cerclée de vert sur la figure 16).

Pour la colonne L20-1, les remarques précédentes peuvent être faites également. Par exemple, à 4 cm, la zone cerclée de rouge présente une bonne corrélation entre le marquage au BB, les macropores et la détection de l'eau au scanner (Figure 17). Sur ce type de zones, où la corrélation semble être correcte, pour les deux colonnes (L6-4 et L20-1 à 4 cm de profondeur), on observe que la distance de diffusion/de pénétration de l'eau marquée au BB dans la périphérie de la macroporosité est de l'ordre de 10 à 30 fois plus élevée comparée à l'eau détectée au scanner et du même ordre de grandeur (en mm) que l'estimation faite pour la colonne L6-4.

Si l'on compare les volumes teintés et ayant vu de l'eau (scanner) à l'échelle de toute la colonne, le BB donne un volume six fois supérieur à celui du scanner pour la colonne L6-4. Nous ne comparerons pas les deux volumes pour la colonne L20-1 dans la mesure où l'intégralité du drainage suivi au scanner n'a pu être analysée.

La comparaison de la détection de l'eau et de la macroporosité au scanner, sur les mêmes coupes que précédemment (Figures 16 et 17), montre que la surface de l'eau détectée n'a pas la même forme que celles des macropores (cercle orange L20-1 à 12 cm). L'eau semble s'écouler le long d'une partie de la paroi du macropore, sous la forme de ruisselets, sans le remplir totalement, exception faite de la colonne L6-4 à 2 et 4 cm où le carré et le cercle bleus délimitent deux zones pour lesquelles l'eau et la macroporosité sont quasi égales.

Quand la macroporosité est très développée, notamment dans la zone de « foisonnement » de surface, l'information binaire du marquage au BB n'est pas utilisable du fait d'un volume de sol entièrement (ou presque) saturé.

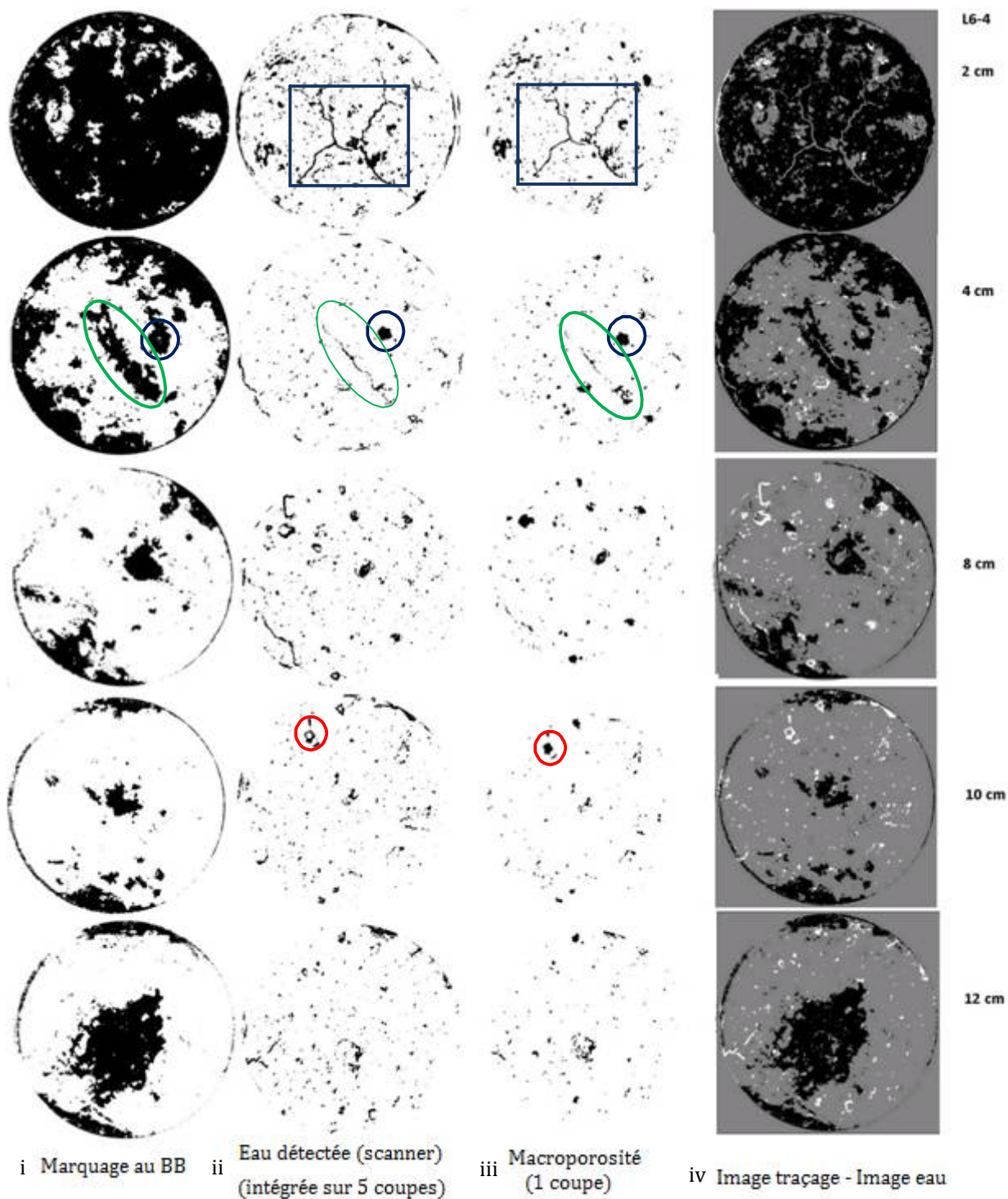


Figure 16 : Colonne L6-4 - Images (i) teintées au bleu brillant, (ii) de la détection de l'eau intégrée sur 5 images consécutives centrée autour de la profondeur voulue dans les colonnes, (iii) de la macroporosité et (iv) de la soustraction des deux premières à différentes profondeurs de la colonne L6-4. En noir : les zones colorées au BB mais dans lesquelles l'eau n'a jamais été détectée au scanner et en blanc : les zones où de l'eau a été détectée au scanner mais non teintées au BB.

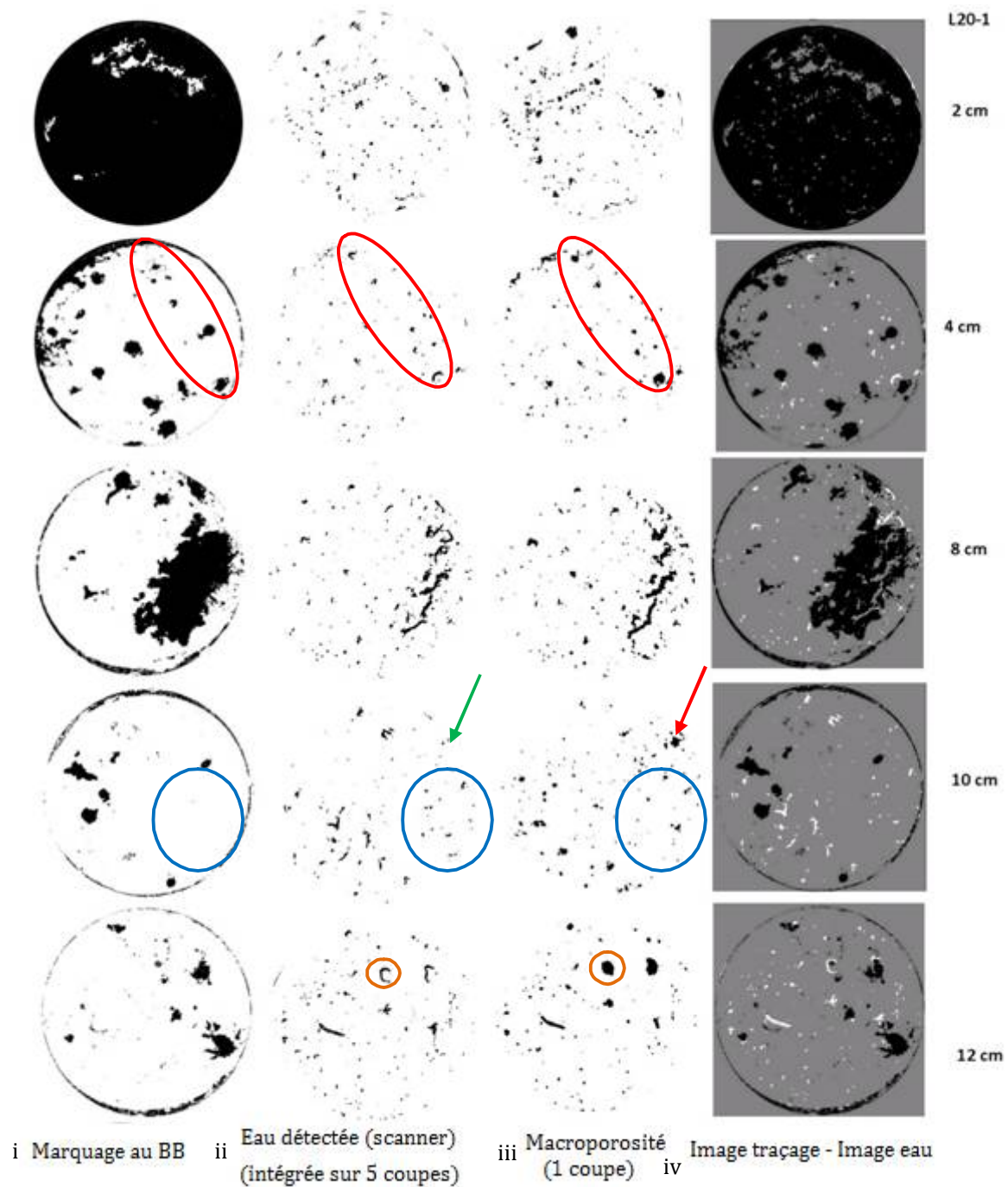


Figure 17 : Colonne L20-1 - Images (i) teintées au bleu brillant, (ii) de la détection de l'eau intégrée sur 5 images consécutives centrée autour de la profondeur voulue dans les colonnes, (iii) de la macroporosité et (iv) de la soustraction des deux premières à différentes profondeurs de la colonne L20-1. En noir : les zones colorées au BB mais dans lesquelles l'eau n'a jamais été détectée au scanner et en blanc : les zones où de l'eau a été détectée au scanner mais non teintées au BB.

L20-1
12 cm

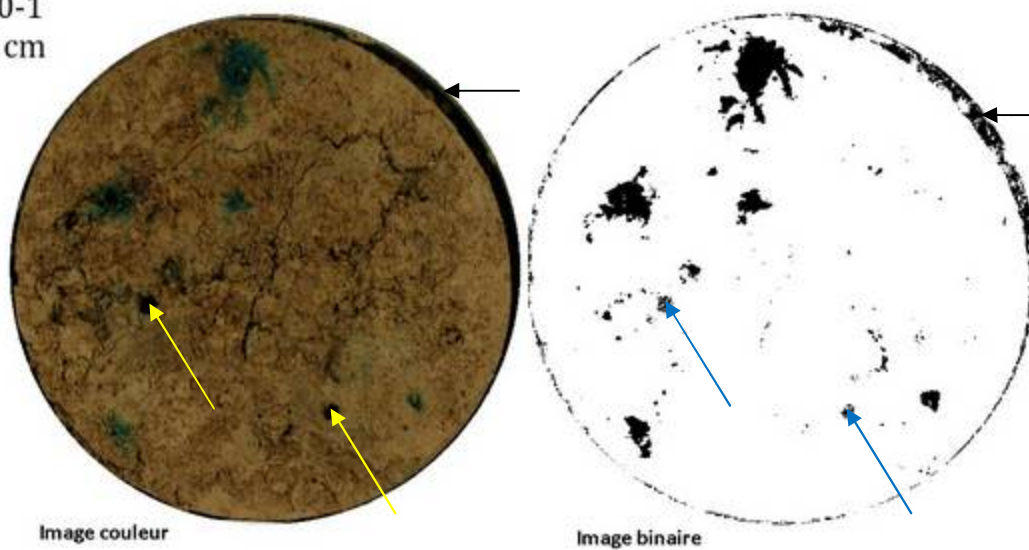


Figure 18 : Comparaison de l'image couleur (avec des macropores non colorés, flèches jaunes) et l'image binaire (avec des macropores seuillés comme colorés flèches bleues). La flèche noire indique le bord extérieur de la colonne (sans sol) seuillé comme étant teinté au Bleu Brillant mais non pris en compte.

La technique de marquage au Bleu Brillant bien que pouvant être considérée comme une technique « absolue », présente également un certain nombre d'artéfacts (découpe, seuillage, résolution spatiale...). La technique développée au scanner apporte des informations qui étaient, jusqu'à présent, inaccessibles sur le suivi dynamique de l'eau. Certains résultats de visualisations comme des macropores saturés ou des ruisselets d'eau à la surface des macropores sont des informations fiables. Par contre, la continuité de la phase eau et la qualité du marquage des macropores peuvent être affectées par les problèmes de résolution spatio-temporelle.

Dans l'état actuel d'avancement du travail, et compte-tenu des artéfacts de calage, il ne semble pas possible d'aller plus loin dans l'estimation quantitative des écarts observés entre les deux techniques. Cependant, ces deux techniques se complètent, qualitativement parlant, assez bien. Néanmoins, l'interaction sol - eau et notamment le comportement de l'eau (et des solutés) en périphérie des macropores n'est pas accessible, du fait de la résolution des images (332 μm ici) et de la non utilisation d'agent de contraste.

II - Apport des techniques de traçage à la compréhension du fonctionnement hydrique des colonnes étudiées

Les résultats globaux des deux techniques montrent que l'écoulement de l'eau dans la colonne L20-1 est à dominante préférentielle, surtout dès 4 cm de profondeur (avec quelques voies de passage marquées) ce qui est conforme aux résultats globaux (figures 10 et 13). La colonne L6-4 présente elle aussi un écoulement préférentiel, mais le colorant semble pénétrer plus la porosité présente autour des macropores.

Une modélisation du comportement hydrique des quatre colonnes a été réalisée avec Hydrus par Quénard (2011), modèle qui est basé sur la loi de Darcy et de ce fait ne prend pas en compte les écoulements préférentiels. Des modélisations représentatives du comportement expérimental des colonnes L6 ont été obtenues, mais pas pour les colonnes L20 (Quénard, 2011). Au vue de cette modélisation, cela amène à conclure que les transferts d'eau se font selon des voies plus préférentielles dans les colonnes L20 que dans les colonnes L6, ceci est confirmé par les images réalisées ici (notamment au Bleu Brillant), modulo les variations de la structure des colonnes qui influence les écoulements et donc le marquage par le colorant.

Les bilans hydriques faits par Cornu et al. (2014) montrent que la colonne L20-1 draine peu (Tableau 2) mais souvent durant la pluie. Les deux plans de fractures (« magasin de nappe ») repérés sur les images (scanner et bleu brillant) peuvent expliquer ceci par un stockage et une évaporation probable.

Conclusion

L'objectif de l'étude menée ici est de quantifier et caractériser l'écoulement préférentiel dans les sols selon deux techniques : (1) par un traçage classique au colorant (Bleu Brillant), avec découpes et analyses d'image binaires, et (2) par un suivi dynamique et non destructif au scanner médical.

L'étude de quatre colonnes de sol par traçage et découpe tous les 0,5 cm permet de suivre l'évolution selon la profondeur de la couverture en colorant, avec en surface (sur 3,5 à 4 cm) une coloration quasi totale du sol, ceci est confirmé par la représentation 3D de l'eau en fonction du temps. Le marquage diminue drastiquement selon la profondeur, avec un comportement significativement différent des colonnes selon l'intensité de la pluie. En effet, les colonnes L6 ont un marquage plus important avec 20% environ du volume de sol teinté, comparé aux colonnes L20 (entre 5 et 10%). Le comportement matriciel - préférentiel dominant semble dépendre donc en partie de l'intensité de la pluie, cela confirme les conclusions de Quénard (2011). Les structures telles que des plans de fracture sont bien vues selon les deux méthodes.

Les visualisations 3D de la macroporosité, de l'eau et de la pluie entière selon le temps permettent de mieux comprendre quels sont les chemins préférentiels de l'eau. La comparaison des images macroporosité et eau indiquent les modalités de remplissage des macropores. En effet, l'eau s'écoule en majorité sur une partie de la paroi du macropore, avec quelques exceptions. Les différents seuillages réalisés sont intéressants pour la représentation spatiale tridimensionnelle de la macrostructure et de l'eau. Ainsi on peut suivre les écoulements dans le temps, et on peut représenter l'eau totalement et la plus fréquemment circulante. Cette dernière information indique les chemins d'écoulements préférentiellement suivis par l'eau.

La comparaison des deux techniques dégage l'existence d'une relation entre le marquage, la détection de l'eau et de la structure du sol, qui permet de mieux appréhender les interactions sol - eau notamment par la quantification de la longueur moyenne de diffusion du colorant dans la périphérie du macropore. Une estimation de celle-ci est faite sur plusieurs zones et sur les deux colonnes, indique que le colorant pénètre la périphérie des macropores à environ 30%.

Les décalages d'images au scanner sont une limite dans l'exploitation totale des acquisitions faites, la résolution de ces problèmes donnera accès à une meilleure comparaison et corrélation, donc une meilleure compréhension des processus mis en jeu. De plus, par la plus faible résolution verticale du traçage, il n'est pas possible de représenter en 3D l'évolution du traceur coloré dans le sol. La comparaison des deux techniques peut se faire uniquement par intégration de plusieurs coupes autour d'une profondeur cible à l'heure actuelle.

Alors que le scanner permet de discriminer des zones plus actives que d'autres dans l'écoulement, l'approche choisie pour traiter les images au Bleu Brillant, uniquement par la présence/absence de colorant (méthode binaire), ne permet pas à l'heure actuelle d'atteindre le

même niveau d'analyse. Le développement ultérieure d'une méthodologie utilisant l'intensité de la couleur du colorant discriminerait des zones d'écoulements préférentiels plus activées que d'autres, et pourrait fournir une quantification du flux d'eau par macropore (une sorte de débit d'eau par macropore sur la durée de pluie, drainage et ressuyage). Un indicateur d'intensité d'écoulement (flux) pourrait être développé par ailleurs sur les images scanner, en faisant le rapport de la surface du macropore par la surface eau détectée. Pour chacun des macropores. L'intégration, verticale et temporelle, de cet indicateur fourni là également un débit (flux) d'eau par macropore. Ces indicateurs pourraient être représentés spatialement et ainsi être comparés entre eux.

Bibliographie

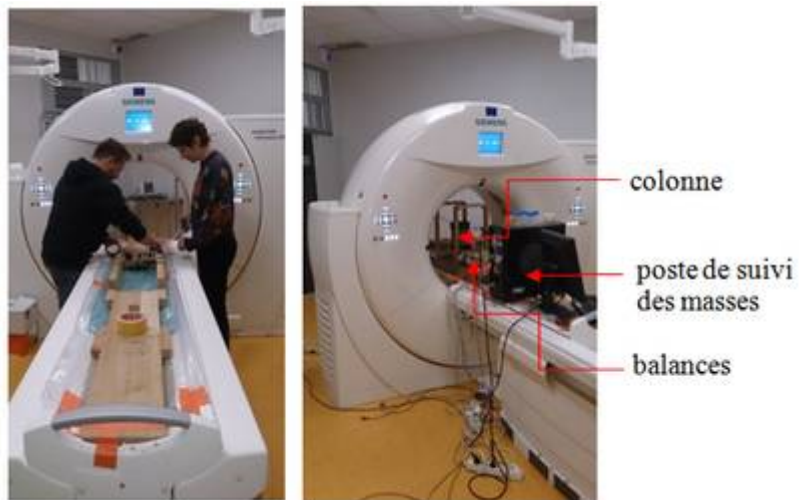
- Bogner, C., Widemann B.T., Lange, H., 2013. Characterising flow patterns in soils by feature extraction and multiple consensus clustering. *Ecological Informatics* vol. 15 (pp. 44-52)
- Bogner, C., Bauer, F., Widemann, B.T., Viñan, P., Balcazar, L., Huwe, B., 2014. Quantifying the morphology of flow patterns in landslide-affected and unaffected soils. *Journal of Hydrology* vol. 511 (pp. 460-473)
- Brewer, R., 1964. *Fabrics and mineral analysis of soils*, John Wiley & Sons)
- Chadwick, J., Chorover, J., 2001. The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma* vol. 100 (pp. 321-353)
- Cornu, S., Quénard, L., Cousin, I., Samouëlian, A., 2014. Experimental approach of lessivage : quantification and mechanisms. *Geoderma* vol. 213 (pp. 357-370).
- De Vries, J.J., Simmers, I., 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* vol. 10 (pp. 5-17).
- Dragila, M.I., Weisbrod, N., 2003. Parameters affecting maximum fluid transport in large aperture fractures. *Advances in Water Resources* vol. 26 (pp. 1219-1228).
- Flury, M., Flühler, H., Jury, W.A., Leuenberger, J., 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. *Water Resources Research* 30, 1945–1954.
- Forrer, I., Papritz, A., Kasteel, P., Flühler, H., Luca, D., 2000. Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. *European Journal of Soil Science* vol. 51 (pp. 313-322)
- Girard, M-C., Schwartz, C., Jabiol, B., 2011. *Etude des sols, description, cartographie, utilisation*. Ed. Dunod (Paris).
- Gobat, J. M., Aragno, M., Matthey, W., 2004. *The living soil: fundamentals of soil science and soil biology*. Science Publishers.
- Hu, H. 1998. Multi-slice helical CT: Scan and reconstruction. *Medical Physics*
- Kalender, W.A., 2005. *Computed tomography, Fundamentals, Systems Technology, Image Quality, Applications*. Publicis Corporate Publishing, Erlangen.
- Kasteel, R., Garnier, P., Vachier, P., Coquet, Y., 2007. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation. *Geoderma* vol. 137 (pp. 360-369).

- Kasteel, R., Schnitzler, F, Berns, A.E., Vanderborght, J., Vereecken, H., 2013. Visualization of transport pathways for organic compounds in undisturbed soil monoliths. *Geoderma* vol. 195-196. (pp. 70-78).
- Ketcham, R. A., Carlson, W. D., 2001. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences* vol. 27 (pp. 381-400)
- Kodesova, R. Nemecek, K.,Kodes, V., Zigova, A., 2011. Using dye tracer for visualization of preferential flow at macro- and microscales. *Vadose Zone Journal*
- Mooney, S.J, Morris, C., 2008. A morphological approach to understanding preferential flow using image analysis with dye tracers and X-ray computed tomography. *Catena* vol. 73 (pp. 204-211).
- Nobles, MM., Wilding, L.P., Lin, H.S., 2010. Flow pathways of bromide and Brilliant Bleu FCF tracers in caliche soils. *Journal of Hydrology* vol. 393 (pp. 114-122).
- Persoon, M., 2005. Accurate dye tracer concentration estimations using image analysis. *Soil Science Society of America Journal* vol 69 (pp.967-975).
- Persoon, M., Haridy, S., Olsson, J., Wendt, J., 2005b. Solute transport dynamics by high-resolution dye tracer experiments image analysis and time moments. *Vadose Zone Journal* vol. 4 (pp. 856-865).
- Quénard, L., 2011. Analyse d'un processus pédogénétique par une approche expérimentale : le lessivage des argiles dans le sol. Thèse. Université d'Orléans.
- Sammartino, S., Michel, E., Capowiez, Y., 2012. A novel method to visualize and characterise preferential flow in undisturbed soil cores by using multislice helical CT. *Vadose Zone Journal*.
- Solacroup, Boyer, Le Marec, Schouman Claeys, 2001. Bases physiques des rayons X. CERF 2001.
- Wang, K., Zhang, R., Hiroshi, Y., 2009. Characterizing heterogeneous soil water flow and solute transport using information measures. *Journal of Hydrology* vol. 370 (pp 109–121).
- Weiler, M., Flüher, H., 2004. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soil. *Geoderma* vol. 120 (pp. 137-153).

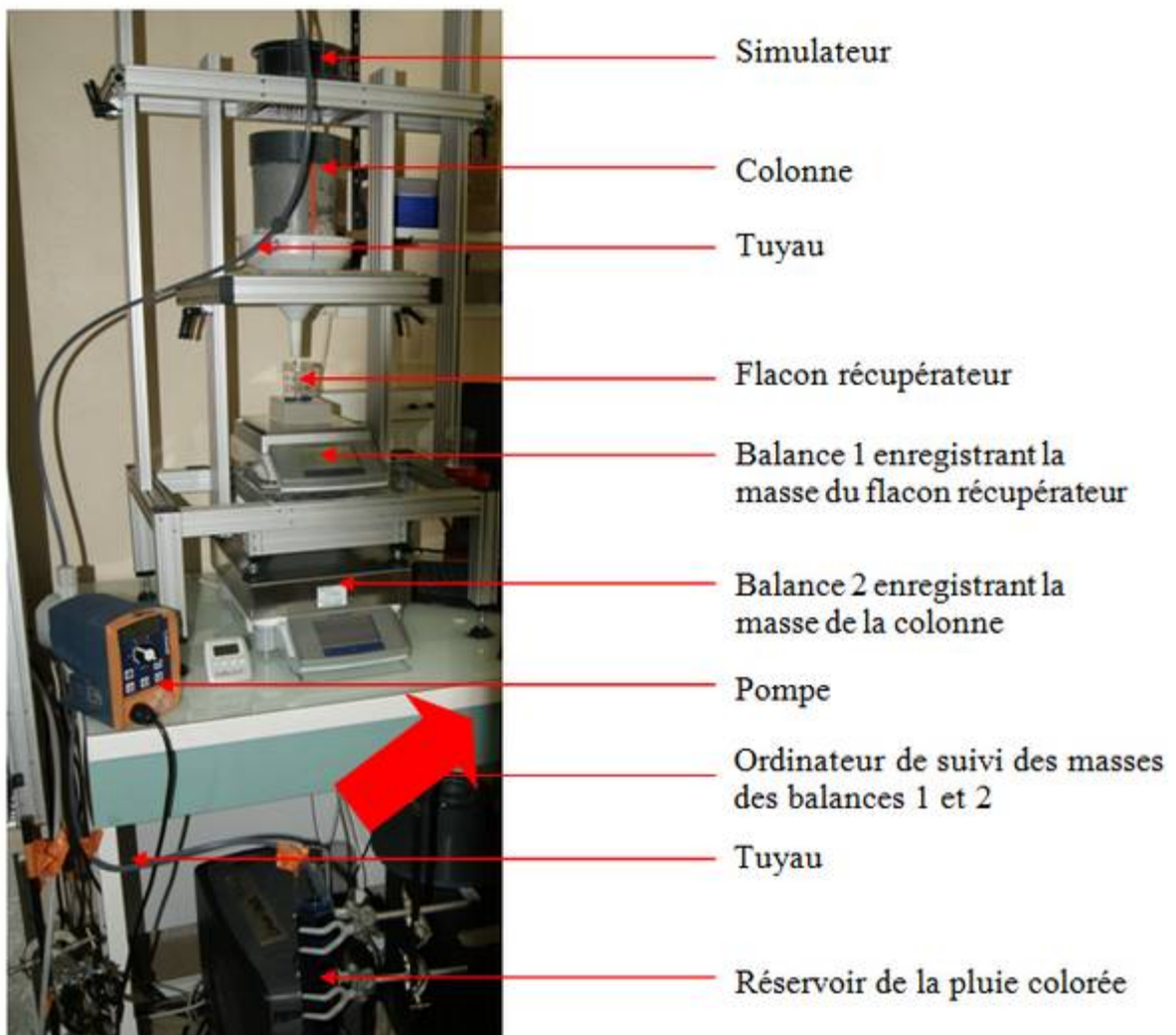
- Wildenschild, D., J.W. Hopmans, C.M.P. Vaz, M.L. Rivers, D. Rikard, and B.S.B.Christensen. 2002. Using X-ray computed tomography in hydrology: Systems, resolutions and limitations. *Journal of Hydrology* vol. 267 (pp. 285–297)
- Wildenschild, D., Sheppard A.P., 2013. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems. *Advances in Water Ressources* vol 51 (pp. 217-246).
- Zavala, M., Saucedo, H., Fuentes, C., 2012. Dual permeability model to water flow in macroporous soils. *Agrociencia* vol. 46 (pp. 205-220).

Annexes

Annexe 1 : Photographies de l'installation du dispositif expérimental dans le scanner (INRA - Nouzilly)



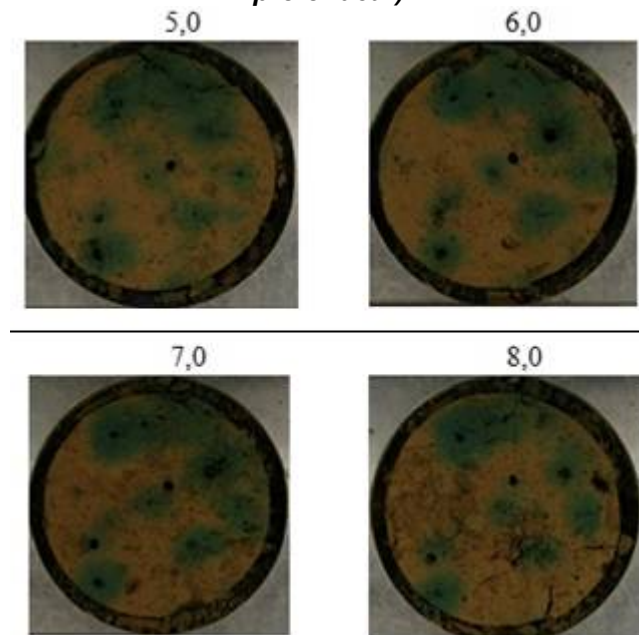
Annexe 2 : Poste de simulation de pluie (UMR EMMAH Sol).



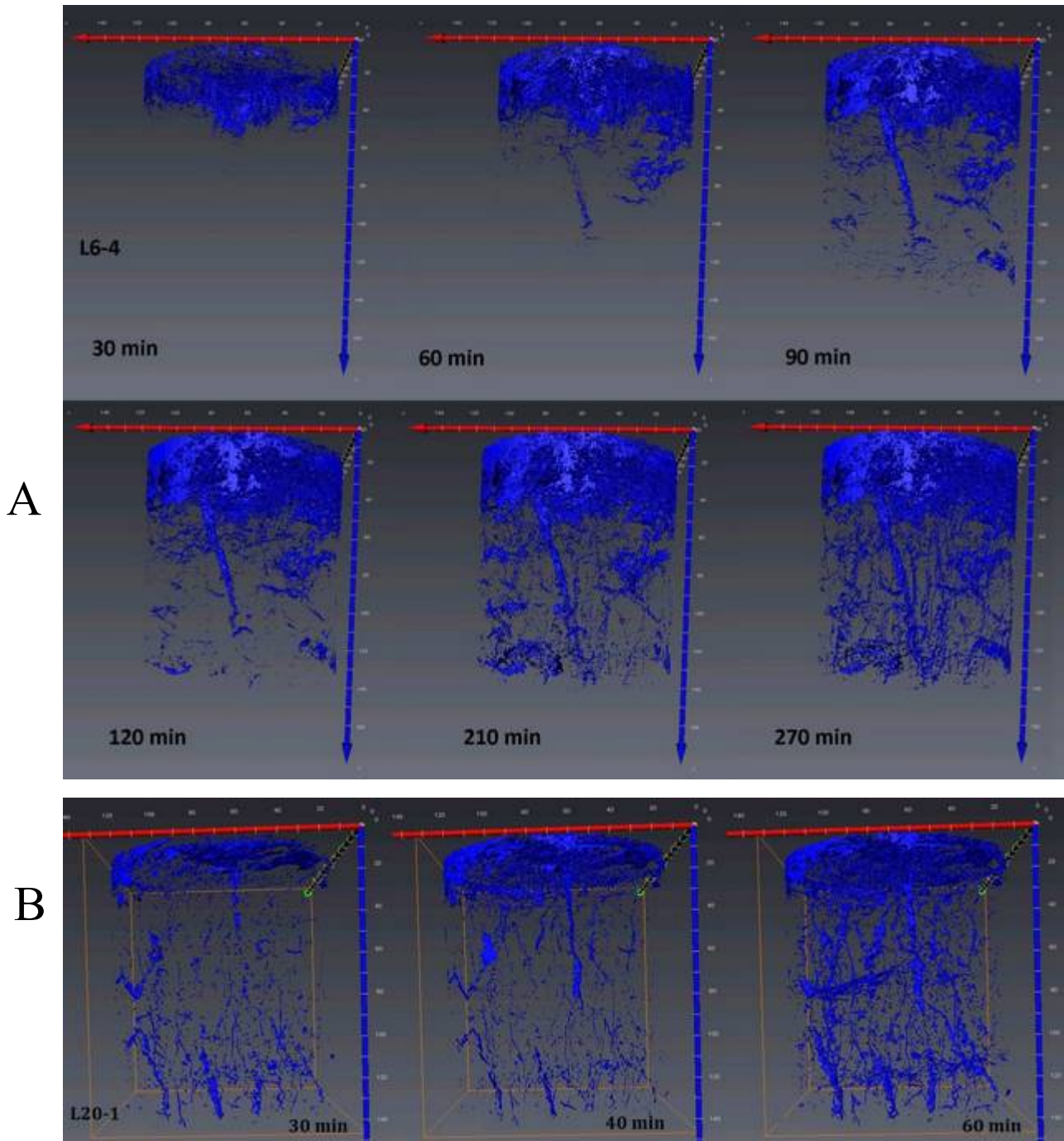
Annexe 3 : Photographies du dispositif couplé de découpe des colonnes et prise de vue.



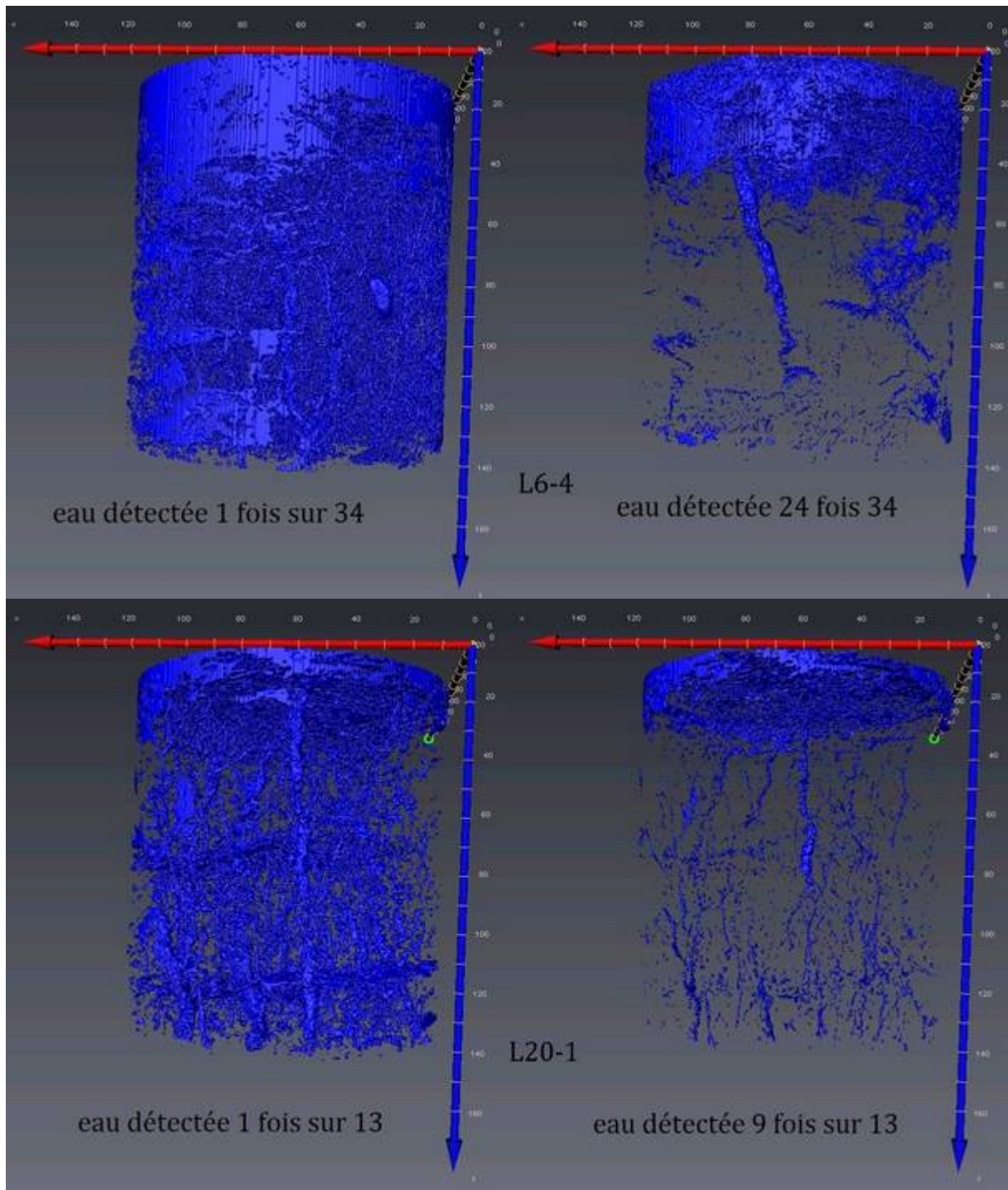
Annexe 4 : Evolution de l'état de surface du sol de la colonne test 1 (entre 5 et 8 cm de profondeur).



Annexe 5 : Répartition de l'eau vue en 3D dans le temps (min) selon le plan x (rouge) - z (bleu)
(A : colonne L6-4 et B : colonne L20-1)



Annexe 6 : Visualisation 3D de l'eau entièrement détectée et de l'eau détectée 24 fois sur 34 et 9 fois sur 13, dans les colonnes L6-4 et L20-1 vue en plan x (rouge), z (bleu).



Liste des Figures

Figure 1 : Echelles de gris et de couleur (A) et mire (B) pour les corrections ultérieures des images.....	7
Figure 2 : Photos de la surface à 8cm de profondeur : A - Immédiatement après la découpe ; B - 15h plus tard.....	7
Figure 3 : Mire de calibration, A - Détection de la mire (cadre vert) ; B - Orientation des axes x, y à partir du coin tronqué.....	8
Figure 4 : A - Plans de coupe (en rouge) obtenues au scanner ; B - Section constante obtenue après reconstruction.....	11
Figure 5 : A - ROI 1 (plans x,y et x,z) et B : ROI 2 (plan x,y idem, x,z).....	12
Figure 6 : A - Schéma histogramme des niveaux de gris du sol, B - Histogramme "réel" d'une acquisition de la colonne L6-4.....	12
Figure 7 : A - Image de la soustraction entre un volume t et le volume t_0 (avec 1 = noir et 2 = blanc) ; B - Distribution des valeurs de gris (Unité Hounsfield) pendant le test d'infiltration.	13
Figure 8 : A - Illustration du volume « somme eau » ; B - Zoom du volume « somme eau » ..	14
Figure 9 : Photographies de la surface du sol découpée selon la profondeur.....	16
Figure 10 : Evolution de la surface colorée (%) selon la profondeur pour les colonnes L20-1, L20-2, L6-3, L6-4.....	17
Figure 11 : Chronologie des acquisitions en tomographie RX. A - Colonne L20-1 et B - L6-4 (rouge = acquisition non exploitable).....	19
Figure 12 : Illustrations en 3D de la macroporosité des colonnes L6-4 (A) et L20-1 (B) (x = rouge ; y = vert ; z = bleu ; unité millimètre)	19
Figure 13 : Nombre et principales caractéristiques des macropores des colonnes L20-1 (vert) et L6-4 (bleu), a) Nombre de macropores, b) Surface moyenne, c) Circularité moyenne, d) Nombre de Feret moyen.	21
Figure 14 : A - Répartition de l'eau après 30, 60, 90, 120, 210 et 270 min d'expérimentation pour la colonne L6-4 ; B - Répartition de l'eau après 30, 40 et 60 minutes d'expérimentation pour la colonne L20-1 selon le plan y (vert) - z (bleu).....	24
Figure 15 : Visualisation 3D l'ensemble des macropores ayant vu l'eau (1) ou des macropores ayant vu au moins 24 fois l'eau à la fin de l'expérimentation (i.e. après 1500 min - 34 acquisitions) pour L6-4 (A) et après 92 min pour L20-1 (B) vue en plan y (vert), z (bleu).	25

Figure 16 : Colonne L6-4 - Images (i) teintées au bleu brillant, (ii) de la détection de l'eau intégrée sur 5 images consécutives centrée autour de la profondeur voulue dans les colonnes, (iii) de la macroporosité et (iv) de la soustraction des deux premières à différentes profondeurs de la colonne L6-4. En noir : les zones colorées au BB mais dans lesquelles l'eau n'a jamais été détectée au scanner et en blanc : les zones où de l'eau a été détectée au scanner mais non teintées au BB.28

Figure 17 : Colonne L20-1 - Images (i) teintées au bleu brillant, (ii) de la détection de l'eau intégrée sur 5 images consécutives centrée autour de la profondeur voulue dans les colonnes, (iii) de la macroporosité et (iv) de la soustraction des deux premières à différentes profondeurs de la colonne L20-1. En noir : les zones colorées au BB mais dans lesquelles l'eau n'a jamais été détectée au scanner et en blanc : les zones où de l'eau a été détectée au scanner mais non teintées au BB.29

Figure 18 : Comparaison de l'image couleur (avec des macropores non colorés, flèches jaunes) et l'image binaire (avec des macropores seuillés comme colorés flèches bleues). La flèche noire indique le bord extérieur de la colonne (sans sol) seuillé comme étant teinté au Bleu Brillant mais non pris en compte.30

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des colonnes (d'après la Thèse de Quénard, 2011)4

Tableau 2 : Historique des colonnes étudiées (Cornu et al., 2014).....4

Tableau 3 : Récapitulatif des mesures réalisées sur les colonnes.5

Tableau 4 : Comparatif des différentes techniques d'acquisitions tomographiques.10

Tableau 5 : Bilan hydrique des colonnes pluie n°34.....15

Tableau 6 : Résultats des volumes teintés pour les 4 colonnes17

Tableau 7 : ANOVA sur les surfaces teintées au-dessous de 4cm de profondeur et excluant les magasins de nappe (test Fisher à 5% de confiance).....18

Tableau 8 : Pourcentage moyen des surfaces colorées des sous-volumes fonctionnels18

Tableau 9 : Indicateurs globaux de la macroporosité.....20

Tableau 10 : Indicateurs globaux de l'eau dans la colonne après 1500 min et 92 min d'expérimentation pour les colonnes L6-4 et L20-1 respectivement (les valeurs correspondent à l'eau vue au moins une fois sur cette durée) et l'eau fréquemment détectée.22

Liste des Annexes

Annexe 1 : Photographies de l'installation du dispositif expérimental dans le scanner (INRA - Nouzilly)	37
Annexe 2 : Poste de simulation de pluie (UMR EMMAH Sol).....	37
Annexe 3 : Photographies du dispositif couplé de découpe des colonnes et prise de vue.	38
Annexe 4 : Evolution de l'état de surface du sol de la colonne test 1 (entre 5 et 8 cm de profondeur).....	38
Annexe 5 : Répartition de l'eau vue en 3D dans le temps (min) selon le plan x (rouge) - z (bleu) (A : colonne L6-4 et B : colonne L20-1)	39
Annexe 6 : Visualisation 3D de l'eau entièrement détectée et de l'eau détectée 24 fois sur 34 et 9 fois sur 13, dans les colonnes L6-4 et L20-1 vue en plan x (rouge), z (bleu).	40

Résumé

Le sol, interface entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère, évolue en permanence du fait de flux d'eau et de matière. Cette évolution modifie les services écosystémiques qu'il rend. Ainsi la compréhension des flux d'eau dans le sol constitue un enjeu majeur pour la préservation des ressources en sol et en eau. L'étude menée ici s'attèle au suivi des écoulements préférentiels. Pour cela, deux méthodes ont été employées : (i) traçage classique au colorant Bleu Brillant (FCF), et (ii) tomographie d'absorption des rayons X au scanner médical. Quatre colonnes non remaniées d'un horizon E ayant déjà fait l'objet d'une trentaine de simulations de pluie ont subi une dernière pluie colorée au Bleu Brillant. Cette simulation a eu lieu pour deux d'entre elles au scanner médical (INRA Tours). Une fois ressuyées, les 4 colonnes ont été découpées et la surface décapée a été photographiée. Les images obtenues (scanner et découpe) ont subies une série de pré-traitements et d'analyse d'images binaires. Ainsi, des informations quantitatives et qualitatives sont obtenues sur les processus d'écoulements préférentiels dans les sols selon l'intensité de la pluie. Pour une forte intensité, le marquage au BB est moindre, l'écoulement est donc plus préférentiel. Le scanner montre que l'eau s'écoule sur une partie de la paroi des macropores. Cette technique montre aussi les chemins préférentiels de l'eau (par la fréquence de détection de l'eau). La comparaison des deux techniques utilisées visualise la relation entre la distribution spatiale de l'eau et du traceur, et la différence de détection eau et traceur. Les interactions sol-eau sont appréhendées en périphérie des macropores en estimant une longueur de diffusion du Bleu Brillant autour du macropore (environ 30%). Subséquemment, ces données devraient permettre l'amélioration de la modélisation des écoulements préférentiels dans les sols.

Mots clefs : macroporosité, écoulement préférentiel, traceur coloré, scanner médical hélicoïdal, analyses d'images, comparaison

Abstract

Soil, the interface between atmosphere, hydrosphere, biosphere and lithosphere, is constantly evolving due to flows of water and matter. Such an evolution modifies in turns ecosystems services of soils. Therefore there is an urgent need of better understanding mechanisms of water flow in soils in order to protect soil and water resources. This study aims at following water preferential flows in soil column with two techniques: (i) classical dye tracing using Brilliant Blue (FCF) and (ii) helical computed tomography (CT). For this, we simulated on 4 undisturbed soil columns that already underwent a 33 rainfall experiment, an ultimate rain containing Brilliant Blue dye. Two of them were also monitored on CT scanner at INRA Tours. The columns were then sliced and each slice surface photographed. All pictures (CT scan, and dye tracer) have undergone a series of pretreatments and analysis on software. Thus quantitative and qualitative information is obtained on preferential flow processes in soil according to rain intensity. For an intensive rain, dye tracing is less than for a low intensive rain. CT scan show water flows over the wall of the macropores, as show preferential ways of water (frequency of water detection). Comparison of this two technics visualizes relationship between spatial distribution and differences of detection of water and dye tracer. Interaction soil-water are apprehended with an estimation of diffusion length of dye tracer around macropore (approximately 30%). Subsequently these data are expected to allow improving the modeling of preferential flow in soils.

Key words: macroporosity, preferential flow, dye tracer, medical helicoidal CT scan, , image analysis, comparison.