

III. Processus d'écoulements de l'eau en sol structuré et insaturé : identification et caractérisation de la macroporosité active

III.1. Introduction

Dans les sols, la structure hétérogène du milieu naturel donne généralement lieu à un écoulement non uniforme, i.e. localisé dans une partie réduite de la porosité et incluant des processus hors équilibre. Flury et al. (1994) ont montré que ce phénomène d'écoulement préférentiel était davantage une règle qu'une exception dans de nombreux sols. L'écoulement préférentiel conduit à un transfert d'eau et un transport de solutés et de particules plus rapides que celui observé dans la matrice de sol, par un contournement de celle-ci. Les écoulements préférentiels dans les macropores s'initient lorsque le flux d'équilibrage de la pression matricielle est moins important que le flux vertical.

Un lien a rapidement été établi entre la notion d'écoulements préférentiels et les caractéristiques de certains pores de grande taille, i.e. les macropores. Les processus d'écoulements dans les macropores sont différents de ceux contrôlant l'écoulement matriciel (Beven and Germann, 2013). Selon Jarvis (2007), les processus hors équilibre sont dominants dans des pores de diamètre supérieur à 0,3-0,5 mm, en dessous, les processus à l'équilibre dominant. D'autres auteurs placent cette limite pour des tailles équivalentes de macropores allant de 0,075 mm à 3 mm (Brewer, 1964; Germann and Beven, 1981; Luxmoore, 1981; Perret et al., 1999; Ghezzehei and Or, 2005; Schaap and Van Genuchten, 2006; Jarvis, 2007), aucun seuil n'étant réellement admis par tous car de nombreux facteurs autres influent les processus d'écoulement qui s'y déroulent, tels que la perméabilité de l'interface, la teneur en eau de la matrice aux abords des macropores, l'intensité de la pluie, l'hydrophobicité des parois (teneur en matière organique). Si une définition exacte de la taille des macropores est encore sujette à débat, il est communément admis que la macroporosité du sol résulte de processus variés tels que les processus d'humectation-dessiccation, le gel-dégel (fissures et espaces inter-agrégats), la croissance racinaire et l'activité de la macrofaune (vers de terre essentiellement).

La multiplication des études de traçage coloré pour caractériser les chemins d'écoulements préférentiels (communément au bleu brillant FCF) à l'échelle du profil

(Weiler and Flühler, 2004; Weiler, 2005; Kasteel et al., 2007) ou de sections de colonne de sol (Flury and Wai, 2003) a montré que tous ces macropores n'étaient pas actifs. De ce fait, la notion de « porosité active » a été introduite, i.e. la partie « active » de la porosité du sol qui participe effectivement à l'écoulement de l'eau, par opposition à la porosité totale du sol (que nous appellerons « structure totale » par la suite) qui englobe indifféremment tous les pores du sols. Quelques publications estiment que la « partie active » de la porosité est généralement réduite à 1-10% de l'espace poral total (Bouma and De Laat, 1981; de Jonge et al., 1998a). Ces approches par traçage au bleu ne permettent pas d'accéder à la dynamique de l'écoulement et aux processus impliqués, ni d'établir clairement des liens avec les caractéristiques tridimensionnelles du réseau de macropores (Luo et al., 2008; Kodešová et al., 2012).

Récemment, une nouvelle approche a été proposée pour déterminer la macroporosité active dans des colonnes de sol non remanié par acquisitions d'images 3D de tomographie d'absorption X résolues dans le temps durant des pluies simulées (Sammartino et al. 2012). La méthode a permis une première quantification de la partie active de la porosité en fonction de la profondeur, à l'échelle de la colonne de sol (Sammartino et al. 2012). Elle a également été utilisée par Kutawal et al. (2014) lors de l'étude de corrélations entre la géométrie des macropores et les propriétés hydrodynamiques de colonnes de sol. Ces auteurs concluent à la nécessité de ne prendre en compte que la partie active de la porosité pour améliorer les corrélations.

En effet, ces études ont des difficultés à mettre en relation des propriétés effectives des colonnes (i.e. propriétés hydrodynamiques, vitesse et voies de l'écoulement, conductivité à saturation, dispersion des solutés, transport des particules) avec les caractéristiques du réseau de (macro)pores (i.e. leurs caractéristiques topologiques et morphologiques). Pour progresser dans la compréhension de ces relations et dans la modélisation de l'écoulement dans les sols insaturés, l'identification de la porosité dite « active » et des processus à l'interface macropores-matrice est reconnue comme une question clef (Jarvis, 2007; Luo et al., 2008; Mooney and Morris, 2008; Köhne et al., 2009; Allaire et al., 2009; Nimmo, 2012; Sammartino et al., 2012; Beven and Germann, 2013). Les techniques d'imagerie ont notamment permis des avancées en ce sens ces dernières années

(Perret et al., 2000; Vogel, 2000; Vogel and Roth, 2001; Pierret et al., 2002; Vervoort and Cattle, 2003; Bastardie et al., 2003; Luo et al., 2008, 2010; Elliot et al., 2010; Köhne et al., 2011; Naveed et al., 2013b; Capowiez et al., 2014).

Nous proposons donc (i) d'identifier sur des colonnes de sol non remanié la porosité active par simulation de pluie sous tomographie d'absorption X ; (ii) de déterminer les processus gouvernant la dynamique de l'eau au sein de la colonne ; (iii) d'établir un lien entre les caractéristiques de la structure totale et celles de la macroporosité active pour le type de sol étudié (i.e. luvisol), permettant ainsi d'estimer un fonctionnement effectif du sol sans passer par la technique lourde et coûteuse développée précédemment.

III.2. Matériels et méthodes

III.2.1. Principe de l'approche

Des simulations de pluie sur des colonnes de sol non remanié sont réalisées dans un scanner médical. Cette approche expérimentale permet d'enregistrer des images 3D de colonnes de sol durant un évènement pluvieux (Sammartino et al., 2012). L'avantage de la tomographie d'absorption X par scanner médical repose sur sa calibration en « densité ». Cette calibration est réalisée par comparaison avec l'atténuation de l'air et de l'eau, au moyen de la transformation en unités Hounsfield (HU) (Hounsfield, 1973; Kalender, 2011). Chaque matériau ou mélange de matériaux est ainsi caractérisé sur les images 3D par une valeur de niveau de gris. Selon cette échelle, -1000 HU est la valeur des voxels (pixels tridimensionnels) remplis d'air et 0 HU la valeur des voxels remplis d'eau. Le mode de la distribution de niveau de gris du sol est centré vers 1000-1300 HU, ce qui correspond habituellement à la matrice de sol et dépend de son potentiel hydrique. Au-delà de 2000 HU, on trouve les densités HU des grains minéraux les plus denses. Par conséquent, cette échelle est appropriée pour distinguer les différentes phases du sol et par différence avec un état de référence, acquis avant la pluie, les mouvements d'eau et d'air dans la porosité (Sammartino et al., 2012).

III.2.1.1. *Acquisition des images 3D avec un scanner hélicoïdal multi-coupes*

Le scanner médical (General Electric BrightSpeed Excel 4) installé au LERFOB, laboratoire de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), a été utilisé lors des expérimentations. Chaque scan avait une durée de 125 s avec le paramétrage suivant : tension du tube à 120 kV, flux d'électron à 50 mA et le pas de scan (pitch factor) de 1,0. Le temps entre deux acquisitions successives n'a pas pu être réduit à moins de 3 min afin d'éviter toute surchauffe du tube. Les coupes ont été reconstruites en utilisant le logiciel interne GE et un filtre BonePlus a été sélectionné comme le meilleur compromis entre réduction du bruit et conservation des contours des macropores. Dans les images brutes, la taille du pixel de 410 μm a été obtenue pour un champ de vue de 210 mm et une matrice numérique de 512x512 pixels. L'épaisseur des coupes a été réduite à son minimum (625 μm). Les sections reconstruites sont exportées au format image standard DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), encodées en 16-bit signé avec une échelle de gris étendue de -1024 à 3072.

III.2.1.2. *Segmentation de la structure du sol*

Les images 3D des colonnes de sol acquises avant la pluie (utilisées comme référence pour la détermination du passage de l'eau) sont segmentées afin de séparer la matrice des macropores (tous deux définissant la structure du sol)

L'approche de segmentation proposée par Sammartino et al. (2012) ne tient pas compte d'une limite de taille de macropores a priori mais utilise l'information de niveau de gris de chaque voxel, calibré en densité Hounsfield. Cette calibration de l'échelle Hounsfield limite la part de subjectivité importante dans le choix des seuils comme récemment démontré par Baveye et al (2010). Chaque voxel est potentiellement composé de matrice, d'air et d'eau, et de tous les mélanges possibles entre ces éléments. D'après une loi de mélange simple des atténuations caractéristiques de l'eau, de l'air et de la matrice, dans laquelle les atténuations des trois phases principales sont pondérées par leurs fractions volumiques (Luo et al.,

2008; Sammartino et al., 2012), la macroporosité a été seuillée sur les images 3D. Les limites de niveau de gris définissant la macroporosité ont été placés entre -1024 HU (le minimum de densité dans l'échelle Hounsfield) et 623 HU (i.e. des voxels remplis d'un mélange d'air - jusqu'à 50 % de leur volume - et de matrice de sol). Cet intervalle de niveau de gris inclus une part de macroporosité dont la taille peut être inférieure à la résolution du scanner (Sammartino et al., 2012). Ce seuillage de la macroporosité permet de définir la structure des colonnes de sol, appelée par la suite « structure totale ».

III.2.1.3. *Segmentation des zones affectées par le passage de l'eau*

Afin de déterminer les évolutions de densité dans les colonnes par rapport à l'état de référence avant le début de la pluie, des soustractions entre images 3D de référence (à $t=0$) et images 3D à chaque temps d'acquisition (t) ont été réalisées. L'évolution de la forme des histogrammes de ces images 3D soustraites durant la pluie (Figure III-1) illustre les changements de densité de l'échantillon consécutifs à l'infiltration de l'eau dans la colonne de sol. Chaque niveau de gris sur ces images 3D soustraites correspond au remplacement d'air, d'eau ou de matrice présentes sur l'image de références par de l'eau, de l'air ou de la matrice dans des proportions différentes, au temps t . De la même façon que pour la segmentation de la structure, des seuils de niveau de gris sont définis afin de segmenter les zones affectées par l'infiltration de l'eau dans la colonne de sol. Quelques valeurs caractéristiques correspondantes au remplacement de voxels remplis d'air par des voxels constitués d'eau ou de matrice sont listées Tableau III-1. La valeur 0 HU correspond aux voxels pour lesquels aucun changement n'a été détecté entre l'image 3D de référence et l'image 3D au temps t . Deux pics s'individualisent au cours du temps sur les histogrammes entre 500 et 2500 HU. Le premier pic est centré sur la valeur de 1000 HU qui correspond aux voxels contenant initialement de l'air et qui sont totalement remplacés par de l'eau au temps t . Ce pic nous indique la présence d'eau libre dans l'échantillon. Cependant, contrairement aux résultats présentés par Sammartino et al. (2012), un deuxième pic situé à la valeur de 2200 HU apparaît et correspond aux voxels contenant initialement de l'air et remplacés par de la matrice. Ce pic est interprété comme un gonflement de la matrice argileuse après hydratation

des cations interfoliaires des minéraux argileux gonflants de type smectite. Dans cette étude, nous n'avons pas distingué les zones d'eau libre des zones de gonflement de la matrice, en considérant l'ensemble de ces deux zones (deux pics sur l'histogramme) comme des indicateurs du passage de l'eau durant la pluie. Le troisième pic au-delà de 2800 HU est dans le bruit de fond (Figure III-1) (i.e. très faible nombre de voxels devant les autres pics d'intérêts).

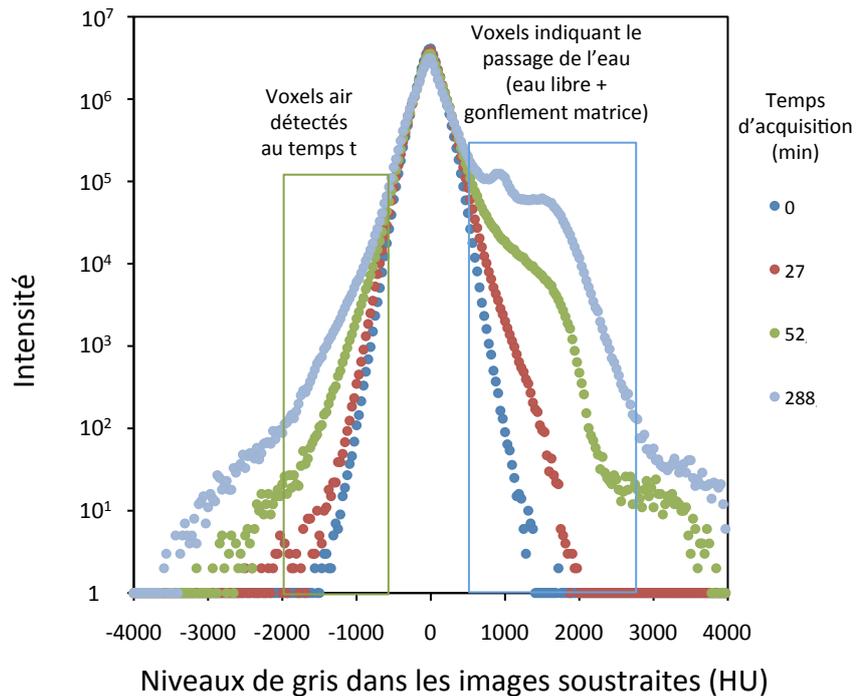


Figure III-1 Distribution des niveaux de gris des images 3D différences (chaque image 3D au temps t est soustraite à l'image 3D de référence) au cours de l'essai d'infiltration. Seulement 7 des 36 histogrammes sont présentés ici. Les limites de seuillage ont été fixées en fonction de l'évolution de la forme des histogrammes à -700 et -2000 HU pour l'air et à 440 et 2800 HU pour les zones marquées par le passage de l'eau.

Tableau III-1 : Valeurs théoriques du niveau de gris des voxels remplis d'air et remplacés par de l'eau ou de la matrice (en proportions variables) durant l'infiltration de l'eau de pluie dans la colonne.

état initial (image 3D références)	état final (image 3D (t))	Niveau de gris théorique des images 3D différences (HU)
air	eau (100 %)	1000
air	eau (50 %) + air (50%)	500
air	air (100%)	0
air	matrice (50 %) + air (50%)	1100
air	matrice (100 %)	2200
air	eau (50 %) + matrice (50 %)	1600

III.2.2. Conditions expérimentales

Deux colonnes de sol non remanié ont été échantillonnées dans un horizon E de Luvisol développé sur loess, entre 35 et 50 cm de profondeur dans un champ cultivé au lieu-dit « la Brosse » (Tableau II-1). Les colonnes sont prélevées dans des cylindres en PVC d'un diamètre intérieur de 135 mm et de 150 mm de hauteur. Après le prélèvement, une grille en PVC comportant des trous de 2,5 mm tous les 2 mm et un voile poreux de 100 µm sont collés à la base du tube. Le tube est ensuite collé sur un porte-échantillon cylindrique protégeant le bas de la colonne. La teneur en eau initiale des colonnes étudiées est en dessous de la capacité au champ (0,15 et 0,13 respectivement pour la colonne L6-3 et L6-4).

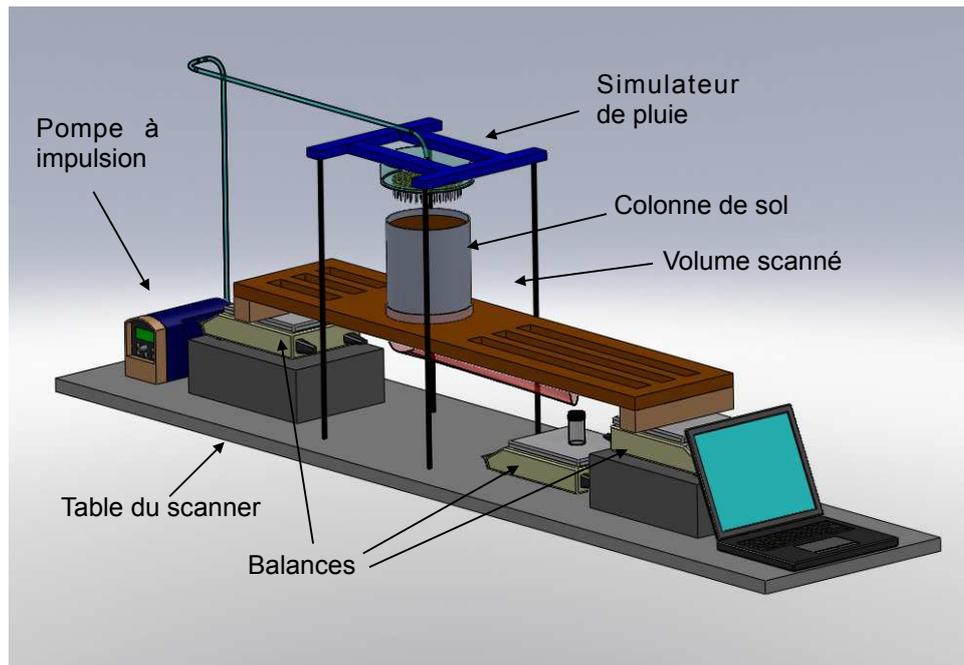


Figure III-2 Dispositif expérimental permettant de simuler des pluies tout en réalisant des acquisitions 3D de la colonne, adaptée d'après Sammartino et al. (2012).

Les colonnes de sol sont placées sur un support rigide en bois supporté par deux balances. Un simulateur de pluies connecté à une pompe à impulsion est maintenu fermement au-dessus de la colonne et applique un créneau de pluie (Figure III-2).

L'intensité de la pluie imposée par la pompe à impulsion est de 6 mm h^{-1} durant 5 h. De l'eau dé-ionisée est utilisée pour l'eau de pluie, ses propriétés physico-chimiques (pH et salinité) étant proches de celles des pluies naturelles de la région d'origine du sol considéré (Quenard, 2011). Le drainage est laissé libre en bas de colonne. Des séquences d'acquisitions résolues dans le temps composées d'au moins 30 images 3D pour chaque colonne sont obtenues durant l'essai de pluie. Trois images 3D sont prises avant la pluie afin de définir l'état hydrique et structural initial. Pendant la pluie, les acquisitions ont lieu environ toutes les 3 minutes.

III.2.3. Traitement des images 3D résolues dans le temps

Le traitement des séries d'images 3D a été réalisé au moyen de procédures automatiques regroupées dans un programme Java et dans un plugin ImageJ (programme libre de traitement d'image en Java, Rasband, 1997). Le traitement a été adapté de Sammartino et al. (2012). Les images 3D ont été recoupées perpendiculairement à l'axe de la colonne et ré-échantillonnées afin d'obtenir des voxels cubiques de 410 μm de côté. Sur toutes les images et toutes les coupes, les zones correspondant au tube PVC entourant les colonnes sont éliminées. A la suite de cela, les sections de colonnes sont recalées coupe à coupe afin de corriger les décalages possibles liés au biais de la colonne par rapport à la verticale au moment de l'acquisition. Une régression linéaire est réalisée sur les centres de masse des sélections dans deux plans perpendiculaires et ces droites sont utilisées pour corriger la verticalité de l'axe de la colonne. Aucune correction d'illumination n'a été nécessaire en raison de l'acquisition hélicoïdale et de la calibration en HU. Cependant, des artefacts "en X" sont légèrement visibles sur quelques coupes centrales verticales. Ces artefacts sont causés par la taille variable de l'objet scanné dans le plan vertical, la colonne étant perpendiculaire à l'axe de déplacement de la table du scanner (Figure III-2) (Akin and Kovscek, 2003). Il en résulte une augmentation du bruit dans les sections horizontales ré-échantillonnées. Un filtre médian sur 8 voisins est appliqué afin de réduire le bruit tout en préservant les limites des macropores (Wildenschild and Sheppard, 2013).

III.2.4. Traitement des données

III.2.4.1. *Création des images 3D de fréquence de présence de l'eau*

Nous considérons que la macroporosité active est la macroporosité dans laquelle l'eau est la plus fréquemment détectée au cours d'un évènement pluvieux. Nous avons obtenu une image 3D de la fréquence des voxels affectés par le passage de l'eau, sur l'ensemble de l'évènement pluvieux (en pourcentage du temps

de l'essai), en sommant les images acquises à chaque acquisition. Plus spécifiquement, pour une séquence de n images 3D acquises durant l'évènement pluvieux, si un voxel de coordonnées (x, y, z) est identifié comme ayant contenu de l'eau un nombre de fois i dans la séquence des n images 3D, la fréquence de ce voxel est égale à $100 * \frac{i}{n}$.

III.2.4.2. *Calcul des paramètres morphologiques et topologiques*

Des paramètres de forme et de taille (i.e. morphologiques) et de connectivité (i.e. topologiques) caractérisant les macropores et la structure globale des colonnes ont été obtenus grâce au logiciel commercial AvizoFire¹. Les caractéristiques suivantes ont notamment été calculées : la macroporosité (volume des macropores rapporté au volume total de la colonne) ; la densité de macropore (nombre de macropores rapporté au volume total de la colonne) ; la densité de surface (surface totale 3D des macropores rapportée au volume total de la colonne) ainsi que les caractéristiques spécifiques de la population de macropores telles que la distribution des volumes et des surfaces. Le réseau de macropores peut être squelettisé (ici en calculant les maxima locaux de la carte de distance, puis en érodant les objets jusqu'à ne garder que les voxels correspondant à ces maxima locaux). Il est alors possible de calculer des caractéristiques de longueur pour chaque macropore (Luo et al., 2010) et la densité de longueur (longueur totale des macropores rapportée au volume total de la colonne). La connectivité d'un système de macropores n'a pas de définition standardisée, son évaluation peut grandement être affectée par l'échelle d'observation, l'échelle des objets considérés et du point de vue numérique, par le choix du voisinage et le seuillage des objets (Luo et al., 2010; Capowiez et al., 2014). Nous avons choisi d'utiliser le nombre d'Euler-Poincaré pour estimer la connectivité de notre système (Vogel, 1997; Vogel and Roth, 2001; Arns et al., 2002; Vogel et al., 2010; Katuwal et al., 2015).

¹ Version 8.0.1. Visualization Sciences Group, SAS. <http://www.vsg3d.com/>.

III.3. Résultats et discussion

La répartition spatiale et temporelle de l'eau détectée dans la structure du sol est utilisée afin de caractériser les processus d'écoulement et de déterminer précisément la macroporosité active. Les caractéristiques de la structure totale, la partie active et non-active de la macroporosité sont ensuite comparées afin de déterminer quelles caractéristiques morphologiques et topologiques sont déterminantes pour l'écoulement de l'eau dans un macropore. Pour finir, nous avons recherché des caractéristiques de la structure totale permettant de s'approcher de la macroporosité active pour ce type de sol, permettant ainsi d'estimer un fonctionnement effectif du sol sans passer par la technique lourde et coûteuse développée précédemment.

III.3.1. Quels processus d'écoulement dans les macropores ?

III.3.1.1. *Processus d'écoulement à l'échelle de la colonne*

L'établissement et la stabilisation de l'écoulement dans les colonnes de sol sont suivis au cours du temps par le rapport entre le volume des zones (i.e. les voxels) affectées par l'eau sur le volume de macroporosité (Figure III-3). Ce rapport, bien qu'incluant indifféremment les zones d'eau libre et le gonflement de la matrice, permet d'évaluer la progression et la stabilisation de l'écoulement à l'échelle de la colonne. Ce rapport augmente rapidement au début de l'essai pour les deux colonnes, puis atteint progressivement un plateau à 30 et 40% respectivement pour les colonnes L6-3 et L6-4. La première partie de la tendance décrit le régime transitoire de l'écoulement, puis le plateau matérialise l'établissement du régime d'écoulement pseudo-permanent.

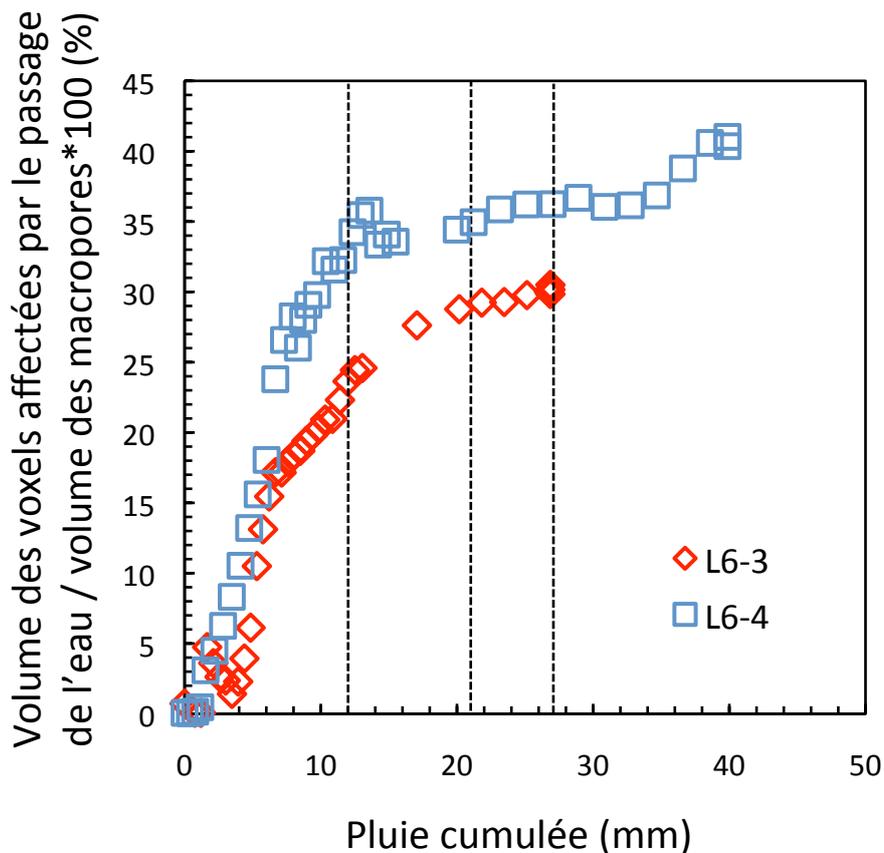


Figure III-3 Evolution du volume des voxels affectés par le passage de l'eau rapporté au volume des macropores, en fonction de la pluie cumulée. Les lignes pointillées matérialisent les quantités de pluies cumulées pour lesquelles des profils sont présentés Figure III-4a).

III.3.1.2. Variation avec la profondeur des processus d'écoulement

De la même façon, nous pouvons suivre selon la profondeur de la colonne (i.e. dans chaque coupe), l'évolution du volume des zones affectées par l'eau rapporté au volume de la macroporosité, et ce, pour chaque acquisition durant la pluie. Pour la colonne L6-4, des profils sont présentés pour trois temps (correspondant à 12 ; 21,5 et 27 mm de pluie). Ils sont superposés et indiquent que le régime d'écoulement pseudo-permanent est atteint dès 12 mm de pluie cumulée Figure III-4a). Pour la colonne L6-3, le profil après 12 mm de pluie ne se superpose pas avec les deux derniers profils, suggérant que le régime pseudo-permanent n'est atteint qu'entre 12 et 21,5 mm de pluie.

Le volume affecté par l'eau en comparaison de celui de la macroporosité est variable en fonction de la profondeur de la colonne : il correspond en moyenne à 30 % du volume de la macroporosité jusqu'à 100 mm de profondeur, puis augmente pour atteindre quasiment 100 % en bas de colonne. L'augmentation de ce rapport est probablement causée par les conditions de drainage libre en bas de colonne, causant une rupture de la conductivité hydraulique (Sharma et al., 2008; Lewis and Sjöstrom, 2010). D'autre part, quelques pics sur ces profils, suggérant des zones particulièrement affectées par le passage de l'eau, sont observés à différentes profondeurs de la colonne. Ils représentent sans doutes des processus d'écoulements particuliers, comme des zones de stockage ou de canalisation du flux.

III.3.1.3. *Variations des processus d'écoulement le long d'un macropore*

La répartition des zones affectées par le passage de l'eau dans les macropores est illustrée sur quelques exemples représentatifs et permet d'analyser localement, de façon qualitative, les processus d'écoulement à l'échelle du macropore (Figure III-4b et c). La répartition des zones affectées par le passage de l'eau y est illustrée sur des coupes, par une information de fréquence de présence de l'eau dans chaque voxel. Dans l'ensemble, les macropores participant à l'écoulement montrent des zones affectées par le passage de l'eau qui sont fréquemment localisées sur une fraction réduite de leur paroi, i.e. un écoulement insaturé. Néanmoins en bas de colonne, certains macropores semblent se saturer localement et temporairement (Figure III-4b). Enfin, la répartition des zones affectées par le passage de l'eau, sur une coupe verticale de la colonne (Figure III-4c), montre que l'écoulement est connecté depuis la zone de surface (i.e. les 1,5 premiers cm) jusque dans les macropores d'origine biologique sous-jacents.

Différents types d'écoulements gravitaires et insaturés ont été mis en évidence dans les travaux de Wan and Tokunaga (1997) ; Kneafsey and Pruess (1998) ; Ghezzehei and Or (2005) ; Su et al. (2001) qui décrivent des écoulements insaturés complexes, allant de films réguliers, à des ruisselets et des gouttes intermittentes. Dans notre étude, la répartition spatiale et temporelle de l'eau dans

les macropores - à cette résolution spatiale - est cohérente avec les écoulements sous la forme de films et de ruisselets décrits dans la littérature. D'autre part nos images montrent que les premiers centimètres du sol sont déterminant pour assurer la connectivité et la distribution de l'eau depuis la surface du sol vers les macropores verticaux sous-jacents. Cette fonction de distribution puis de canalisation de l'écoulement en profondeur, a été également observée par tomographie d'absorption X dans l'étude de Vanderborght et al. (2002).

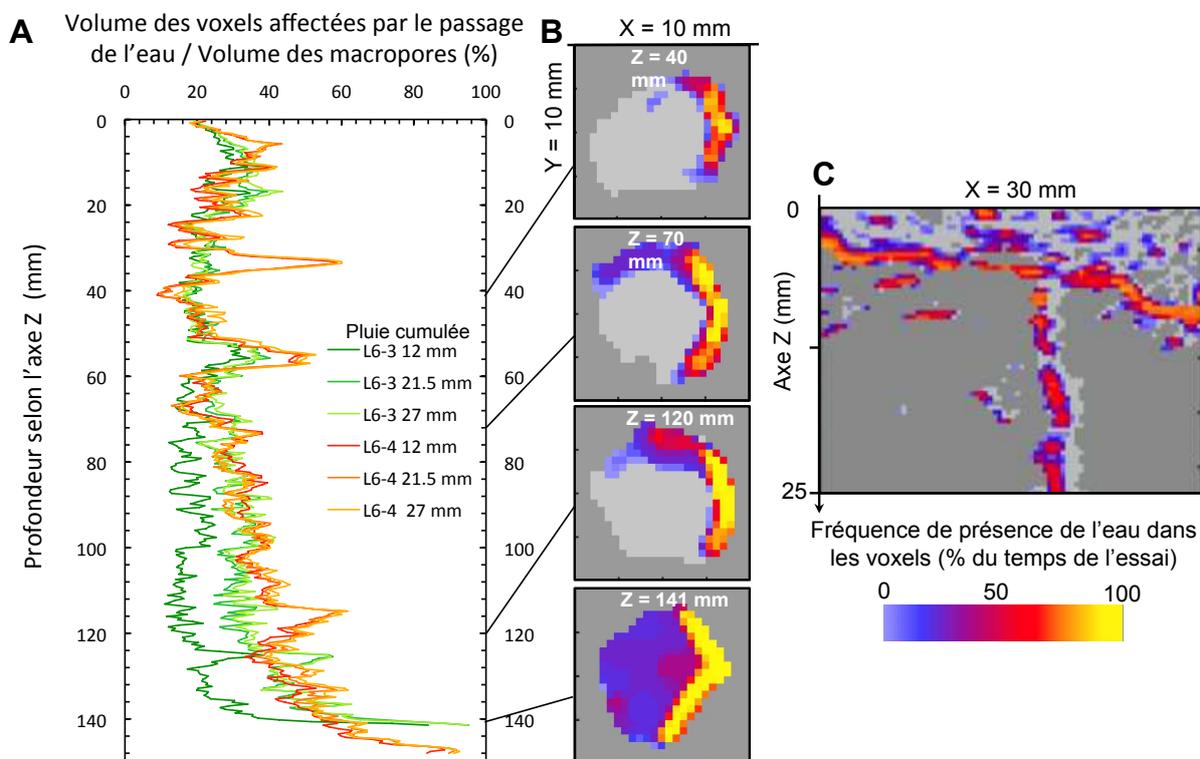


Figure III-4 Distribution des zones affectées par le passage de l'eau dans les colonnes (échelle colorée) : a) en fonction de la profondeur de la colonne et pour trois temps au cours de la pluie (i.e. 12 mm, 21,5 mm et 27 mm de pluie). b) au sein d'un macropore actif (sections horizontales, i.e. perpendiculaires à l'axe-Z). c) dans la zone de subsurface proche du sommet de la colonne (section verticale, i.e. parallèle à l'axe-Z).

Nous sommes actuellement limités par les résolutions spatiales (400 μm) et temporelles (3 min entre chaque acquisition) disponibles dans notre configuration expérimentale, ne permettant pas de rendre compte de toute la dynamique et de toute la complexité des processus d'écoulement. Cependant, l'approche employée

dans cette étude, en regroupant la répartition de l'eau durant l'essai de pluie sous forme de fréquence permet de déduire de façon robuste, de l'échelle de la colonne à celle du macropore, les zones où l'écoulement de l'eau a été le plus fréquent et les processus d'écoulement les plus probables, compte tenu de la résolution de la méthode. Cette approche va être utilisée par la suite afin de sélectionner et de caractériser la macroporosité active dans toute la colonne.

III.3.2. Définition et caractérisation de la macroporosité active

Nous considérons que la macroporosité active est la macroporosité la plus visitée par l'eau à la résolution de notre méthode. Ainsi la répartition spatiale de la fréquence de présence de l'eau permet de discriminer la macroporosité active du reste de la macroporosité.

III.3.2.1. *Sélection des zones les plus fréquemment affectées par le passage de l'eau*

La première étape de l'identification de la macroporosité active consiste à sélectionner les zones où l'eau a été le plus fréquemment détectée.

Ainsi, nous avons calculé le pourcentage du temps de l'essai pour lequel chaque voxel est affecté par le passage de l'eau (Figure III-5). Les voxels affectés peu de fois par l'eau durant l'essai de pluie peuvent relever du bruit méthodologique, comme le montre leur distribution très morcelée dans l'ensemble du volume de la colonne (Figure III-5, encart A). Nous ne considérons donc que les zones affectées par le passage de l'eau durant plus de 60% du temps de l'essai (Figure III-6b). Parmi les zones les plus fréquemment affectées par l'eau, certaines sont encore de très petites tailles et déconnectées les unes des autres, suggérant la persistance d'un bruit gaussien dans l'information spatiale. Afin de réduire ce bruit, les objets inférieurs à 27 voxels (soit environ 2 mm³) ont été supprimés des images (Figure III-6c).

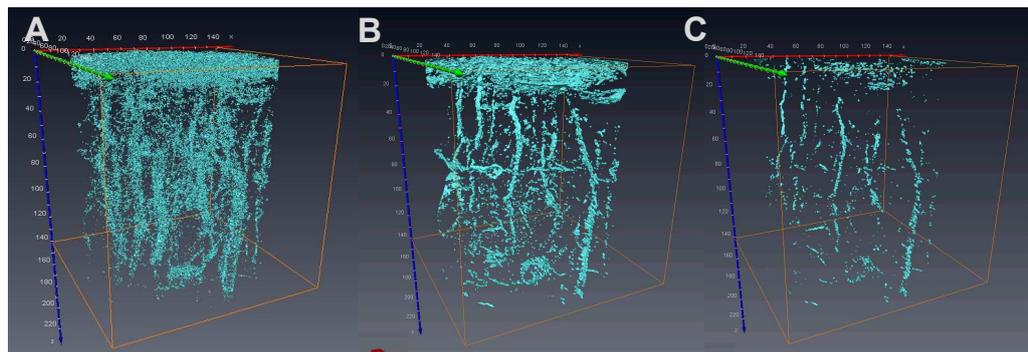
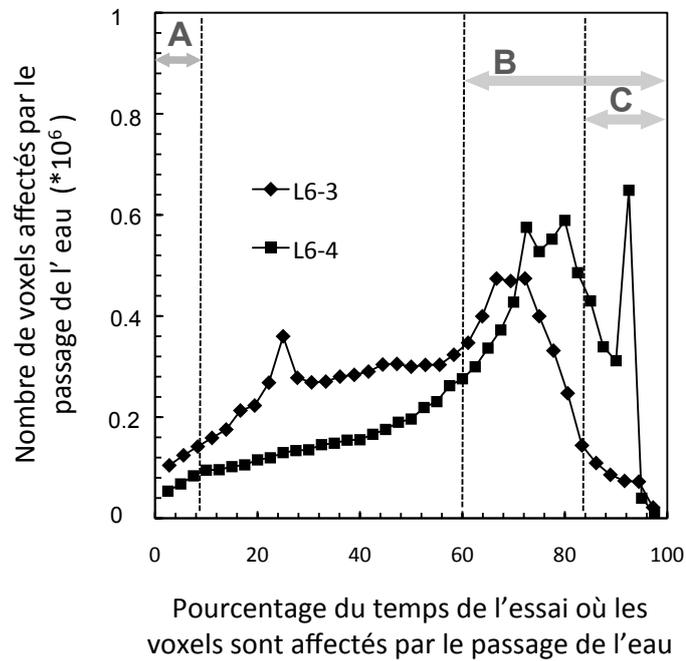


Figure III-5 Pourcentage du temps de l'essai où les voxels sont affectés par l'eau. Les lignes pointillées démarquant les zones A, B et C représentent des seuils pour lesquels les voxels (exemple de la colonne L6-3) sont représentés spatialement dans les encarts A, B et C, en bas de figure. Les seuils A, B et C représentent respectivement les voxels où l'eau est détectée moins de 10% du temps, plus de 60 et plus de 85 % du temps de l'essai.

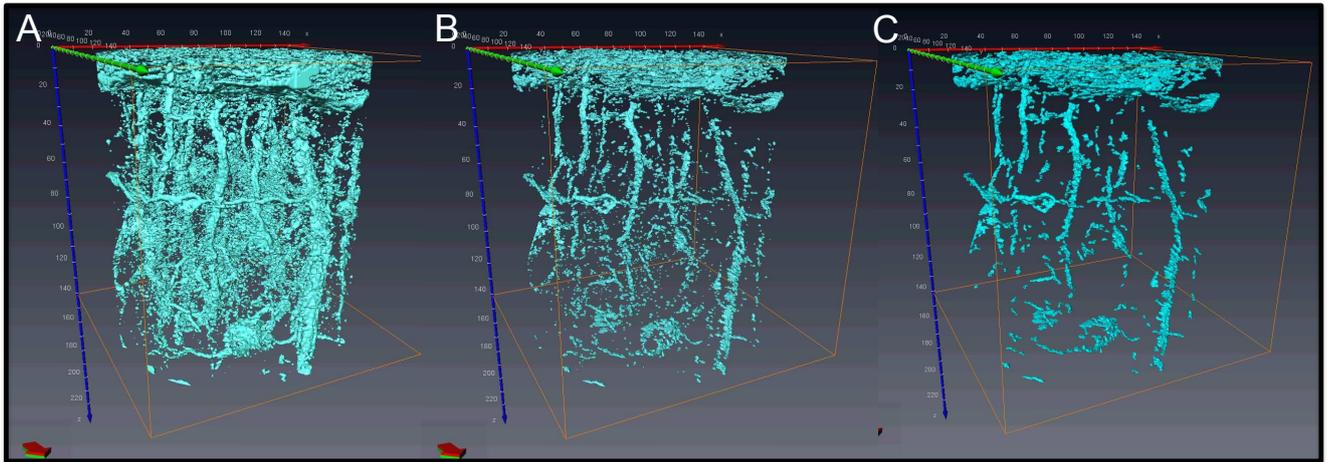


Figure III-6 Distribution spatiale des zones affectées par le passage de l'eau pour la colonne L6-3. a) Totalité des zones affectées par le passage de l'eau sur l'essai de pluie ; b) zones où l'eau est détectée plus de 60 % du temps de l'essai ; c) zones où l'eau est détectée plus de 60 % du temps de l'essai, après suppression des zones de volume inférieur à 27 voxels.

III.3.2.2. *Sélection de la macroporosité active dans la structure totale*

La seconde étape du processus de sélection de la macroporosité active consiste à utiliser les zones où l'eau a été le plus fréquemment détectée, obtenues comme décrit précédemment Figure III-6), afin d'extraire l'ensemble des macropores dont au moins une partie du volume a été fréquemment visitée par l'eau (Figure III-7). Pour ce faire, les zones où l'eau a été détectée le plus fréquemment sont superposées avec la structure totale. Une première observation qualitative montre que ces zones sont préférentiellement localisées dans des grands macropores d'origine biologique et dans la zone de foisonnement de surface (Figure III-7b). Puis, une reconstruction géodésique 3D est effectuée à partir de ces zones afin de ne sélectionner dans la structure totale que la macroporosité active (Figure III-7c).

Nous pouvons revenir ici sur le sens porté et sur les relations spatiales entre les zones où l'eau a été vue le plus fréquemment et la structure des colonnes de sol. Les zones où l'eau a été vue le plus fréquemment intègrent sans distinction plusieurs statuts de l'eau et plusieurs processus d'écoulement : ces zones peuvent représenter des zones de stockage d'eau libre (i.e. d'engorgement), des zones d'écoulement préférentiel ou de gonflement. Cependant la superposition de la structure totale et de ces zones (Figure III-7b) met en évidence des relations spatiales étroites avec les macropores. La morphologie de ces zones et leur répartition dans la structure aux diverses échelles d'observation (i.e. à l'échelle de la colonne Figure III-7b et à l'échelle du macropore Figure III-4b et c) permettent néanmoins de privilégier des processus d'écoulements préférentiels sous forme de ruisselets dans les grands macropores biologiques, sans exclure pour autant l'existence ponctuelle de zones de stockage dans la zone de foisonnement de surface ou dans des macropores non percolant.

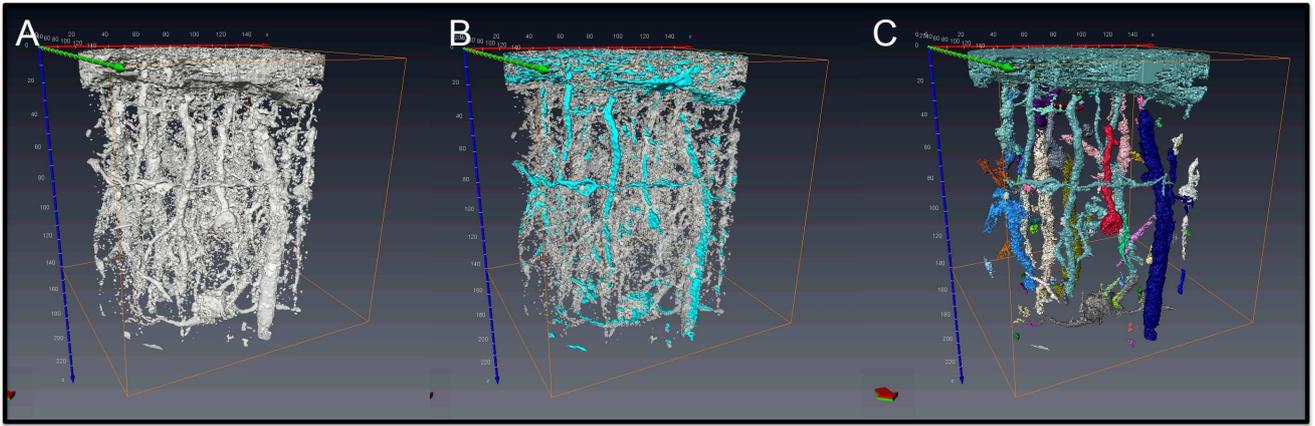


Figure III-7 Etapes successives de reconstruction de la macroporosité active pour la colonne L6-3. Rendus volumiques 3D de a) la structure totale (i.e. macroporosité seuillée à partir de l'image 3D référence) ; b) la superposition de la structure totale et des zones affectées le plus souvent par l'eau ; c) la macroporosité active après reconstruction géodésique 3D (\mathcal{R}). Sur l'image 3D, chaque macropore indépendant a été labélisé par une couleur distincte.

La reconstruction géodésique 3D (\mathcal{R}) consiste en l'itération d'une dilatation géodésique (δ) de zones de considérées comme des marqueurs (ici les zones affectées fréquemment par le passage de l'eau) (W) dans un masque constitué par la structure totale (S), jusqu'à l'idempotence (i.e.) (Serra, 1982; Beucher, 2001) : $\mathcal{R}_S(W) = \delta_S^{+\infty}(W) = \lim_{\lambda \rightarrow +\infty} \delta_{S,\lambda}(W)$

Afin de valider notre méthode de sélection de la macroporosité active, nous avons calculé la proportion de l'ensemble des zones affectées par le passage de l'eau, effectivement localisées dans la macroporosité active : la macroporosité active contient 79 % de la totalité des voxels affectés par l'eau pour la colonne L6-3 et 92 % de ceux de la colonne L6-4. La macroporosité active est donc bien représentative de la majorité des zones affectées par le passage de l'eau durant l'essai.

L'approche employée nous a permis de sélectionner la macroporosité active dans la structure totale, grâce aux zones où l'eau a été le plus fréquemment détectée. Nous sommes maintenant en mesure de caractériser ces différentes structures afin de mettre en évidence leurs différences ou leurs similitudes.

III.3.3. Comparaison de la macroporosité active, non-active et de la structure totale

Grace à l'approche employée, nous avons sélectionné dans la structure totale la macroporosité active et la macroporosité non-active qui est son complémentaire (Figure III-8). Notre objectif est de caractériser quantitativement ces différentes structures afin de les comparer.

La connectivité de la macroporosité active (estimée par le nombre d'Euler), est plus importante que celle de la structure totale et de la macroporosité non-active (Tableau III-2). Rappelons que plus le nombre d'Euler est faible, plus la connectivité est élevée (Vogel and Roth, 2001). D'autre part, la densité de macropores (nombre de macropores par unité de volume) est très faible ($6 \text{ à } 12 \times 10^{-5}$ macropores mm^3) dans la macroporosité active en comparaison de la structure totale ou non-active (environ $630 \text{ à } 720 \times 10^{-5}$ macropores mm^3). La macroporosité active correspond à seulement 1 à 2% du nombre total de macropores de la structure totale (Tableau III-2). La macroporosité active, bien que constituée d'un très faible nombre de macropore représente la majeure partie du volume macroporeux (82 à 89 %), de la surface totale (69 à 81 %) et de la longueur totale (82 à 95 %) de la structure totale (Tableau III-2). Le volume médian des macropores constituant les structures totales et non-actives est d'environ $0,2 \text{ mm}^3$ alors que ceux de la macroporosité active sont significativement plus grands (ANOVA test de Fisher au seuil de 5%) avec un volume

médian de 30 mm³. Les surfaces et longueurs médianes des macropores constituant les structures totales et non-actives (respectivement environ 1 mm² et 3,5 mm) sont significativement plus petites que celles des macropores actifs (respectivement environ 60 mm² et 9 mm) (Figure III-9).

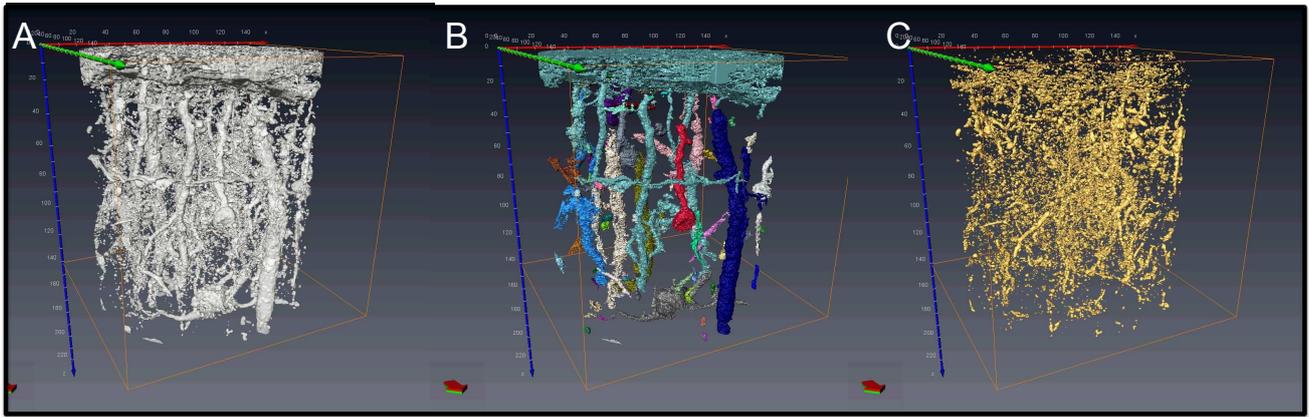


Figure III-8. Rendus volumiques pour la colonne L6-3 de a) la structure totale b) la macroporosité active c) la macroporosité non-active (i.e. la partie complémentaire de la macroporosité active).

Tableau III-2 Caractéristiques des structures totales, de la macroporosité actives, non-actives et des macropores supérieurs à 100 ou 60 mm³ respectivement pour la colonne L6-3 et L6-4.

	Colonne N°.	Euler (-)	Densité de macropore (x 10 ⁻⁵) (no. mm ⁻³)	Macroporosité (mm ³ mm ⁻³)	Densité de surface (mm ² mm ⁻³)	Densité de longueur (x 10 ⁻³) (mm mm ⁻³)
Structure totale de référence	L6-3	4684	632	0,06	0,11	50,24
	L6-4	9600	719	0,04	0,08	14,05
Structure active	L6-3	-6054	6	0,05	0,09	47,90
	L6-4	-5525	12,5	0,03	0,06	11,58
Structure non active	L6-3	4839	626	0,01	0,02	2,34
	L6-4	11677	706	0,01	0,03	2,47
Macropores > 100 mm ³	L6-3	-5644	1,4	0,05	0,08	47,4
Macropores > 60 mm ³	L6-4	-2230	4	0,03	0,05	8,6
Caractéristiques de la structure active relativement à celles de la structure totale (%)	L6-3	nd	0,96	89,01	81,12	95,34
	L6-4	nd	1,74	81,99	68,58	82,45

La structure totale et les macroporosités actives et non-actives sont constituées d'un assemblage de plusieurs types de macropores (Figure III-8) dont l'origine semble variée. Nous pouvons alors relier leur répartition, leur forme et leur origine probable à leurs caractéristiques. Les macropores les plus volumineux, longs et verticaux sont vraisemblablement d'origine biologique (passage de racines et galeries vers de terre). Ils sont pour partie connectés aux premiers centimètres supérieurs de la colonne, (encore appelée « zone de foisonnement »). Cette dernière présente un agencement dense de macropores déjà observé dans du sol non remanié par tomographie d'absorption X par Vanderborght et al. (2002). D'autre part, les petits macropores distribués dans l'ensemble du volume sont qualifiés de macropores inter-agrégats, et leur origine est attribuée à des cycles d'humectation-dessiccation et de gel-dégel par analogie avec les conclusions de Luo et al. (2010) et Naveed et al. (2013b).

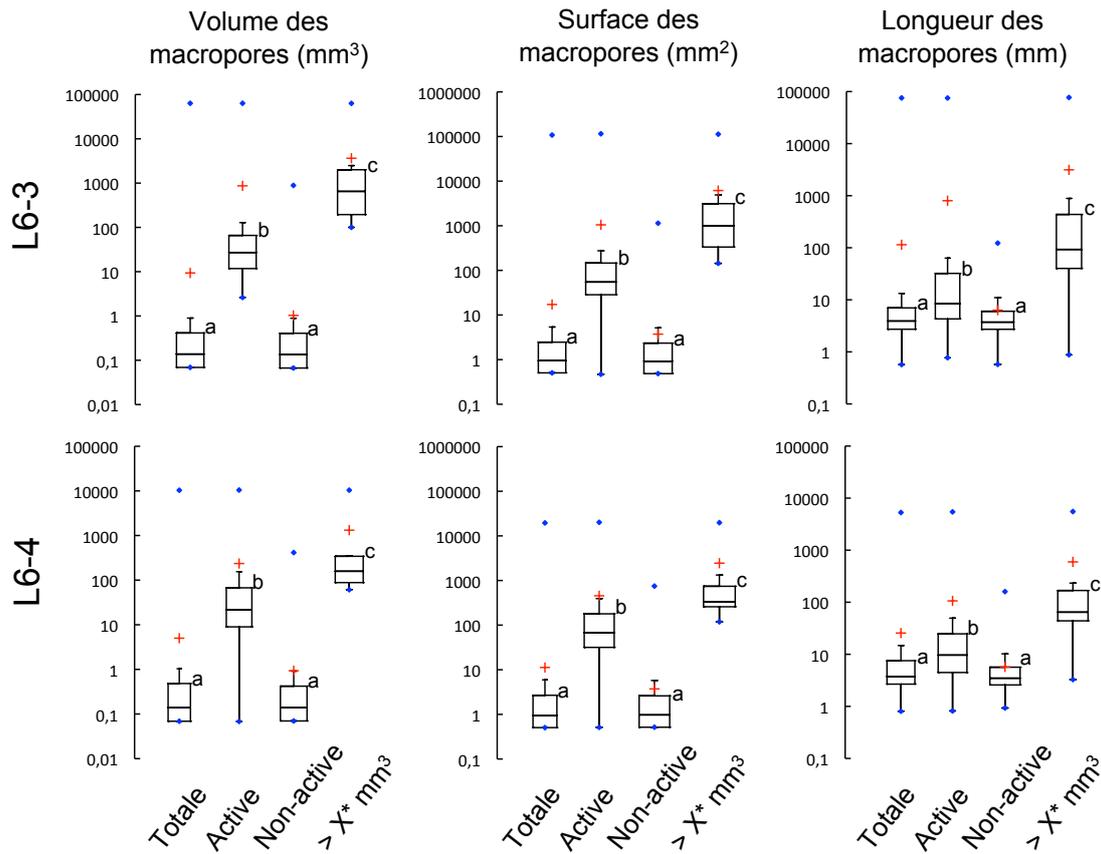


Figure III-9 Caractéristiques des structures totales, de la macroporosité active, non-active et des macropores supérieurs à X^* (i.e. 100 et 60 mm³ respectivement pour la colonne L6-3 et L6-4). La croix rouge représente la moyenne de chaque caractéristique, les points bleus représentent le maximum et le minimum, la boîte est composée de la médiane (trait central) ainsi que du premier quartile et du 3^{ème} quartile (base et sommet de la boîte, respectivement). Les indices a, b et c représentent les résultats de l'ANOVA (test de Fisher au seuil de 5%).

De notre analyse des différences quantitatives entre caractéristiques calculées sur la macroporosité active, non-active et la structure totale, nous suggérons que certaines caractéristiques judicieusement choisies, telles que le volume de chaque macropore et leur connectivité, sont particulièrement importantes pour distinguer les macropores actifs des macropores non-actif.

III.3.4. Comment estimer la macroporosité active sur la base de caractéristiques de la structure totale ?

La macroporosité active des colonnes (i.e. la partie assurant leur fonctionnement hydrique) étant identifiée, notre objectif est d'utiliser une ou des caractéristiques de la structure totale, permettant sans passer par la technique lourde et coûteuse développée précédemment, d'estimer la macroporosité active.

Nous cherchons donc par la suite à obtenir la meilleure estimation de la structure active au moyen d'un double critère de volume des macropores et de connectivité du réseau de macropores. D'une part, en sélectionnant dans la structure totale les macropores supérieurs à un volume seuil (v) et d'autre part en calculant, pour chaque volume seuil (v), le nombre d'Euler (i.e. connectivité du réseau) des macropores supérieurs à ce seuil. Afin de définir le seuil optimal de volume des macropores, la différence entre la structure active et les macropores supérieurs au volume seuil (v) est calculée en fonction de ce volume seuil et nous permet de quantifier l'erreur faite par l'estimation (Figure III-10). Cette fonction passe par un minimum qui définit la meilleure estimation de la structure active par les macropores supérieurs au volume seuil. Le volume seuil optimal est relativement proche pour les deux colonnes, compte tenu de l'étendue des distributions de volume des macropores (i.e. sur plusieurs décades) et correspond à une plage de volume de macropores allant de 60 à 300 mm³ (Figure III-10). En parallèle, le nombre d'Euler diminue fortement (i.e. la connectivité augmente) lorsque l'on augmente le seuil, puis atteint un minimum lorsque les valeurs de volume seuil se situent dans la plage optimale. Ce deuxième critère de connectivité permet de préciser le volume seuil optimal à 60 et 100 mm³ respectivement pour la colonne L6-4 et L6-3.

L'erreur associée à l'estimation de la macroporosité active par les critères de volume (le seuil v) et de connectivité (Euler) montre que le volume résiduel $Diff(v)$ au seuil optimal (100 et 60 mm³ respectivement pour L6-3 et L6-4) s'élève à 4,5 % du volume de la macroporosité active pour la colonne L6-3 et 10 % pour la colonne L6-4. Cette erreur peut s'interpréter comme la somme de deux composantes (Figure III-11c) : d'une part l'erreur causée par des macropores actifs inférieurs à 100 mm³

et d'autre part l'erreur causée par des macropores non-actifs supérieurs à 100 mm^3 . Les petits macropores ne sont en effet pas systématiquement inactifs, certains participent fréquemment à l'écoulement. La résolution de notre méthode étant limitée, les chemins d'écoulement de l'eau qui alimentent ces petits macropores actifs ne peuvent vraisemblablement pas tous être détectés. D'autre part, même si la majorité des grands macropores verticaux d'origine biologique sont susceptibles de participer activement à l'écoulement, certains n'y participent pas s'ils ne sont pas connectés à la surface supérieure de la colonne (i.e. zone de foisonnement) ou à d'autres macropores actifs (Figure III-11c).

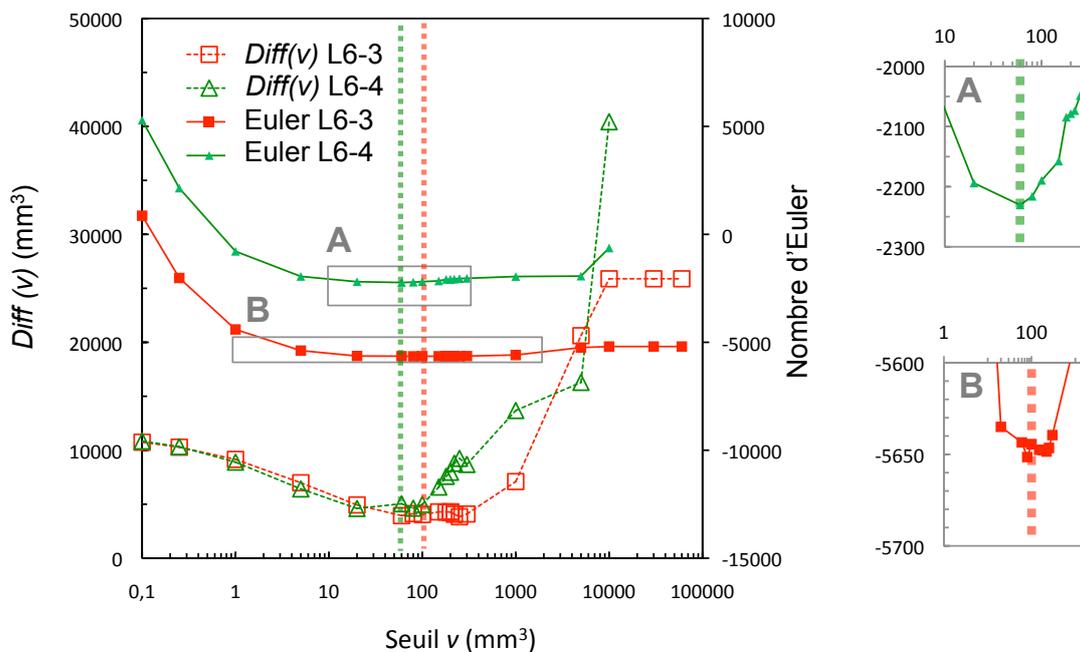


Figure III-10 Evolution de $Diff(v)$ (i.e. la différence entre la structure active et les macropores supérieurs à v) et du nombre d'Euler des macropores supérieurs à v , en fonction de v , le volume seuil des macropores. Les lignes pointillées verticales indiquent les valeurs optimales de v (i.e. Euler et $Diff(v)$ minimum)

Nous pouvons également comparer les caractéristiques de la macroporosité active avec les caractéristiques des ensembles de macropores supérieurs à respectivement 100 et 60 mm^3 pour les colonnes L6-3 et L6-4. On constate pour ces

ensembles de macropores que la macroporosité, la densité de macropores, de surface et de longueur sont proches de celles de leur macroporosité active respective (Tableau III-2), bien que les valeurs moyennes du volume, de la surface et de la longueur de leurs macropores soient significativement plus élevées (ANOVA test de Fisher au seuil de 5%) Figure III-9. Par ailleurs, le choix du seuil, entre 60 ou 100 mm³, a un impact négligeable sur les caractéristiques de ces structures (résultats non présentés).

Ces résultats indiquent qu'une estimation de la macroporosité active - telle nous nous l'avons définie dans ce travail – est possible sur la base de critères de volume et de connectivité (i.e. Euler) des macropores. Les macropores supérieurs à ce volume seuil possèdent des caractéristiques raisonnablement similaires à celles de la macroporosité active, à cette résolution et pour ce type de sol. Ces résultats sont concordants avec d'autres études qui mettent en avant la macroporosité comme une caractéristique déterminante vis-à-vis de l'écoulement de l'eau et des propriétés effectives des sols (Vogel and Roth, 2001; Vervoort and Cattle, 2003; Elliot et al., 2010; Luo et al., 2010; Köhne et al., 2011; Arthur et al., 2012, 2013; Paradelo et al., 2013; Naveed et al., 2013a, b; Capowiez et al., 2014).

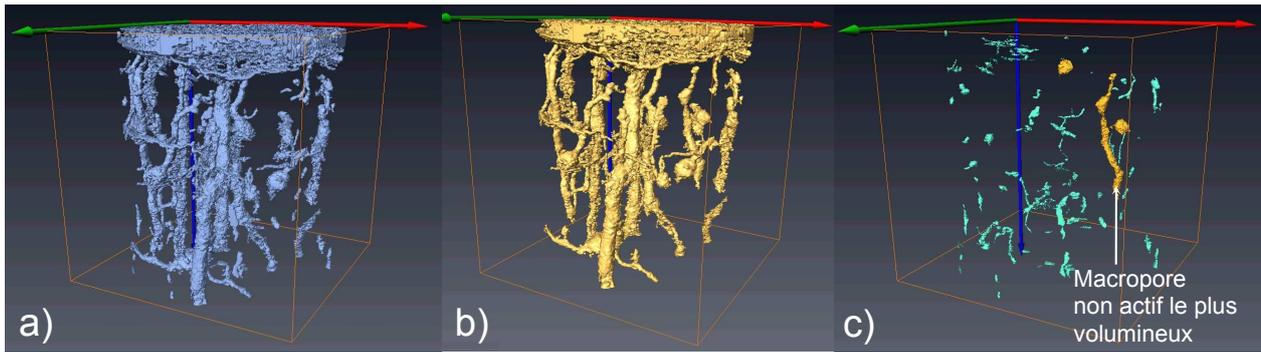


Figure IIII-11 Exemple de la colonne L6-3 a) Macroporosité active b) Macropores de volume supérieur à $v = 100 \text{ mm}^3$ c) Différence entre les deux images 3D calculée par l'équation :

$$Diff(v) = \overline{\text{Macroporosité active}} \cup \overline{\text{Structure totale}(v)}$$

Avec v le seuil de volume des macropores appliqué sur la structure totale. En vert sont figurés les macropores actifs inférieurs à 100 mm^3 et en jaune les macropores non-actifs supérieurs à 100 mm^3 .

III.4. Conclusion

La réalisation de séquences d'images 3D de tomographie d'absorption X sur des colonnes de sol non remanié nous permet de suivre les processus d'écoulement, à l'échelle de la colonne. La structure des premiers centimètres supérieurs de la colonne a un rôle clef dans la distribution de l'écoulement dans les différents macropores. Dans ces derniers les écoulements insaturés ont lieu sous forme de ruisselets.

Notre méthodologie permet d'extraire la macroporosité active des colonnes de sol non remanié sur la base des zones où l'eau est détectée le plus fréquemment durant la pluie, compte tenu de la résolution de la méthode. Cette macroporosité active est représentative de la majorité des zones affectées par le passage de l'eau durant l'essai. Nous suggérons que la notion de macroporosité active devrait être prise en compte pour progresser dans la modélisation du transfert d'eau dans les sols.

La macroporosité active est par ailleurs constituée d'un faible nombre de macropores volumineux, d'origine biologique, connectés à la zone de foisonnement de surface, alors que la macroporosité non-active est constituée principalement de nombreux petits macropores isolés, vraisemblablement inter-agrégats. Compte tenu de la résolution spatiale et temporelle limitée de la méthode, un ensemble de petits macropores actifs, vraisemblablement connectés au reste de la porosité ne sont pas détectés, car en dessous de la résolution du scanner. Ces petits macropores sont également ceux où il est le plus difficile de détecter l'eau avec fiabilité. Des pistes de réflexions sont néanmoins prometteuses pour affiner les résolutions spatiales : des approches de caractérisation de la structure et des écoulements en échelles emboîtées sont envisageables sur les colonnes de sol, grâce à des techniques d'imagerie 3D de résolution croissante (Gerke et al., 2010; Köhne et al., 2011; Gerke, 2012; Sammartino et al., 2012).

Nos résultats montrent également que la macroporosité active peut être estimée avec une erreur limitée (5-10%), pour ce type de sol (Luvisol) et cette résolution, sur la base de critères de volume des macropores et de connectivité

(nombre d'Euler). Ces résultats représentent une première étape concluante dans l'établissement de liens entre propriétés effectives de l'écoulement et caractéristiques de la structure du sol, permettant de s'affranchir d'expérimentations lourdes et coûteuses de simulation de pluies au sein de scanners médicaux. Des investigations supplémentaires seront nécessaires pour élargir ces conclusions à d'autres types de sols. D'autre part, des progrès dans la segmentation des images 3D réalisées dans des sols contenant des argiles gonflantes permettraient de découpler les variations locales de structure, des processus d'écoulement de l'eau libre à la surface des macropores.