

Analyse des résultats expérimentaux et de modélisation sur la colonne Lysimètre

Un point qui n'a pas été abordé précédemment dans le détail concerne l'expérience d'infiltration – drainage au scanner médical sur la colonne de sol Lysimètre à capacité au champ. En effet, c'est la seule expérimentation à ne pas avoir infiltré sur la durée de l'expérience (~2h), mais l'imagerie fonctionnelle quasi 4D a été tout de même réalisée. L'extraction des informations concernant la structure de la macroporosité montre que le profil de macroporosité « percolante » présente une zone quasi nulle de la macroporosité détectable au scanner (>400  m).

Cela se traduit par une très faible infiltration de la colonne de sol, avec une vitesse d'infiltration de l'ordre de $10^{-7} m.s^{-1}$, soit une valeur comprise dans l'intervalle de valeurs de la conductivité hydraulique à saturation des deux couches estimées par ESPAS 1.0 (horizon supérieur = $10^{-6} m.s^{-1}$; horizon inférieur = $10^{-8} m.s^{-1}$). Cette expérience d'infiltration d'eau n'a pas engendré d'écoulement préférentiel, cependant elle apporte des informations complémentaires sur la capacité du modèle à reproduire les données expérimentales.

En effet, la simulation après inversion des paramètres pour les deux versions du modèle n'a pas abouti. L'estimation a convergé uniquement pour la version n'utilisant pas les profils extraits des images, à savoir en estimant : a, b, v, d et $\theta_{max-mac}$. Elle échoue dès lors que les paramètres du terme d'échange : la distance intermacropores et la macroporosité $\theta_{max-mac}$ sont fixés par les profils mesurés.

La simulation a été tentée avec des valeurs de paramètres non estimées par DREAM mais n'engendrant pas d'erreur « grave » c'est-à-dire aboutissant à l'arrêt du calcul. Les sorties du modèle ainsi générées montrent que la simulation avec les profils mesurés engendrent des conditions d'écoulement particulières. Le test a été fait avec les paramètres du tableau IV – 1. La valeur du paramètre a est fixée à 3, la valeur de b est calculée comme expliquée à la section II.3.3.2.3. Le flux, q , d'infiltration dans les macropores est calculé ici à 4 cm de profondeur avec la valeur de la macroporosité ($\theta_{max-mac}$) mesurée à cette profondeur et qui correspond à la zone de faible infiltration dans la colonne de sol.

Tableau IV – 1 : Paramètres de KDW utilisés en phase test pour Lysimètre �� capacité au champ		
Paramètres KDW & terme d'échange	Valeurs choisies	Unité
a	3	[-]
b	$3,37.10^{+2}$	$m.s^{-1}$
θ_{mac_max} à 4 cm de profondeur	$8,97.10^{-4}$	[-]
flux d'eau dans les macropores $q(= b \times \theta^a)$	$2,43.10^{-7}$	$m.s^{-1}$

L'apport d'eau en surface est de $6,38.10^{-6} m.s^{-1}$, la matrice dans ces conditions, a une courbe d'infiltration maximale en surface de $1,2.10^{-6} m.s^{-1}$. Par différence, les macropores doivent drainer $5,18.10^{-6} m.s^{-1}$. Cependant, le flux maximal « infiltrable » dans les

macropores est de $2,43.10^{-7} m.s^{-1}$ avec ces paramètres et, notamment, le profil de macroporosité mesuré présentant un resserrement autour de 4 cm de profondeur. Dans ce cas, l'infiltration dans cette colonne de sol à capacité au champ s'apparente plus à un écoulement lent et matriciel qu'un écoulement préférentiel. Le flux d'eau non « infiltrable » devrait être stocké sous la forme d'une lame d'eau en surface. Le potentiel matriciel calculé pour ce jeu de paramètres (tableau IV – 1) présente des valeurs aberrantes (fig. IV – 1) avec des valeurs atteignant 50 m à 2160 s et 15 m à 5400 s en surface du sol due à des erreurs de calculs à ces pas de temps. Le modèle Darcy-Richards – KDW ne génère aucun stock sous forme de lame d'eau.

En parallèle, les images tomographiques montrent la saturation progressive de la surface de la colonne durant l'infiltration dans le temps (fig. IV – 2) dans les 30 premières minutes de l'infiltration. Sur ces illustrations on peut voir que la surface se sature et que l'on ne voit pas d'eau ou très peu dans la profondeur de la colonne. Le temps auquel le potentiel matriciel simulé devient très positif indiquant un problème de calcul varie selon les paramètres testés (exemple valeurs du tableau IV – 1). Mais ce temps est autour de 30 min après le début de la pluie, ce qui semble correspondre grossièrement au temps réellement mis dans l'expérience pour saturer la surface du sol.

Cet exemple d'infiltration sur une colonne de sol montre des résultats ne répondant pas au but fixé c'est-à-dire aboutissant à une estimation de paramètres erronés afin de modéliser l'infiltration – drainage par l'équation Darcy-Richards – KDW couplé. Le modèle ne parvient pas à infiltrer correctement l'eau dans ce cas, ce qui correspond à la réalité observée aussi bien sur les balances qu'au scanner médical. Dans ce cas, l'écoulement d'eau ne satisfait pas les conditions des équations du modèle et se rapproche plus d'un écoulement très lent et capillaire correspondant aux conditions de Darcy-Richards. Ainsi on peut dire que le modèle d'écoulement préférentiel, KDW, ne gère pas des conditions où la macroporosité n'a pas la capacité d'infiltrer l'entièreté du flux d'eau refusé par la matrice. En condition réelle, le flux d'eau refusé par la matrice est transféré dans les macropores. Si ces derniers n'ont pas la capacité à infiltrer ce flux, il se forme un stock d'eau dans le sol voire jusqu'en surface. Pour l'heure, l'équation KDW ne permet pas de reproduire ce cas de figure : un refus d'infiltration des macropores.

En n'utilisant que l'équation de Darcy-Richards avec les mêmes paramètres de la matrice, la simulation se passe correctement : peu d'eau est drainée en bas du sol, une partie est stockée dans la matrice et le reste d'eau qui ne peut pas être infiltrée est stockée sous forme d'une lame d'eau en surface (voir bilan de masse de la fig. IV – 2b).

A la fin de l'expérience, la hauteur d'eau stockée en surface vue sur les images est d'environ 2,5 à 3 cm, ce qui est proche de la simulation avec Richards uniquement. Ainsi, pour ce cas, le couplage Darcy-Richards avec KDW entraîne des incohérences numériques.

Figure IV – 1 : Potentiel matriciel en fonction du temps modélisé selon les paramètres du tableau IV – 1, en surface de la colonne Lysimètre à capacité au champ.

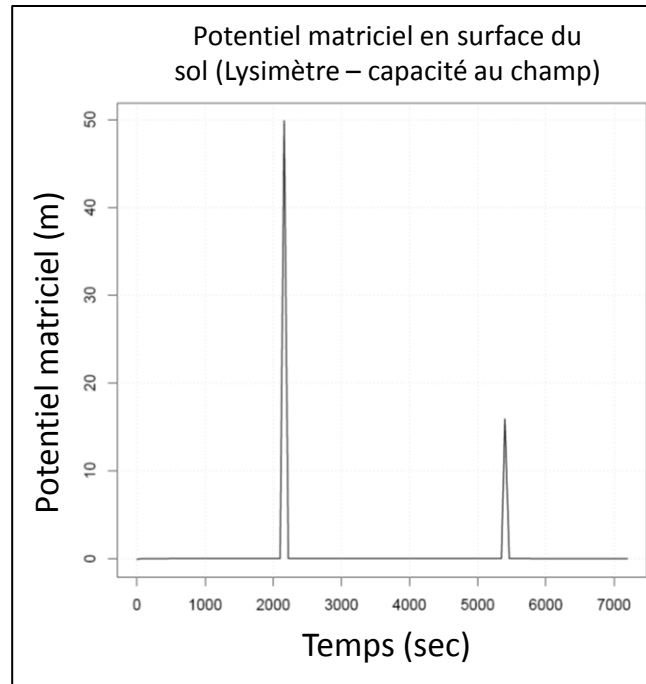
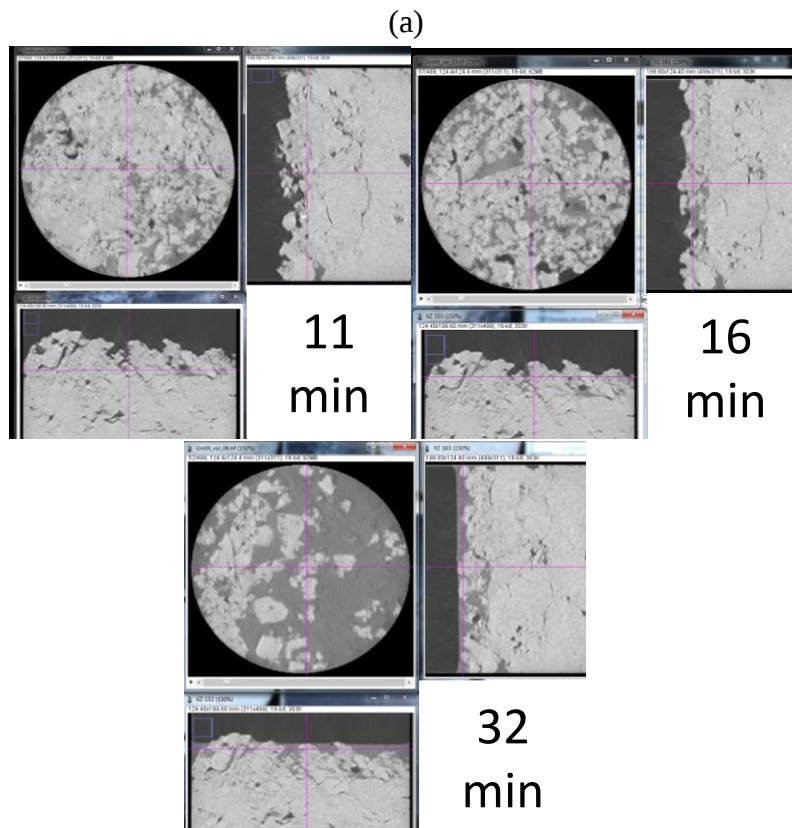
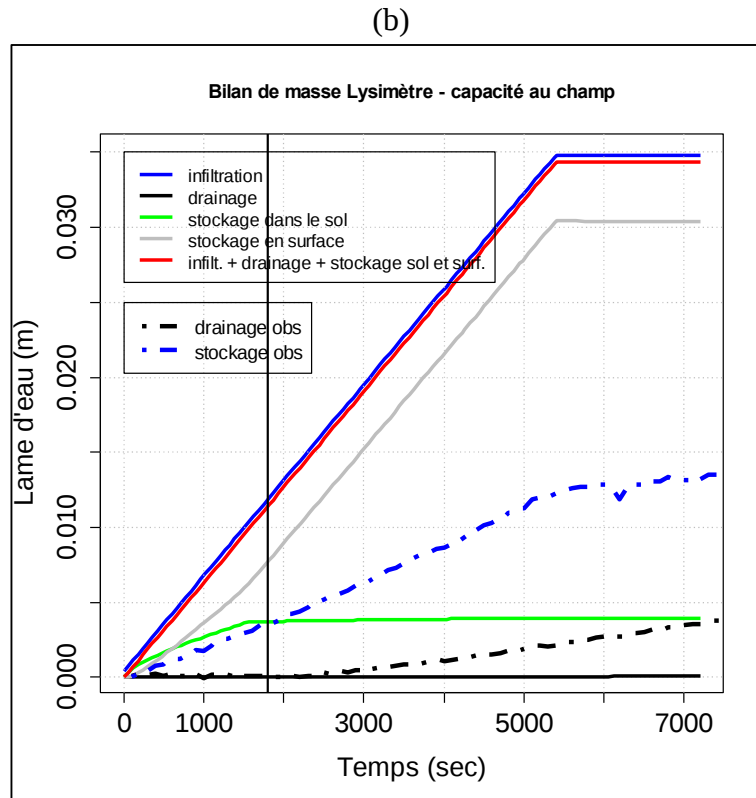


Figure IV – 2 : (a) Images scanner traitées illustrant la saturation progressive de la surface de la colonne Lysimètre en capacité au champ à trois temps après le début de l'infiltration. (b) Bilan de masse d'infiltration – drainage avec uniquement l'équation de Darcy – Richards.





IV.2. Analyse de l'évolution de la structure macroporeuse et de l'eau détectée

Les données tomographiques permettent d'observer les phénomènes induits par le passage de l'eau et par le séchage dans les colonnes de sol. Ces observations notamment temporelles sont, à notre connaissance, les premières à permettre de mieux comprendre les processus engagés durant le passage de l'eau dans des colonnes décimétriques. Cette partie vise à analyser l'évolution structurale initiale et l'évolution temporelle durant les expériences.

IV.2.1. Impact de la teneur en eau initiale sur la structure initiale

Les données globales montrent que la macroporosité initiale de chaque sol tend à augmenter (volume de macroporosité) avec la diminution de la teneur en eau initiale. Cela est confirmé par la connectivité qui est également plus élevée, pour la partie percolante de la macroporosité, avec la diminution de la teneur en eau initiale (voir section III.2.2).

Le fait que la macroporosité percolante de Lysimètre n'a pas pu être générée sans la bordure PVC indique qu'aucun macropore n'est connecté en surface avec les réseaux plus profonds. Cela peut s'expliquer par le travail du sol qui fragmente la grande macroporosité (larges fissures, biopores) et par la résolution du scanner qui ne permet pas d'imager les plus petits macropores qui pourraient connecter la surface et les réseaux plus profonds.

La teneur en eau initiale a un effet marqué sur les profils de macroporosités percolantes initiaux. Les profils des sols argileux, Verger et Lysimètre, montrent que la macroporosité percolante augmente avec la diminution de la teneur en eau initiale. L'augmentation du pourcentage de macroporosité est de 2 à 3 fois la valeur du profil mesuré en condition à capacité au champ selon les colonnes. Le sol de Collias ne montre pas cette évolution à l'exception de

la partie inférieure de la colonne, entre 10 et 14 cm de profondeur, mais l'effet est moins marqué que dans les sols argileux.

Cette augmentation de la macroporosité percolante peut s'expliquer par des mouvements de retrait de la matrice qui s'assèche, et qui permettent une plus grande ouverture de la macroporosité, voire une ouverture de nouveaux macropores inter-agrégats. Ces mouvements sont liés à la nature des argiles présentes et à la teneur en argiles de ces sols qui se situe autour de 30 à 35% (Jong and Warkentin, 1965). En effet, la teneur en argile présente dans un sol favorise les mouvements de retrait – gonflement, le sol de Collias ayant moins d'argiles, ne montre pas ces variations et présente une structure beaucoup plus stable.

Les profils de macroporosité varient, parfois fortement, sur les 15 cm de hauteur du sol. Des zones ont été identifiées comme ayant plus 1,5 à 2 fois plus de macroporosité percolante, comme pour Verger et Lysimètre par exemple. Collias montre des profils beaucoup moins variables selon la profondeur. Ces différences de macroporosité peuvent être expliquées par la teneur en argiles, mais aussi par le travail du sol et l'historique des cultures. Verger est un sol cultivé en arboriculture, les arbres ont des racines plus grandes et plus grosses que les herbacées présentent sur Collias. Le sol de Lysimètre est de même composition que celui de Verger (aux différences décimétriques pédologiques près) mais c'est un sol utilisé en grandes cultures (blé). Le travail du sol et les racines de blé peuvent induire des modifications de la structure de ce sol en réduisant la taille moyenne de la macroporosité naturelle de ce sol et surtout les grandes structures macroporeuses (galeries de lombrics, racines)(Strudley et al., 2008).

Vogel et al. (2005) a mesuré les fonctionnelles de Minkowski durant le séchage d'échantillons remaniés formés à partir de proportions différentes de sable et de bentonite (argile). Les auteurs suivent l'évolution temporelle des fissures en surface, avec des images sur lesquelles les indices de Minkowski sont mesurés. Ils voient qu'entre un échantillon 100% sableux et 100% argileux, celui avec le plus d'argile montre une augmentation de la densité de surface fissurée la plus abrupte et la plus rapide. L'échantillon sableux est celui fissurant le moins, avec une moins grande densité de surface créée. Le nombre d'Euler de l'échantillon sableux est d'abord le plus positif au début de l'expérience signifiant des fissures isolés. Puis, au cours du temps, ce nombre devient de plus en plus négatif surtout pour l'échantillon argileux, indiquant pour les auteurs, une interconnexion entre les fissures se faisant plus tardivement durant le séchage.

Cette étude est l'une des rares analysant l'évolution des fonctionnelles de Minkowski dans le temps pendant une phase de séchage, ce qui peut s'apparenter aux trois conditions initiales utilisées dans ce travail de thèse. On constate que la macroporosité argileuse est « instable » selon l'humidité initiale, c'est-à-dire qu'elle varie le plus. On constate également que pendant le séchage des sols, le nombre d'objets isolés augmente, tout comme dans l'étude de Vogel. Cela montre que (i) la structure des sols n'est pas stationnaire, (ii) sa dynamique n'est pas linéaire, et (iii) la texture des sols influence cette dynamique.

Bottinelli et al. (2016) ont étudié la dynamique des pores structuraux ($> 30 \mu\text{m}$ de diamètre) pendant une phase séchage sur deux échantillons de sols de rizières, fortement soumis aux alternances humectation – séchage. Pour cela, ils ont réalisé des courbes de retrait dans un rétractomètre. Tous les 2 g d'eau perdues, les échantillons sont imagés dans un

microtomographe à rayon X avec une résolution d'image de 186 μm . La courbe de retrait est composée de quatre phases : (1) structurale, (2) proportionnelle, (3) résiduel et (4) zéro.

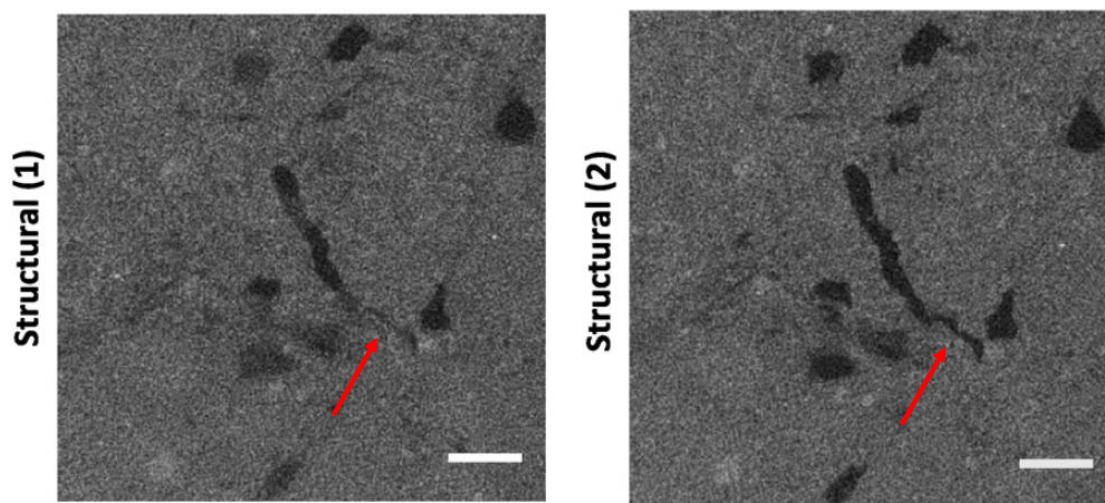
La phase (1) implique le drainage des plus grands pores, la teneur en eau diminue mais le volume de sol diminue peu. L'air commence à entrer dans les pores, et les pores « plasmiques » se drainent pour des potentiels matriciels petits. Les pores plasmiques sont les pores invisibles au $\mu\text{-CT}$ et situés dans la matrice (composée de plasma et du squelette). Les autres phases de la courbe ont été décrites à la section II.1.5).

Ces auteurs ont mesuré le volume des macropores sur les images tomographiques. Les résultats montrent une augmentation de la macroporosité jusqu'à 3,7 % pendant le séchage. En segmentant la macroporosité selon le diamètre, ils ont montré que l'augmentation de volume concerne les macropores de taille entre 225 et 1215 μm , que l'indice de connectivité augmente dans le même temps, et que le degré d'anisotropie reste stable. L'augmentation du pourcentage de macroporosité et de l'indice de connectivité entraînant une diminution de la connectivité, se déroule principalement durant les phases (1) et (2) de la courbe de retrait. Ces auteurs proposent une hypothèse expliquant l'ouverture et l'élargissement de pores : ils supposent que cela est dû au séchage différent entre la partie squelettique et le plasma formant la matrice de sol (Boivin et al., 2004; Braudeau et al., 2004; Chertkov, 2012) en supposant que les pores plasmiques sont inférieurs à 10 μm donc non visibles dans les images $\mu\text{-CT}$.

Ainsi si le séchage dans la zone plasmique est supérieur à celui ayant lieu dans le squelette alors cela va entraîner la formation de nouveaux macropores. Sur les images les auteurs constatent que l'augmentation de la macroporosité est liée à la formation de fissures et/ou l'agrandissement de macropores préexistants. L'augmentation de la connectivité durant le séchage est dû selon les auteurs à différents facteurs : (i) le séchage rapproche des macropores, (ii) de nouvelles fissures peuvent connecter les macropores durant le séchage. La faible variation de l'anisotropie pendant le séchage indique que les macropores nouvellement créés n'ont pas d'orientation préférentielle confirmant les résultats de Gargiulo et al. (2015).

Les données d'imagerie réalisées par Bottinelli et al. (2016) et dans ce travail de thèse semblent infirmer l'hypothèse de Braudeau et al. (2004) et Peng et Horn (2005) qui supposait que les changements de volumes de la phase structurale étaient le résultat de la fermeture des macropores. Alors que l'on tend à montrer que les changements de volume ayant lieu durant la phase structurale du retrait proviennent du séchage des pores plasmiques entourant les plus grands pores dans lesquels l'eau a déjà drainé ce qui est compatible avec les observations sur les images microtomographiques de l'étude de Bottinelli et al. (2016) (fig. IV – 3).

Figure IV – 3 : Illustration de l'ouverture de macropores préexistants pendant le séchage durant la phase structurale (adaptée de Bottinelli et al. (2016)).

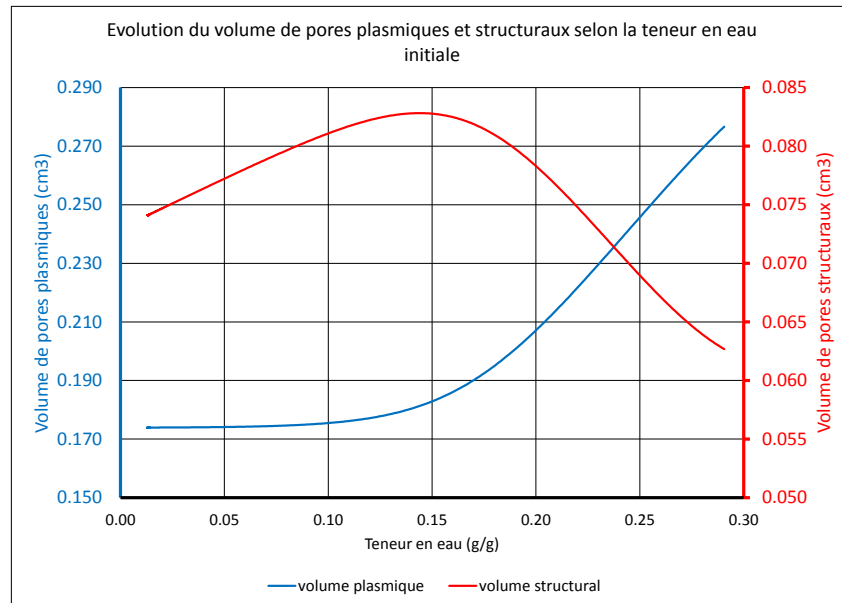


Les observations réalisées dans notre étude confirment celles de Bottinelli et al. (2016) : la macroporosité évolue rapidement durant le séchage.

A partir des courbes de retrait « classique » (sans phase de réhumectation des échantillons) réalisée aussi au rétractomètre, nous pouvons calculer l'évolution du volume de pores structuraux et de pores plasmiques pour les trois sols et selon les trois répliques durant le séchage. La figure IV – 4 montre un exemple de l'évolution des volumes de pores plasmiques et des pores structuraux avec la teneur en eau gravimétrique pour un de nos échantillons de Verger. Sur ce graphique, on observe qu'avec la chute de teneur en eau gravimétrique, le volume de pores plasmiques (courbe bleue) diminue et dans le même temps celui des pores structuraux (courbe rouge) augmente jusqu'à une teneur en eau de $\sim 0,15 \text{ g.g}^{-1}$. A cette teneur en eau, le volume de pores plasmiques reste constant et celui de pores structuraux commence à chuter. La teneur en eau seuil correspondant à l'arrêt d'augmentation du volume de pores structuraux survient environ 24h après le début de l'expérience.

Les résultats obtenus que ce soit pour l'étude de Bottinelli et al. (2016) et ceux obtenus dans le cadre de ce travail de thèse sont une première étape dans la caractérisation de la dynamique de la porosité durant des cycles d'humectation – séchage. Plus précisément, ils permettent de proposer une hypothèse sur les mécanismes du retrait en jeu durant la phase de séchage entre les essais d'infiltrations. Il est nécessaire de poursuivre les études aussi bien sur d'autres sols différents en texture et en contexte cultural. Mais aussi il est nécessaire de pouvoir augmenter la résolution pour visualiser et étudier des objets plus fins et avec plus de détails, afin d'observer les interactions à la frontière entre macropores et matrice. Pour cela il nous faut réduire la taille des échantillons, utiliser d'autres appareils de tomographie, et tester les différents agents de contraste disponibles. Ces derniers nous permettraient probablement de voir les interactions macropores – matrice vis-à-vis de l'eau qui pourraient sans doute contribuer à expliquer les dynamiques rapides d'évolution de la porosité.

Figure IV – 4 : Evolution des volumes de pores plasmiqes et structuraux pendant le séchage (courbe de retrait) – un échantillon du sol de Verger



IV.2.2. Impact du passage de l'eau sur la structure pendant l'expérience

L'une des innovations de cette thèse est d'avoir étudié l'évolution temporelle globale et en profil des structures macroporeuses pour tous les sols et pour des conditions initiales différentes.

Afin de valider les observations de la dynamique rapide de perte et ressaut de macroporosité et afin d'être sûr que la nouvelle méthode de seuillage de la macroporosité (ajustement par la loi de Weibull, voir II.2.2.2.2) ou que le traitement des images n'entraîne pas d'artéfacts, nous avons réalisé des essais en rétractométrie en insérant une phase de réhumectation des échantillons. Ces expériences nous ont permis de mettre en évidence que la dynamique rapide de variation de la macroporosité était une réalité et non un artéfact du traitement d'image.

L'étude des paramètres globaux 3D des structures macroporeuses « totale » et « percolante » et en prenant en compte ou pas les macropores connectés aux bordures, permettent de savoir si les structures sont différentes entre elles, ce qui les distingue et si la macroporosité de bordure influence la structure interne de chaque colonne. Les macropores en contact avec la bordure PVC influencent uniquement les quantifications et ne jouent absolument pas sur les dynamiques temporelles observées, sauf pour le sol de Lysimètre.

Ainsi les données globales temporelles montrent que l'eau s'infiltre et ré humecte le sol réduisant la macroporosité (pour tous les sols et toutes les teneurs en eau initiales). Et au contraire, le drainage de l'eau dans la structure entraîne un ressaut de macroporosité. La teneur en eau initiale influence l'amplitude des variations pendant les deux phases de l'expérience. Plus la teneur en eau initiale est faible plus la chute de macroporosité pendant l'infiltration est grande. Et au contraire le ressaut pendant le drainage présente moins d'amplitude aux teneurs en eau les plus faibles. Les données globales montrent une chute de la connectivité pendant l'infiltration soit par perte de volume de macropores et / ou de nombre de macropores. L'étude

conjointe de l'évolution du volume de macroporosité en fonction de la densité de macropores illustre ces pertes en nombre et / ou volume de macropores.

On peut voir qu'avec les indices géométriques de Minkowski d'une part et le nombre d'objets macropores détectés d'autre part, que les structures sont différentes entre les trois sols. La densité de macropores détectés est plus grande dans le sol de Collias (15 objets.cm⁻³), intermédiaire dans le sol de Verger (7 objets.cm⁻³) et le plus bas est pour le sol du Lysimètre (4 objets.cm⁻³). Le volume global de la macroporosité initiale est sensiblement identique entre les trois sols, le volume de sol moyen est de 1695,7 cm³, avec une différence entre volume minimum et maximum de 149 cm³. Cela semble nous indiquer que dans le sol de Collias, les macropores sont petits et plus nombreux que dans le sol de Lysimètre et Verger est intermédiaire (figure III – 13). Ce graphique peut nous aider à comprendre la dynamique de la macroporosité et émettre des hypothèses :

- dans le cas de **sols sableux** (Collias), on suppose que le passage de l'eau dans le sol, entraîne la fermeture de macropores qui se ré-ouvrent pendant le drainage de façon quasi identiques. Ceci pourrait indiquer une certaine stabilité de la structure ;
- dans les **sols argileux** (Lysimètre et Verger), on peut supposer que les macropores se rétrécissent (diminution du volume) sans se refermer totalement (nombre de macropores constant).

Si on observe les images de la macroporosité au temps initial, à 90 min (arrêt infiltration) et à 120 min (arrêt drainage et du suivi au scanner) et en délimitant un macropore sur l'image à 0 min (fig. IV – 5, contour violet) et en reportant cette délimitation sur les deux autres images à 90 et 120 min, on observe :

- une perte de pixels « macropores » (en noir entre 0 et 90 min) ;
- une augmentation de pixels « macropores » entre 90 et 120 min ;

Ces pertes et gains sont localisés sur les bordures des macropores, et sont en règle générale observés sur une épaisseur de 1 pixel. Les contours du macropore à 120 min sont assez proches de ceux à 0 min dans le cas de Collias, mais pas pour les deux sols argileux.

Pour expliquer les différences observées, on doit prendre en compte la texture et le contexte structural de ces sols : Lysimètre est un sol argileux avec des argiles gonflantes et travaillé régulièrement ; Verger est également argileux mais non travaillé avec des racines d'arbres très présentes, et Collias est un sol limono-sableux non cultivé avec des herbacées. Le travail du sol régulier de Lysimètre pourrait expliquer les différences de structure (moins de macropores) par rapport à Verger qui n'est pas travaillé. La faune du sol et la quantité de matière organique dans ce dernier pourrait le structurer de façon plus pérenne que Lysimètre. En effet, les différents passages d'engins agricoles vont modifier les conditions de vie de la faune du sol qui verra ses galeries modifiées régulièrement, par fragmentation des macro-agrégats (Bronick and Lal, 2005). Les différences observées pour Collias peuvent s'expliquer par sa texture différente. Dans un limon sableux on peut supposer que la fraction sableuse entraîne une moins grande structuration que dans un sol argileux, dû à la moins grande cohésion entre les particules de sables comparée aux argiles.

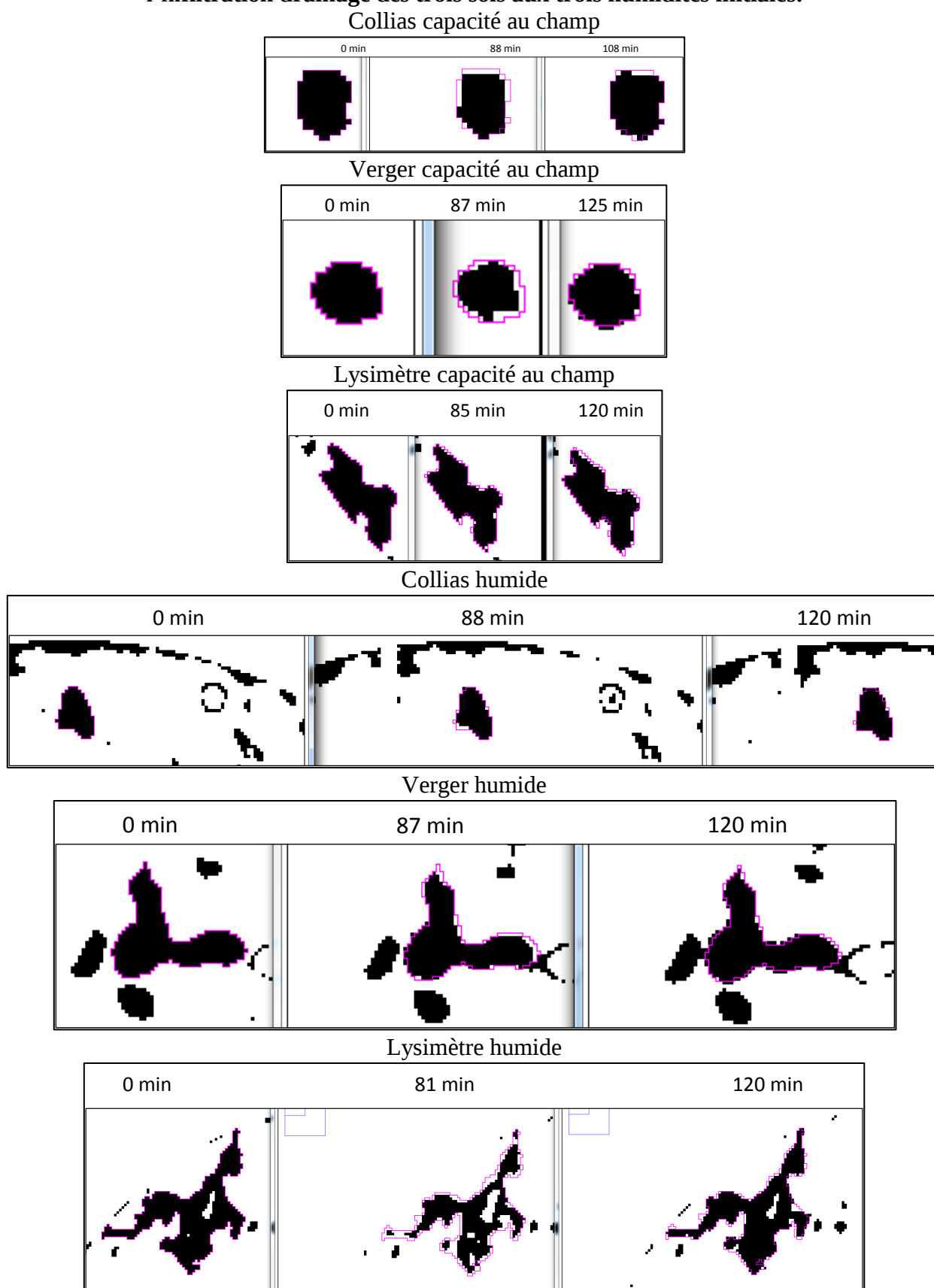
Cette hypothèse peut être en partie vérifiée en analysant la granulométrie des sols, en déterminant la nature minéralogique des argiles (diffraction des rayons X), et en mesurant la stabilité des agrégats (méthode de Le Bissonais and Le Souder, 1995). Cela donnerait des

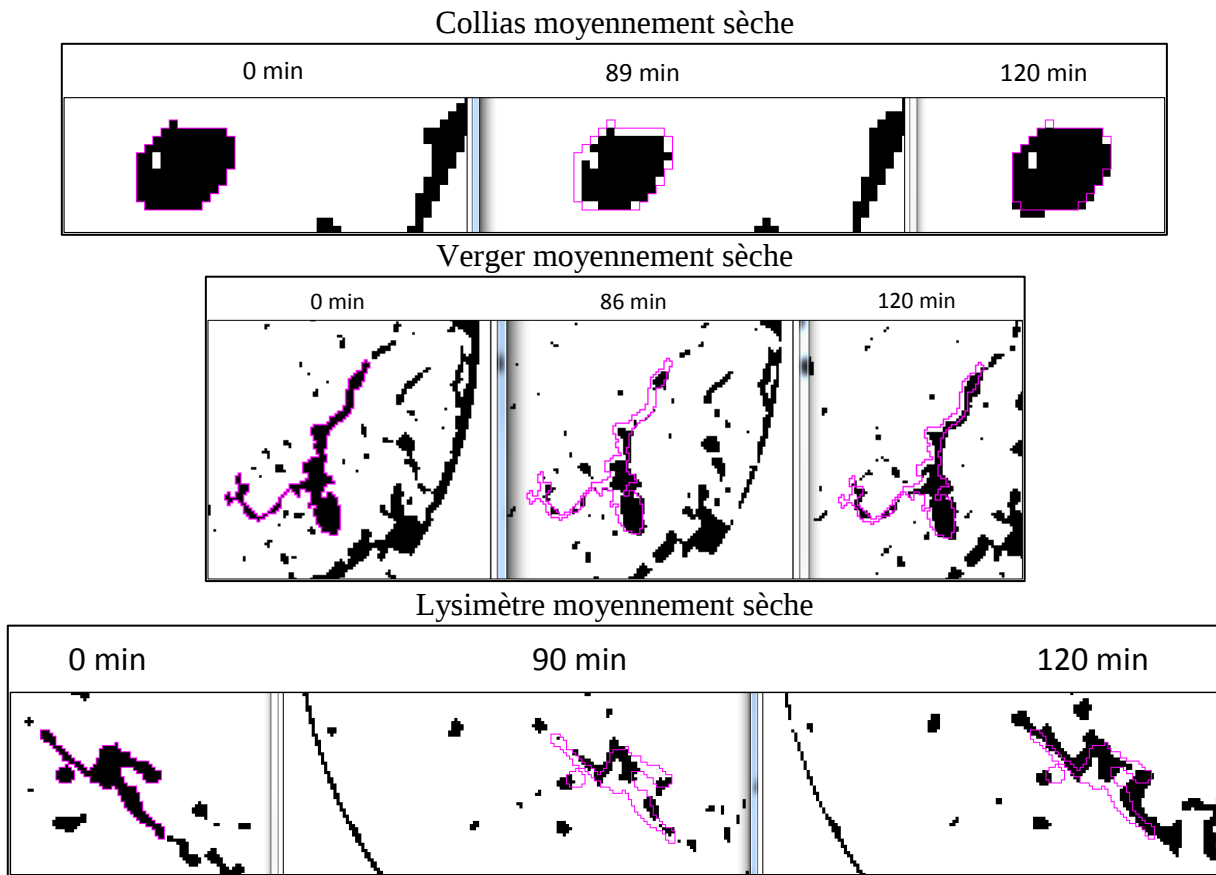
indications sur la stabilité structurale des sols, avec en plus une étude de la distribution des tailles de pores de chaque sol qui permettrait de valider les observations.

Il faut pondérer les observations faites ici en rappelant que l'imagerie tomographique réalisée dans ce travail présente une résolution spatiale très grossière (400 μm). La résolution temporelle est également relativement faible : une image toutes les 2 à 5 min. Il est donc nécessaire de poursuivre la caractérisation des variations structurales mais à plus fine échelle, voire même pour commencer en simplifiant le milieu. Ainsi une étude dans des milieux modèles simples, puis de plus en plus complexes, afin de se rapprocher d'un sol « naturel » permettrait d'en apprendre d'avantage sur les variations structurales. En effet, l'échelle d'étude décimétrique ici ne permet pas de tout percevoir.

Toutes ces considérations et limites de ce travail ne permettent pas de proposer des hypothèses plus poussées quant au(x) processus régissant les mouvements de la structure observés à fine échelle. Cependant, on peut proposer comme première **hypothèse** que l'eau d'infiltration déstabilise fortement les parois des macropores et provoque ce qu'on peut appeler « *le foisonnement des parois* » (Favre et al., 1997). Favre et al. (1997) ont travaillé sur les mouvements d'eau dans des vertisols et les mouvements de matières associées en réalisant des infiltrations d'eau sur des sols fissurés avec le suivi de la teneur en eau. Ils ont pu observer la propagation du front d'infiltration dans les fissures et notamment que les parois des fissures sont ré humectés rapidement et elles se referment alors que la matrice demeure insaturée, même 24h après l'arrêt de l'essai. Les fissures ont une taille de l'ordre 2 m de profondeur et 1 à 2 cm d'ouverture. Les résultats de cette étude montrent que le gonflement des sols tels que les vertisols est lié à des processus très locaux et temporellement rapides. Le foisonnement des parois peut être qualifié de « *sur-gonflement* » des matériaux qui peuvent être déstructurés. Après le passage de l'eau, pendant le drainage, ces matériaux déstabilisés reprennent leur place initiale ou non. L'eau circulant dans le sol n'est pas à l'équilibre, nous sommes dans un régime transitoire et les redistributions d'eau (ou de pression) s'opèrent durant le drainage. Ces hypothèses sont à relier aux courbes de retrait réalisées sur les échantillons de sols. Ces données couplées aux variations volumiques observées précédemment permettent seulement une ébauche d'hypothèse sur les mouvements des sols au passage de l'eau.

Figure IV – 5 : Observation des variations dans la macroporosité seuillée pendant l'infiltration drainage des trois sols aux trois humidités initiales.





Nous venons d'expliquer les observations sur l'évolution structurale initiales et leur évolution temporelle. Nous avons également pu observer les marqueurs eau détectés au scanner médical. Ces derniers peuvent éclairer les processus d'écoulement d'eau dans la structure.

IV.2.3. Les profils de « teneur en eau » détectés durant l'expérience

Les images tomographiques peuvent être qualifiées de données « partielles » car si la taille du film ou de la gouttelette d'eau est trop petite par rapport à la résolution des images, toute l'eau d'infiltration ne sera pas détectée et donc seule une partie de l'eau d'infiltration sera prise en compte. La notion de « voxel eau » permet d'approcher la notion de marqueur de l'écoulement. Cela indique que nous ne verrons jamais les profils de la teneur en eau réelle s'écoulant dans les macropores avec un scanner médical. Par contre, cela nous indique les zones d'écoulements et donne des informations locales sur la (ou les) dynamique(s) de l'écoulement pendant l'infiltration – drainage. Ces données prises au sens statistique donnent des informations sur la vitesse d'infiltration et de remplissage de la macroporosité par l'eau, en comparant les voxels eau à l'acquisition t et l'à l'acquisition $t+\Delta t$. Les processus d'écoulement de l'eau peuvent influencer la quantité détectée au scanner.

La teneur en eau initiale détermine le processus d'écoulement. A capacité au champ, pour les trois sols, il est détecté moins de marqueurs eau qu'aux deux autres teneurs en eau. Dans le cas de Collias, on observe une zone de stockage, entre 6 et 10 cm de profondeur, que l'on pourrait qualifier de « nappe perchée localisée » et que l'on peut voir se remplir sur les images. Cette zone, ne semble pas exister en condition humide et moyennement sèche. Ceci est confirmé en observant les images simplement prétraitées (voir fig. IV – 6). Cette figure montre

des images acquises durant l'infiltration à trois temps différents selon deux plans : XY et XZ à la profondeur du réservoir. On peut voir qu'en condition à capacité au champ le réservoir stocke l'eau (couleur plus grise), alors qu'il ne fonctionne pas du tout en condition humide. Probablement car à capacité au champ, il y a moins de passages latéraux possibles. L'eau est passée par d'autres chemins d'écoulement aux conditions plus sèches. Ces images permettent d'expliquer une partie des différences de profils observés pour la colonne Collias selon les teneurs en eau initiales. Pour les deux autres sols, les différences de détection ne sont sans doute pas uniques et une mixité des processus d'écoulements est à envisager.

La figure IV – 7 montre la représentation tridimensionnelle des marqueurs eau détectés durant l'ensemble des essais d'infiltration, les voxels ont un niveau de gris qui correspond au nombre de fois que de l'eau a été détectée à ce voxel : soit 1 à n fois dans la colonne (n fois = n images acquises). Ainsi, la couleur verte correspond aux voxels ayant un niveau de gris proche du nombre d'images maximales réalisées (détection n fois), contrairement à la couleur bleue (détection 1 fois). En d'autres termes, la couleur verte correspond à des zones où les voxels ont détectés souvent de l'eau localisée à cet endroit. Ces représentations montrent que la bordure joue un rôle important dans l'écoulement surtout aux conditions les plus sèches et pour les sols argileux. Cette image montre bien la zone de stockage en surface du sol Lysimètre à capacité au champ.

Les processus d'écoulements d'eau et notamment la taille des films ou des gouttelettes d'eau ne sont pas simples à observer et rarement étudiés. On peut faire l'hypothèse qu'une matrice très humide va engendrer un contact entre l'eau s'écoulant verticalement et le sol humide conduisant à la formation d'un film d'eau peu épais et rapide. Au contraire, une matrice plus sèche va engendrer un contact sol « sec » et eau formant un film d'eau plus épais et plus lent, que l'on peut supposer être mieux détectable en quantité par la tomographie RX. Les données issues de ce travail ne permettent pas d'extrapoler plus d'hypothèses sur les processus d'écoulements d'eau et les processus se déroulant à l'interface sol – eau, cela dépend de la structure percolante, de l'intensité de l'apport d'eau, etc... (Dragila and Weisbrod, 2003; Tippkötter et al., 2009). Les données obtenues ici ne permettent pas d'aller plus loin dans les hypothèses concernant les processus d'écoulement.

En résumé, les expériences réalisées au scanner sur des sols différents (texture, structure (travail du sol ou non) ont permis de mettre au point une méthode complémentaire de seuillage de la structure macroporeuse durant l'expérience. Cette innovation permet l'étude de l'évolution structurale durant l'infiltration – drainage mettant en lumière des effets de retrait – gonflement à dynamique rapide.

La détermination de paramètres profilés donne des explications quant au comportement de l'écoulement notamment pour la colonne Lysimètre à condition la plus humide testée. L'étude des profils de la macroporosité percolante montrent la variabilité des sols (forme du profil entre sol) mais la constance de la forme du profil pour un même sol, quelles que soient les conditions initiales et les instants d'acquisition pendant l'infiltration – drainage. Ces profils montrent que dans la colonne de sol, la macroporosité totale distinguable au scanner n'excède pas 15%. Deux comportements semblent se distinguer sur les profils de macroporosité à trois temps dans l'expérience et selon la condition initiale, d'un côté Collias ne montre pas une influence très marquée de la teneur en eau sur les profils de macroporosité aux trois temps

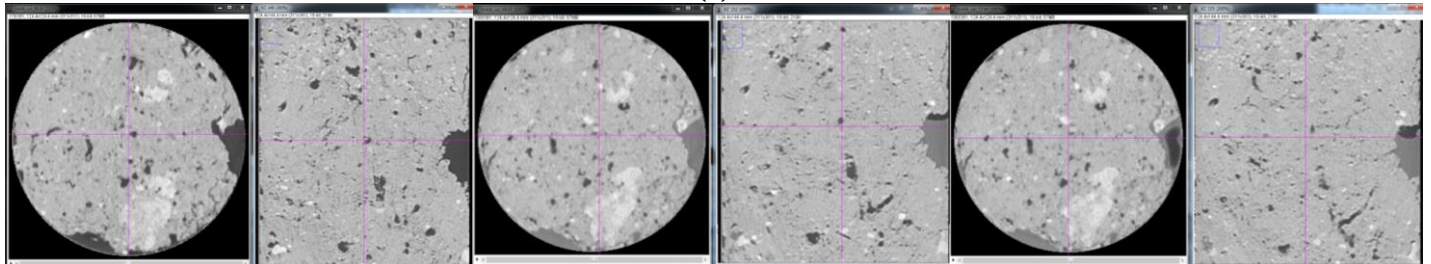
choisis. Et de l'autre, les échantillons argileux, Verger et Lysimètre présentent une augmentation des valeurs du profil avec la diminution d'humidité initiale aux trois choisis beaucoup plus marquée. L'évolution conjointe du volume de macroporosité en fonction de la densité de macropores montre bien la différenciation de comportement entre les sols argileux et le sol sableux, mais qui permet aussi de distinguer le sol argileux travaillé du non travaillé.

Le but de l'imagerie dynamique des expériences d'infiltration – drainage est l'observation des différences (ou similitudes) d'écoulement et de structures macroporeuses. Nos résultats montrent que la structure macroporeuse a une dynamique d'ouverture – fermeture rapide (30 min), confirmée par des expériences complémentaires. Les expériences menées ont mis en lumière des soucis expérimentaux : difficultés de contrôle d'apport d'eau par la pompe péristaltique et de mesure par la balance drainage déportée du scanner. Les biais sur le suivi de ces grandeurs peuvent être contournés en partie (distinction visuelle des gouttes arrivées en bas de colonne).

Nous arrivons à observer des processus structuraux rapides qui n'ont, à notre connaissance, jamais été observés ni étudiés sur différents types sols et à différentes conditions hydriques initiale. Ces expériences nous ont permis de mesurer des paramètres structuraux, utilisés ensuite dans le modèle, alors que ces paramètres étaient auparavant estimés et servaient à ajuster des courbes expérimentales sans permettre une meilleure compréhension des phénomènes possibles. La résolution de 400 μm des images tomographiques peut sembler être un frein car les structures macroporeuses ne sont pas entièrement visibles ni l'eau. Mais Jarvis (2007) met en avant l'idée que les pores supérieurs à 300 μm de diamètre équivalent seraient le siège des phénomènes rapides et non à l'équilibre, nous permettant ainsi de visualiser à 400 μm l'écoulement préférentiel et ses implications sur la structure.

Figure IV – 6 : Images « brutes » du scanner RX de Collias – 3 temps pendant l'infiltration (a – Capacité au champ ; b – humide) (de gauche à droite : t_0 , $t_{38 \text{ min}}$, $t_{87 \text{ min}}$) dans les plans XY et XZ.

(a)



(b)

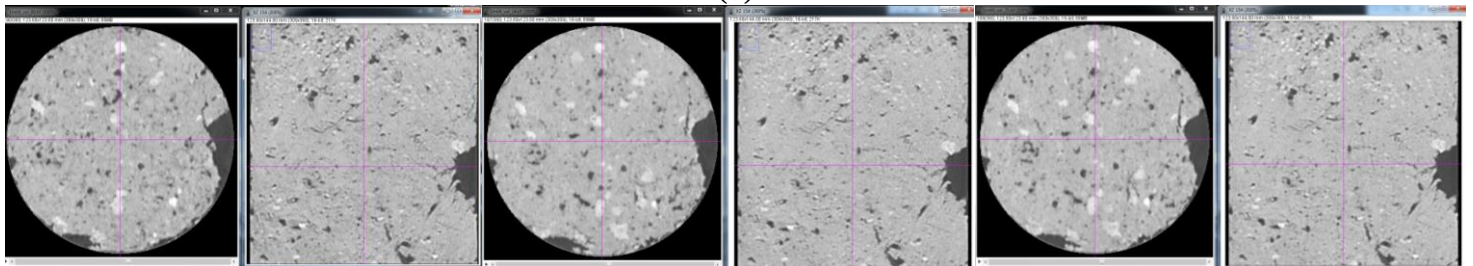
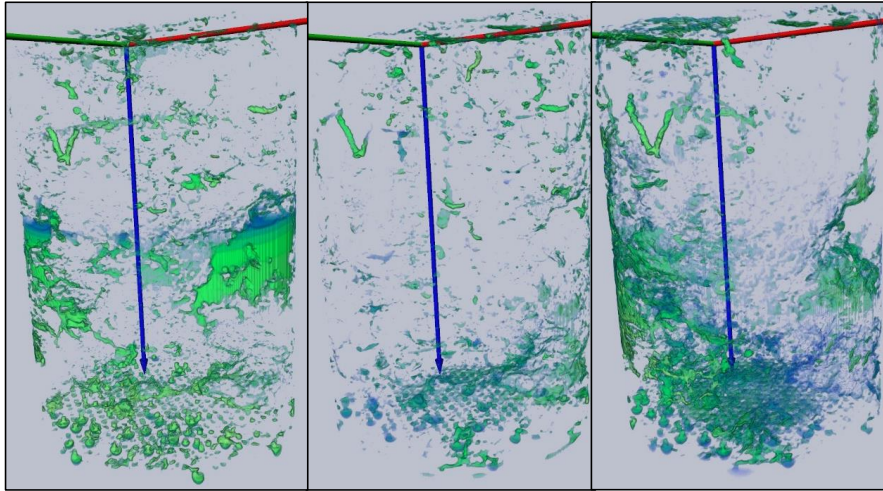
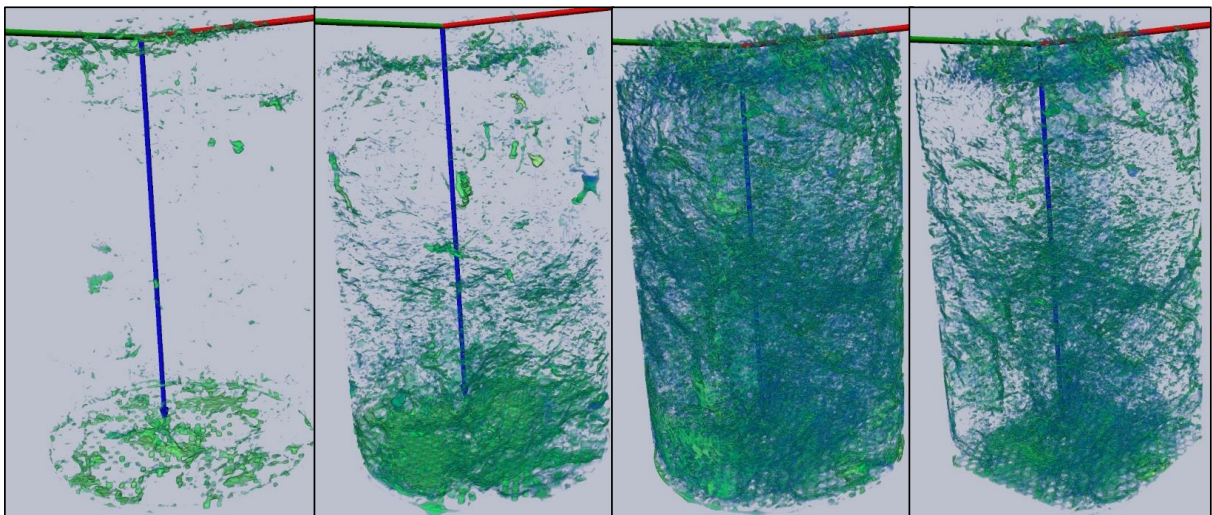


Figure IV – 7 : Représentation 3D de l'écoulement d'eau dans les colonnes de sols selon la condition initiale, et selon la détection, en vert : eau la plus souvent détectée au même endroit et en bleu la moins souvent détectée.

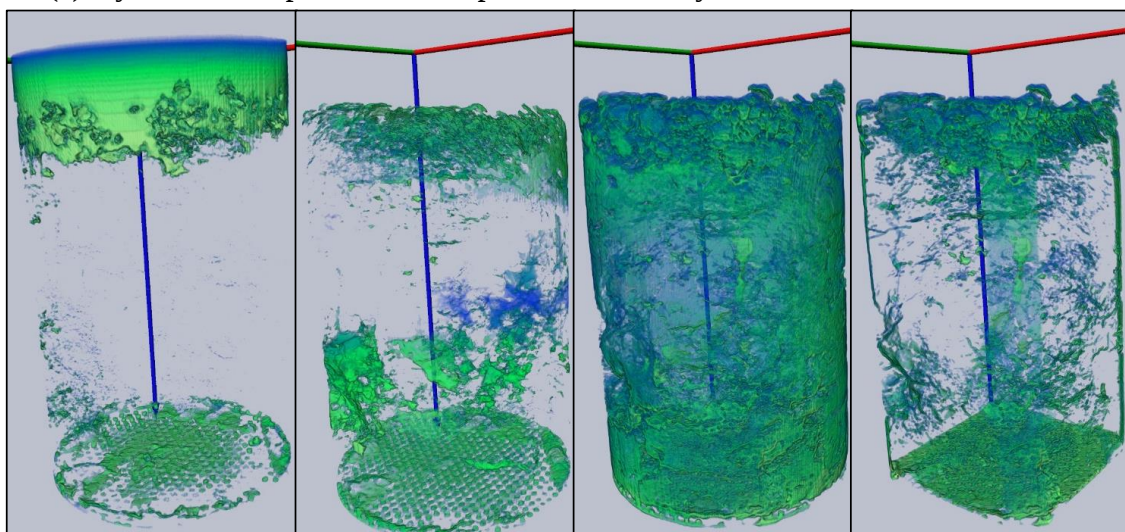
(a) Collias – capacité au champ – humide – moyennement sèche



(b) Verger – capacité au champ – humide – moyennement sèche + zoom intérieur



(c) Lysimètre – capacité au champ – humide – moyennement sèche + zoom intérieur



IV.3. Analyse de sensibilité

Pour résumer, bien que les deux versions du modèle se comportent différemment, il y a deux phases de contribution : (1) phase transitoire et (2) phase pseudo-stationnaire et drainage libre.

Dans le cas de la modélisation classique (sans les données tomographique), la phase (1) est contrôlée par les paramètres b et d avec beaucoup d'interactions entre eux, tout au long de l'infiltration – drainage en condition à capacité au champ, mais uniquement dans le début de la simulation (~2400 s) pour les deux autres conditions de teneur en eau initiale. Au-delà des 2400 s, en condition humide et moyennement sèche, c'est le paramètre d qui domine largement avec très peu d'interaction. Dans cette configuration ce sont les paramètres b et surtout d qui contrôlent le drainage cumulé des macropores.

Lorsque l'on utilise les données de la tomographie, la phase (1) est contrôlée par les paramètres b et K_{sat-1} (et ν). b est le paramètre qui a le plus d'influence, c'est donc la conductance dans les macropores qui contrôle le drainage cumulé en bas de colonne des macropores : le début du drainage dépend de la vitesse avec laquelle l'eau circule dans les macropores et, dans une moindre mesure, de la vitesse avec laquelle l'eau circule dans la matrice. Par contre, dans la phase (2) c'est la conductivité hydraulique à saturation de la base du sol (couche 7 – 14cm, K_{sat-2}) qui contrôle la variable de sortie : la variabilité du drainage une fois que celui-ci est établi ne dépend plus exclusivement des caractéristiques des macropores mais également de celles de la matrice (2^{de} couche mais également de la couche de surface dans une moindre mesure). La teneur en eau initiale et les caractéristiques du sol étudié peuvent cependant modifier ces conclusions :

- Dans le cas de Collias, c'est principalement b qui contrôle le drainage à capacité au champ, auquel s'ajoute K_{sat-1} et K_{sat-2} dans les conditions plus sèches.
- Dans le cas de Verger, ce sont les paramètres b et K_{sat-2} qui contrôlent le drainage.
- Dans le cas de Lysimètre c'est K_{sat-1} qui contrôle à plus de 90% le drainage cumulé des macropores en bas de colonne quelle que soit la condition initiale de teneur en eau ; pour ce sol, c'est le partage du flux à la surface et l'activation (ou non) du flux dans les macropores qui va déterminer le drainage, et la contribution de K_{sat-1} est d'autant plus marqué que la teneur en eau initiale est grande.

Pour synthétiser ces résultats, le modèle utilisant les données de la tomographie est sensible sur les paramètres testés : b et K_{sat-2} (K_{sat-1} uniquement pour Lysimètre). Dans cette version (2), il n'y a pas d'interaction entre les paramètres. Pour le modèle sans les données de la tomographie (version 1), les paramètres b et d sont les deux paramètres contributeurs, avec une interaction entre les paramètres. Le paramètre $\theta_{max-mac}$ est un contributeur non négligeable uniquement pour le sol de Collias, et le paramètre ν n'est jamais contributeur de la variance de la variable de sortie.

Le paramètre de la distance intermacropores (d) intervient au carré, dans le terme d'échange. Ce paramètre est d'autant plus sensible pour la variable testée que la condition initiale de teneur en eau est basse : lorsque le sol est à capacité au champ, la matrice est quasi-

saturée et le terme d'échange est très peu actif. Inversement, lorsque la matrice est plus sèche, elle peut stocker de l'eau infiltrée dans les macropores : le terme d'échange est alors actif. Dans ce terme d'échange intervient aussi la conductivité hydraulique à saturation de la matrice.

Le profil de macroporosité peut expliquer le comportement différent du sol Lysimètre avec une contribution largement dominée par K_{sat} de la couche de surface dans le modèle avec les données de l'imagerie. On a vu précédemment que notamment à capacité au champ, le sol de Lysimètre se comporte en écoulement fortement matriciel. Ce qui semble se confirmer ici.

Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent également les processus dominants dans les écoulements d'eau en fonction de la phase de drainage (transitoire, pseudo-stationnaire et drainage libre) mais aussi en fonction de la teneur en eau initiale. Ainsi :

- en condition **très humide**, la conductance des macropores (b) est le paramètre dominant, on peut supposer que le processus d'écoulement d'eau infiltrée se fait en grande majorité dans les macropores et que la matrice n'intervient que très peu voire pas du tout dans l'écoulement (Jarvis et al., 1991) ;
- dans les conditions **plus sèches testées** ici on peut voir que la conductance des macropores (b) n'est plus le paramètre unique dominant mais que les paramètres de la matrice vont aussi influencer l'écoulement (K_{sat}). Ainsi, une matrice plus sèche entraîne un gradient de teneur en eau plus important entre la matrice et les macropores, ce gradient va induire des mécanismes d'échange entre les deux compartiments de porosité. Les paramètres qui vont influencer sont bien ceux du paramètre d'échange et notamment la distance intermacropores (modèle version 1) et la conductivité hydraulique à saturation de la matrice (modèle version 2).

Si l'on regarde les paramètres influençant l'écoulement selon la phase de l'infiltration, on peut voir que l'arrêt de l'apport d'eau (à 5400 s) n'a pas d'influence significative sur les paramètres influençant la variance du drainage. Mais l'amorce du drainage au début de la phase (2) marque un changement de processus d'écoulement. Ainsi avant le drainage, durant la phase transitoire, c'est la conductance des macropores qui domine, l'eau s'écoule dans les macropores en priorité. Dès lors que le drainage débute, celui-ci est influencé par la distance intermacropores (modèle version 1) et par la conductivité hydraulique à saturation (modèle version 2). On peut imaginer que l'eau s'écoule plus ou moins rapidement dans les macropores selon leur conductance avant de trouver un ou des chemins pour s'écouler et établir une sorte de voie stationnaire d'écoulement et la phase pseudo-stationnaire est plus dépendante de la distance entre macropores et de la conductivité hydraulique à saturation.

En résumé, les objectifs de cette étude de sensibilité des paramètres de KDW et du terme d'échange vis-à-vis de la variance du drainage cumulé des macropores en bas de la colonne de sol (mesurable expérimentalement) étaient de :

- comprendre le comportement d'un modèle dans différents contextes expérimentaux ;
- étudier le degré de dépendance de la variable de sortie du modèle (mesurable expérimentalement) aux différents paramètres qui le contrôlent ainsi que les interactions entre ses paramètres ;
- connaître les paramètres « négligeables » et les paramètres à mesurer (si possible) et/ou à estimer le plus précisément.

Les analyses de sensibilité ont montré que :

➔ **Les deux configurations du modèle mettent en évidence deux phases durant lesquelles les paramètres les plus influents sont différents.**

La première phase est du début de la simulation jusqu'au début du drainage. La seconde phase est entre le début du drainage et se poursuit jusqu'à la fin de la simulation. La première phase est contrôlée par le paramètre de KDW : b , qui est la conductance des macropores, ceci est valable dans les deux configurations du modèle. La seconde phase est contrôlée par le paramètre de la distance intermacropores (modèle version 1) ou par la conductivité hydraulique à saturation de la base de la colonne de sol (modèle version 2).

➔ **Les analyses faites donnent les effets propres et les effets d'interaction entre les paramètres.**

Dans le cas du modèle avec les données de l'imagerie (version 2), les contributions des paramètres à la variance de la variable de sortie sont liées aux effets principaux, il y a peu voire pas d'interaction. Au contraire du modèle sans les données d'imagerie (version 1) qui montrent des interactions plus grandes. Cela indique que parmi les paramètres testés, la distance intermacropores et le pourcentage de macroporosité percolante sont deux paramètres induisant des effets d'interaction sur la variance de la variable de sortie.

➔ **Les paramètres influençant le plus la variable de sortie testée :** sont b (pour les deux configurations du modèle), la distance intermacropores (modèle n'utilisant pas les données de l'imagerie) et la conductivité hydraulique du bas de la colonne (modèle utilisant les données de l'imagerie). Le paramètre ν quel que soit la configuration du modèle, présente des effets quasi nuls, et $\theta_{max-mac}$ montre une influence peu marquée.

Cette analyse de sensibilité nous fournit ainsi des informations sur la modélisation des processus dominants et leur évolution à la fois au cours d'une expérience d'infiltration drainage et selon l'état initial (humidité) du sol. **En condition à capacité au champ**, le paramètre b (qui représente la capacité d'écoulement dans les macropores) est le paramètre essentiel à la fois sur le temps de percée, le volume total drainé ainsi que la dynamique du drainage. **En conditions sèches**, les paramètres d'échange avec la matrice (d) ainsi que les paramètres hydriques de la matrice (K_{sat}) sur toute la hauteur de la colonne de sol interviennent également à la fois sur le temps de percée et le volume d'eau drainé.

Ainsi, la connaissance des caractéristiques du réseau de macropores telles que leur capacité d'écoulement global, le profil de macroporosité, la distance typique entre macropores, sont des paramètres prépondérants pour simuler les flux d'infiltration et de drainage dans les sols, confortant ainsi l'intérêt de l'imagerie dynamique dans cette problématique.

L'analyse de sensibilité renseigne sur le fonctionnement global du modèle et sur l'intérêt d'utiliser des mesures issues de la tomographie. Par la suite, les mesures sont intégrées au modèle, et leur impact est évalué.

IV.4. Modélisation des écoulements préférentiels

Le modèle d'écoulement d'eau est testé sur deux versions du modèle, utilisation ou non des paramètres mesurés sur les images tomographiques. Leur apport dans le modèle est comparé.

IV.4.1. Estimation des paramètres selon la version du modèle

Pour chaque expérimentation, les deux versions du modèle ont permis d'estimer deux jeux de paramètres.

Dans la **1^{ère} étape** d'estimation pour la **version 1** du modèle, nous avons obtenu un jeu de paramètres pour presque toutes les valeurs fixées de a permettant de reconstituer correctement la donnée observée, avec des valeurs de RMSE proches de 0 et du critère de Nash proches de 1. Parfois, il semble même difficile de définir une valeur de a se rapprochant au mieux de l'observation. Cela pose la question de l'unicité des paramètres : si l'on ne trouve pas d'extremum absolu pour ces critères. Souvent les simulations effectuées avec les jeux de paramètres obtenus pour $a=1$ et $a=6$ sont les plus éloignées de l'observation, cela peut être considéré comme « normal » car ce sont les valeurs bornes de l'intervalle de a .

La figure IV – 8 représente la relation entre a et $\log_{10} b$, obtenu pour les différentes versions du modèle (avec les données images en vert et sans les images en rouge), et pour les deux étapes de l'ajustement (b ajusté pour les différentes valeurs de a fixées, et a et b ajustés simultanément en symbole unique). Les courbes noires correspondent aux courbes enveloppes définies par le domaine de recherche de b ($\left[\frac{b_{th}}{5}; b_{th} \times 5\right]$; voir section II.3.3.2.3 ; tableau II – 10).

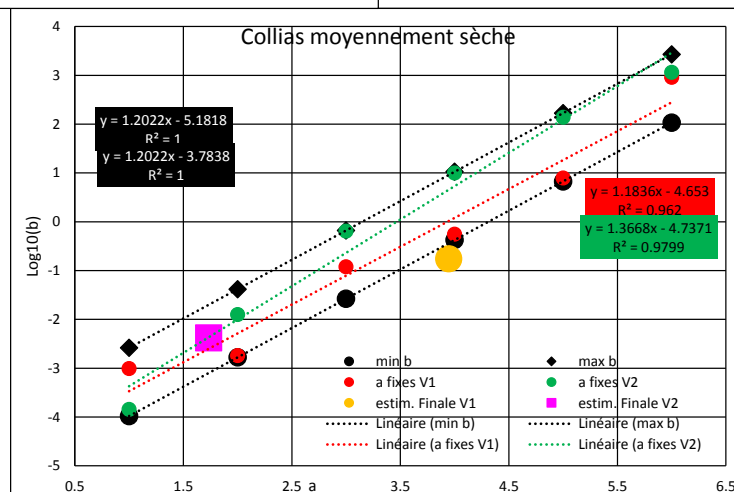
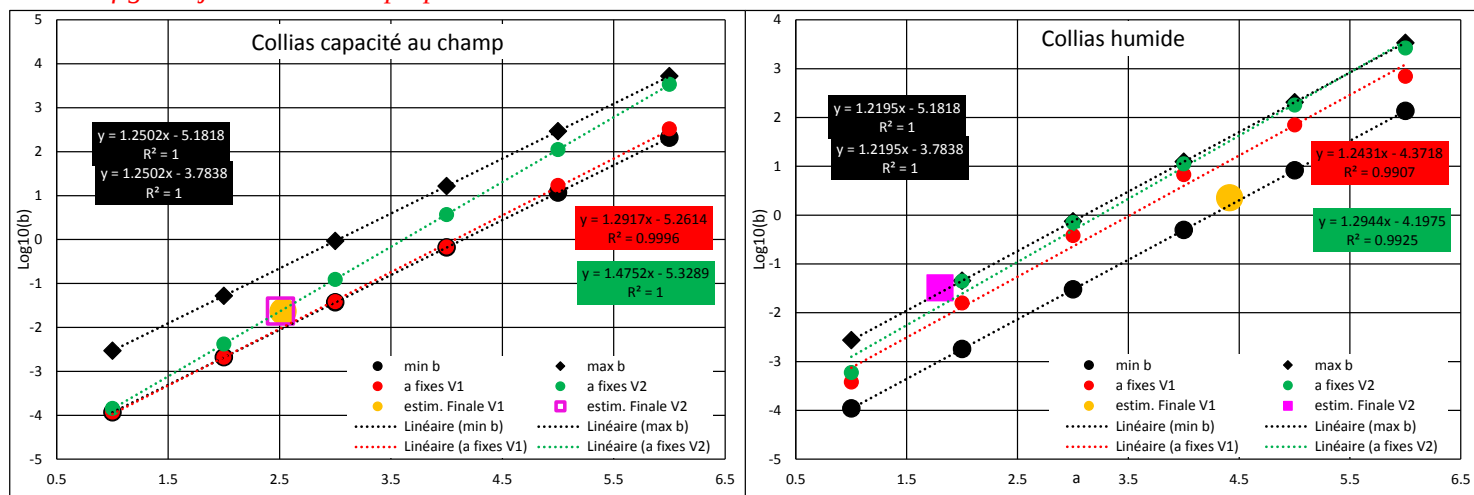
Pour les ajustements obtenus à la 1^{ère} étape, on observe une relation linéaire forte en a et b cela confirme la validité de la relation théorique entre ces paramètres (Eq. II.27) :

$$\log_{10} b = -a \cdot \log_{10} \theta_{max-mac} + \log_{10} K_{sat-mes} \quad [\text{Eq. II.27}]$$

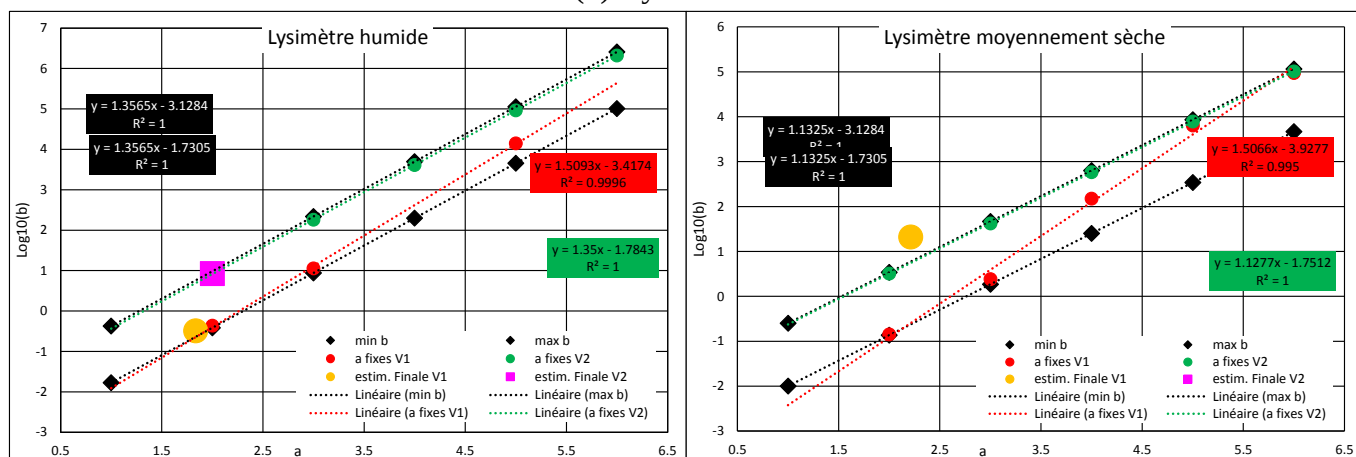
Les ajustements finaux obtenus à l'issue de **l'étape 2** sont situés à l'intérieur de deux courbes enveloppes ou très légèrement à l'extérieur, ce qui semble confirmer la pertinence de ces courbes enveloppes. Ces ajustements ne sont pas systématiquement sur les droites de régressions linéaires obtenues à l'issue de l'étape 1 ce qui signifie que lorsque a et b sont ajustés simultanément le couple solution peut ne pas respecter exactement la relation théorique II – 27. Ceci est particulièrement vrai pour Lysimètre moyennement sèche.

Figure IV – 8 : Relation $\log_{10}(b) = f(a)$
pour toutes les valeurs de a fixes (version 1 : rouge, version 2 : vert)
et le couple $a - b$ final (2nde étape, version 1 : figurés jaunes et version 2 : figurés roses)
 (a) Collias

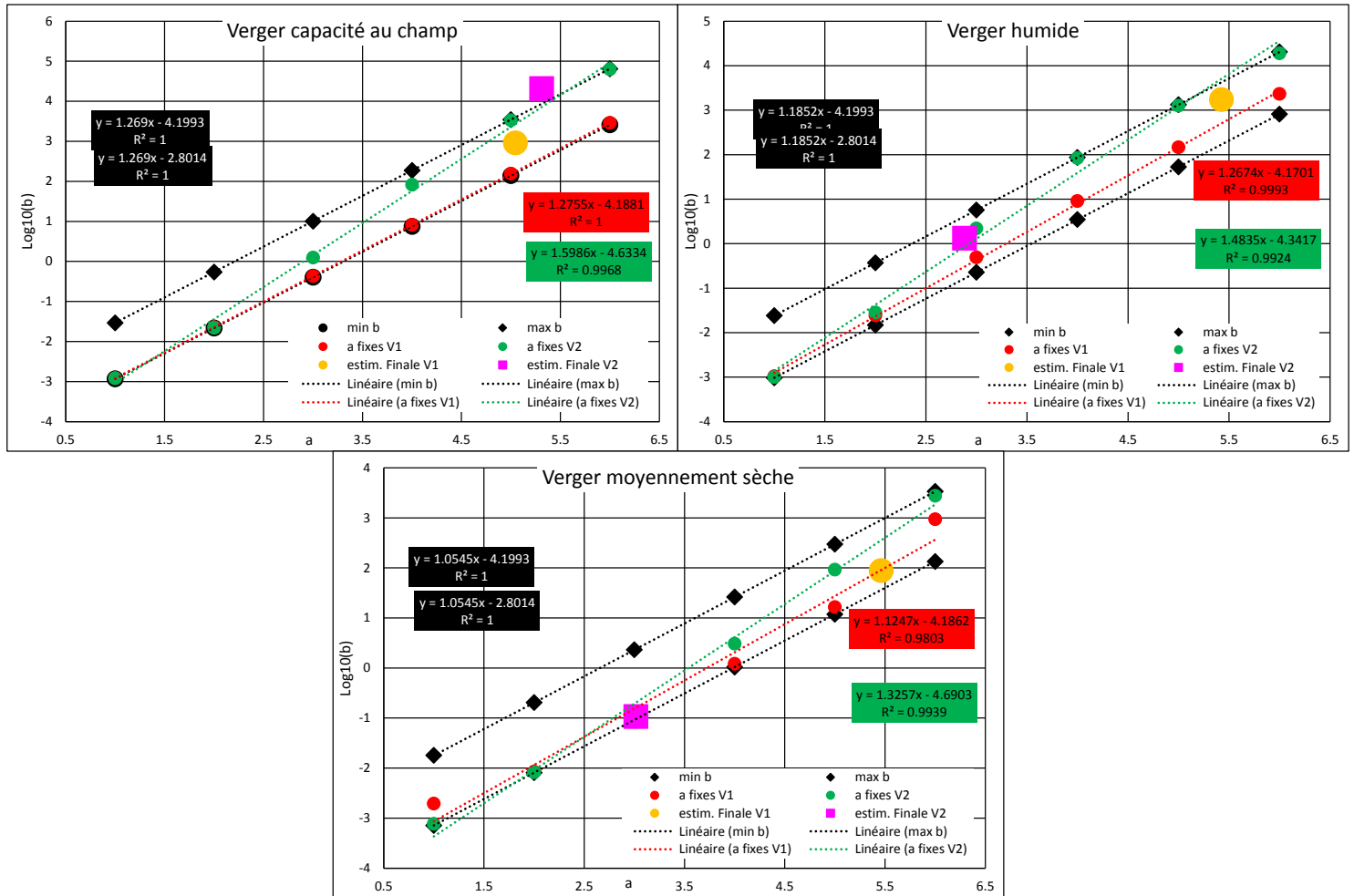
*Attention sur Collias capacité au champ
 figurés jaune et rose superposés*



(b) Lysimètre



(c) Verger



Pour la 2^{nde} étape de l'ajustement avec la **version 1** du modèle, on observe que les valeurs finales estimées de a sont différentes selon le type de sol mais qu'elles ne présentent pas de tendance en fonction de la teneur en eau initiale. Pour le sol de Collias, la valeur ajustée de a varie entre 2,5 et 4,4, pour Verger entre 5,0 et 5,5, pour Lysimètre la valeur de a est de 2 et ne montrent pas de tendance aussi bien selon le type de sol que la teneur en eau initiale.

Dans la **version 2** du modèle, une (voire deux valeurs) du paramètre a donne des reconstitutions du drainage très réalistes à l'issue de l'**étape 1**, contrairement à ce qui est observé pour la version 1 pour cette même étape : il n'y a pas unicité des jeux de paramètres ajustés pour la version 2 du modèle. Une exception à cette constatation est pour la teneur en eau initiale à capacité au champ. En effet, dans cette version 2 du modèle, les 6 valeurs de a fixes donnent une bonne reconstitution du drainage pour les sols de Verger et Collias. Ceci peut s'expliquer car à cette teneur en eau initiale, les échanges entre macroporosité et matrice n'ont pas lieu ou sont très petits : fixer les paramètres du terme d'échange (version 2 du modèle) ou les laisser libre et tenter de les ajuster (version 1 du modèle) n'aura pas d'impact sur l'inversion et la qualité de l'ajustement. Les résultats finaux obtenus dans ces conditions se rapprochent donc de ceux obtenus avec la version 1 du modèle : les intervalles de recherche restreints pour a déterminés à l'issue de l'étape 1 sont similaires pour les 2 versions du modèle ($a \in [2; 3]$, $a \in [5; 6]$ pour Collias et Verger respectivement). Les valeurs finales de a et b sont peu différentes,

et les valeurs finales des autres paramètres diffèrent cependant pour ces deux simulations car les paramètres profilés issus de l'image y sont de surcroît pris en compte dans le calcul de b et dans l'optimisation DREAM.

L'algorithme DREAM a eu des difficultés à optimiser les paramètres permettant une bonne reconstitution du drainage pour deux simulations en version 2 : Collias en conditions humide et moyennement sèche, alors que dans la version 1, il n'a eu aucun problème pour ces simulations. Pour toutes les autres simulations, l'algorithme donne des résultats relativement satisfaisants. Il semble donc que l'ajout des données images profilées pour ces simulations n'améliorent pas l'estimation et même ne permettent pas un ajustement optimal à la donnée observée. Dans le cas de Verger, les optimisations, quelle que soit la teneur en eau initiale permettent de définir un intervalle de valeurs de a donnant une bonne reconstitution du drainage. Et enfin dans le cas de Lysimètre, les optimisations dans les deux conditions initiales les plus sèches donnent des reconstitutions sous estimant systématiquement (quelle que soit a) la quantité drainée à la fin de la simulation (5 mm au maximum), et n'arrivent pas à reproduire la dynamique de la phase de drainage pur, à partir de 5400 s. Ainsi l'optimisation engendre des courbes simulées très plates, signifiant que le drainage s'arrête à l'arrêt d'apport d'eau, alors que la phase finale observée montre une dynamique où le drainage se poursuit de quelques millimètres d'eau durant les 30 min de drainage.

Une autre façon de représenter les jeux de paramètres obtenus à la 1^{ère} étape (valeur fixes de a) et 2^{nde} étape (valeur finale de a) est d'utiliser la représentation en « radar », figure IV – 9a, b, c (3 sols et trois teneurs en eau initiale de la version 1 du modèle) et figure IV – 9d, e et f (3 sols et trois teneurs en eau initiale de la version 2 du modèle). Sur ces graphiques les paramètres b , v , distance intermacropores (d) et la macroporosité ($\theta_{max-mac}$) sont représentés par le logarithme décimal de leurs valeurs respectives. Ces figures montrent que les paramètres : d , $\theta_{max-mac}$ et v ne varient pas ou très peu comparées aux variations de b selon les valeurs de a . Lorsque les valeurs de a augmentent, celles de b également avec la même amplitude d'augmentation les écarts sont similaires entre les courbes à a fixes. Le jeu de paramètres obtenu à la 2^{nde} estimation (« $a=fin$ » sur les graphiques de la figure IV – 9) s'inscrit dans les jeux de paramètres obtenus à a fixes. On ne note pas d'écart différent des écarts vus entre les courbes à a fixes.

Dans l'étude de Germann et Di Pietro (1996), il ressort quelques valeurs caractéristiques du paramètre a , ainsi les auteurs suggèrent qu'une valeur de a égale à 2 indique des macropores formant des tubes, et une valeur de 3 indique des macropores sous forme de fissures planes. Une valeur de a inférieure à 2 indique un écoulement turbulent, si elle supérieure à 2 cela indique un écoulement tortueux dans un réseau poral complexe. De manière générale, une valeur de a grande indique un écoulement lent et tortueux. Le paramètre est aussi dépendant de l'intensité de l'apport d'eau. Avec ces considérations, il est probable que la complexité du réseau poral soit un facteur prédominant car la majorité des valeurs de a estimées sont supérieures à 2, quelques-unes sont inférieures à 2 traduisant potentiellement un écoulement très turbulent mais cela dépend de la version du modèle et donc de l'utilisation de données tomographiques. Les valeurs estimées de b ne semblent pas être dépendantes de l'intensité de l'apport d'eau, ni de la texture ni du type de sol, elles semblent être seulement dépendantes des valeurs de a .

Le modèle a été ajusté sur la variable représentant le drainage cumulé en bas de colonne. De plus, la confrontation entre modèle et expérience a été faite pour les neuf cas expérimentaux.

La **version 1** du modèle donne de bonnes reconstitutions dans 4 cas expérimentaux (Collias et Verger à capacité au champ, et Collias et Verger humide), 2 cas ont totalement non convergés (cas « ND » ; Lysimètre capacité au champ et moyennement sèche), 2 cas montrent une dynamique identique à l'observation la seule différence est à la quantité drainée à la fin qui diffère de quelques millimètres d'eau (Collias et Verger à moyennement sèche), et 1 cas expérimental où le drainage simulé est très éloigné en dynamique et en quantité de la courbe observée (Lysimètre humide).

Dans la **version 2** du modèle, 3 cas expérimentaux donnent des simulations très proches de la donnée observée (Collias et Verger à capacité au champ et humide), les 2 mêmes cas non convergent (« ND » ; Lysimètre à capacité au champ et moyennement sèche), 3 cas donnent des drainages simulés (Version 2) éloignés des observations alors que la version 1 fournit une très bonne reconstitution (Collias humide et moyennement sèche et verger moyennement sèche), et 1 cas avec les deux versions du modèle donne des reconstitutions très proches l'une de l'autre mais très éloignées de l'observation (Lysimètre humide).

Ces différents cas expérimentaux montrent que le modèle en version 1 est plus performant, c'est-à-dire qu'il parvient plus souvent à ajuster les paramètres permettant de reconstituer la variable de sortie de manière assez proche de l'observation. Cependant, ce n'est pas systématique, et la version 2 du modèle parvient dans 3 cas à ces mêmes reconstitutions. Les cas expérimentaux pour lesquels les deux versions parviennent à des simulations proches des observations sont à capacité au champ et humide de Verger, et à capacité au champ de Collias. Dans le cas de Lysimètre, aucune version ne parvient à donner de bonnes reconstitutions. Dans les cas testés loin de la capacité au champ, la version 1 parvient mieux à reconstituer le drainage. Le modèle fonctionne de façon correcte à des teneurs en eau variables pour la version 1 pour les deux sols Collias et Verger. La version 2 fonctionne bien dans tous les cas expérimentaux de Verger, mais moins bien dans les cas les plus secs de Collias. Les deux versions fonctionnent très mal dans le cas de Lysimètre.

Ainsi, il semble que dans certains cas, l'information issue de l'imagerie et intégrée sous forme de profils de paramètres dans le modèle soit « pertinente », c'est à dire qu'elle permet d'ajuster les autres paramètres et de reconstituer de façon satisfaisante les données expérimentales : dans ces cas, on peut dire que le formalisme utilisé et les paramètres associés implémentés dans la modélisation ont un sens physique qui correspond à des informations sur l'organisation spatiale du réseau de macropores. Ceci n'est cependant pas le cas systématiquement, ce qui conduit à relativiser les conclusions précédentes.

Afin de vérifier la capacité du modèle à reproduire les expériences réalisées, il a été utilisé la variable de stockage d'eau dans la colonne de sol mesurée par les balances durant l'expérience. Bien cette variable ne soit pas totalement indépendante du drainage (variable d'ajustement).

Dans la **version 1** du modèle, 6 cas simulés donnent des reconstitutions du stockage très proches de la donnée observée (Collias et Verger – 3 conditions initiales), 2 cas n'ont pas convergé (Lysimètre capacité au champ et moyennement sèche), et 1 cas (Lysimètre – humide)

où la dynamique de stockage n'est pas reproduite, mais la quantité d'eau présente dans la colonne à l'arrêt de l'infiltration (5400 s) est très proche de la quantité mesurée (différence de 1 mm d'eau environ).

Dans la **version 2** du modèle, les 2 mêmes cas n'ont pas convergé, 4 cas donnent des courbes de stockage similaires à l'observation (différence inférieure à 2 mm d'eau) pour les conditions expérimentales à capacité au champ et moyennement sèche, à la condition humide la reconstitution est moins proche de l'observation. Et les 3 cas simulés à condition initiale humide, donnent des courbes simulées à dynamique très éloignée de l'observation mais là également la quantité stockée à l'arrêt de l'infiltration (5400 s) est similaire à l'observation (différence d'environ 1 à 2 mm d'eau).

Ces deux variables utilisées en calibration (drainage) et validation (stockage), nous permettent de conclure sur la capacité du modèle couplé à reproduire des expériences d'infiltrations – drainage en conditions générant des écoulements rapides. Ce sont les deux seules variables mesurées de façon rigoureuse et qui présentent ce qui s'est « déroulé » dans les colonnes de sols. La validité du modèle est corroborée par ces résultats confrontés entre les 2 versions du modèle. En effet, en ajoutant des données mesurées afin de remplacer des paramètres auparavant ajustés, nous obtenons des reconstitutions très proches de la donnée observée. Mais ces derniers montrent que la version 1, présentant le plus de paramètres à optimiser est celle qui permet de reproduire la donnée observée plus souvent qu'en utilisant la version 2. La version 2 présente 3 paramètres à optimiser et intègre les profils (400 valeurs environ) issus de l'imagerie, on peut supposer que ces deux caractéristiques vont contraindre plus fortement le modèle et donc la convergence des estimations. Les résultats simulés du stockage et drainage issus de la version 2 du modèle montrent des résultats plus éloignés de l'observation et ne reproduisant pas toujours la dynamique de l'écoulement mais les simulations obtenues sont tout de même assez proches des simulations obtenues dans la version 1.

On peut en conclure que l'ajout des données d'imagerie dans le modèle ne dégrade que très peu la capacité du modèle à reproduire la réalité mesurée. Cette dégradation peut être due à la façon dont sont mesurés les profils sur l'image, notamment dans le cas du profil de distance intermacropores qui nécessite quelques étapes de traitement d'image, pouvant engendrer des pertes ou modification d'informations.

La stratégie d'ajustement en deux étapes aurait pu être remise en cause si des intervalles de recherche restreint de a n'avaient pas pu être identifiés à l'issue de la première étape. Ceci n'a pas été le cas. Un intervalle de recherche restreint a pu être défini dans tous les cas testés, car les critères de choix sont multiples, la stratégie à deux étapes est validée *a posteriori*. Par contre, la version 1 du modèle semble présenter un problème d'unicité des paramètres, car durant l'étape 1 d'ajustement plusieurs jeux de paramètres très différents ont été capables de reconstituer la donnée observée. Il semblerait nécessaire d'utiliser d'autres données expérimentales pour mieux contraindre le modèle dans cette version.

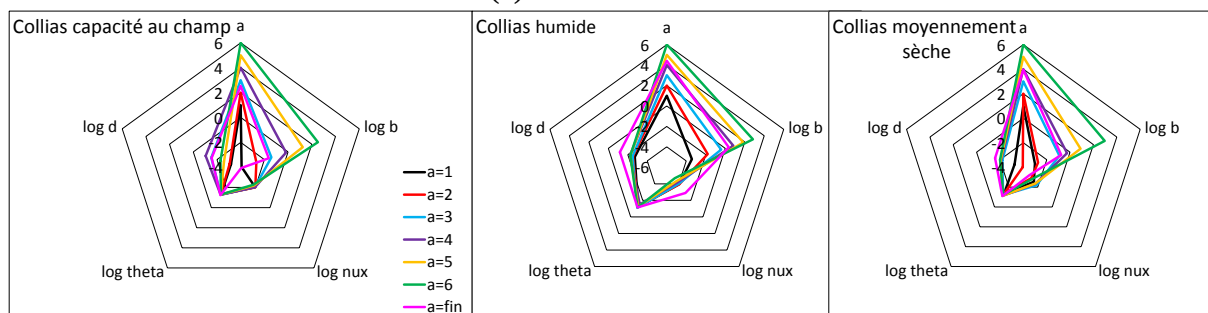
Ainsi la mesure du profil de teneur en eau durant l'infiltration – drainage serait une donnée intéressante à mesurer afin d'ajouter une contrainte à l'ajustement. En effet, cela donnerait des informations sur la quantité d'eau circulant dans le sol durant les expériences. Des sondes capacitatives et des microtensiomètres ont été installés, cependant ils n'ont pas pu être utilisés durant ces expériences d'infiltrations mais uniquement pour connaître le profil de

potentiel matriciel initial. Cela est dû principalement à des erreurs expérimentales non corrigeables.

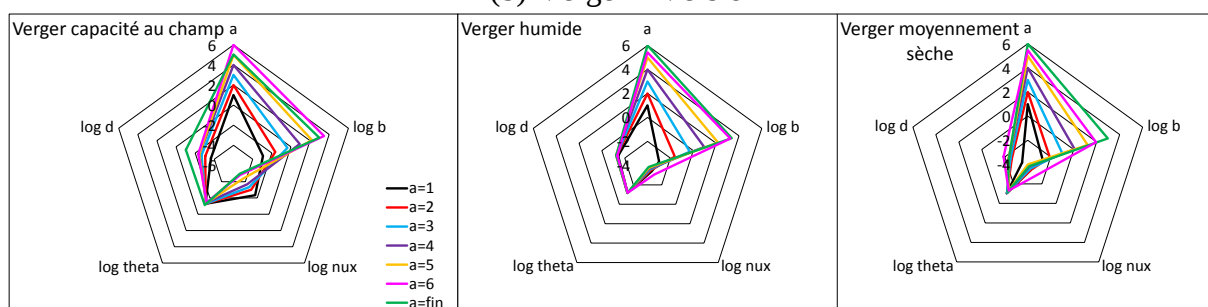
L'utilisation de la variable du drainage cumulé pour l'ajustement des paramètres est une première étape mais nécessite de mesurer d'autres variables calculées par ailleurs dans le modèle afin de mieux contraindre et/ou fournir une variable de validation du modèle qui ne soit pas corrélée à la variable qui sert à l'ajustement comme celle du stockage utilisée dans ce travail.

Figure IV – 9 : Représentation « radar » des jeux de paramètres ($\log_{10}(b, v, d, \theta)$) pour les trois sols, trois teneurs en eau initiales différentes. Version 1 : a, b et c. Version 2 : d, e et f.

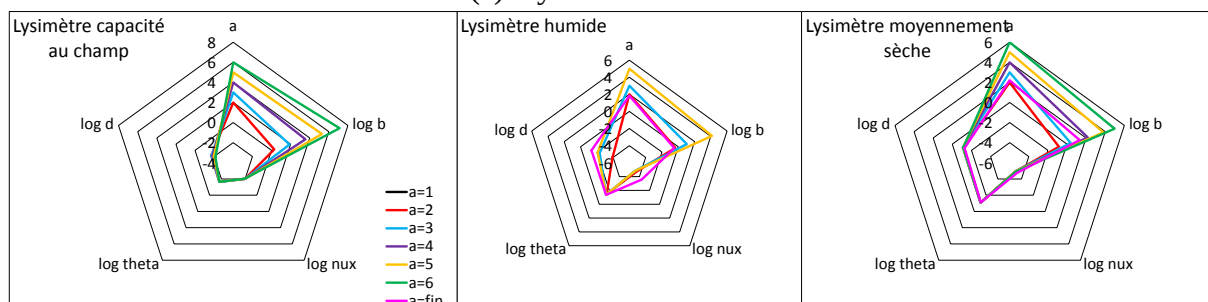
(a) Collias – Version 1



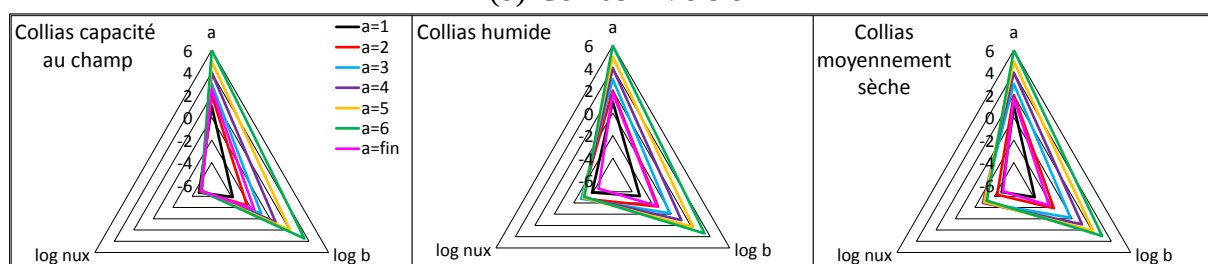
(b) Verger – Version 1



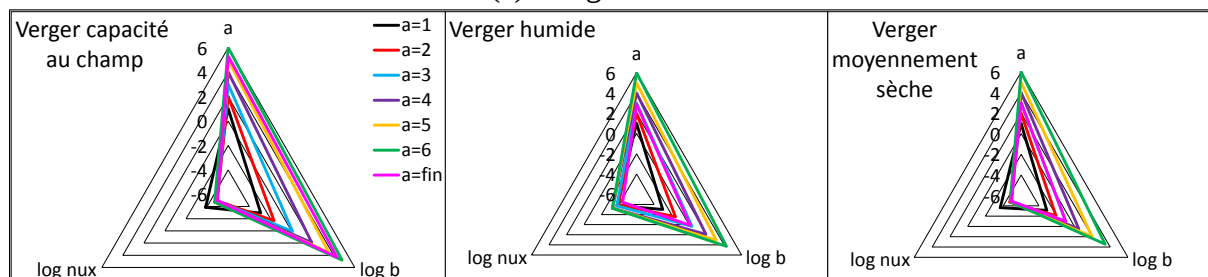
(c) Lysimètre – Version 1



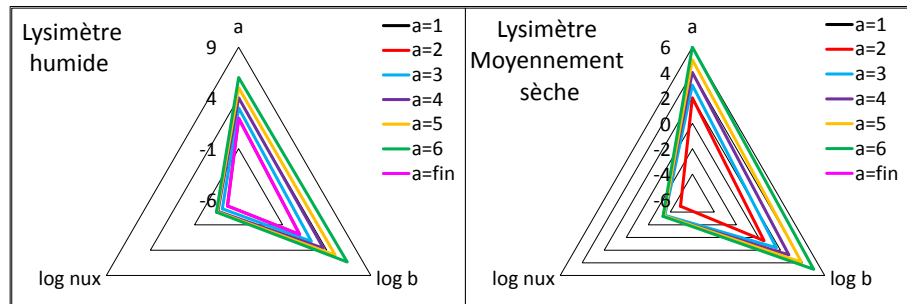
(d) Collias – Version 2



(e) Verger – Version 2



(f) Lysimètre – Version 2



En résumé, les buts de la modélisation des expériences d’infiltration – drainage suivies au tomographe médical RX étaient de :

- (1) voir si le modèle de transfert d’eau couplé est fonctionnel sur différents sols et à différentes teneur en eau initiales, et quelles sont ces limites (s’il y en a) ;
- (2) estimer l’ensemble des paramètres du modèle (KDW + terme d’échange) ;
- (3) estimer les paramètres du modèle avec le terme d’échange fixé par la mesure sur les images tomographiques.

Le but global est de conclure sur les hypothèses faites sur les paramètres du terme d’échange, et de voir si l’ajout de mesures obtenues à partir d’images permet de bien modéliser les expériences voire de les améliorer. Ceci constitue une nouveauté, car c’est la première fois que des paramètres estimés sont remplacés par des profils issus de mesures tomographiques de la structure des sols.

Fixer des paramètres ne permet pas d’améliorer la reconstitution du drainage comparée à l’estimation de l’ensemble des paramètres du modèle (RMSE et Nash meilleurs). Cela peut s’expliquer par moins de liberté du modèle (moins de paramètres à estimer). De plus, les paramètres fixés ne sont pas des valeurs uniques et identiques sur la hauteur de sol, mais ce sont des profils avec environ 400 valeurs qui varient à petite échelle pouvant engendrer de fortes variations du terme d’échange et donc modifier les écoulements micro-macropores. Mais l’ajout des paramètres ne dégrade que faiblement les reconstitutions des variables observées.

Les courbes reconstituées par les deux versions du modèle sont très similaires dans les trois sols testés et pour les conditions à capacité au champ et moyennement sèche. Le modèle en condition à capacité au champ a déjà été testé et validé : nos résultats confirment la pertinence d’un modèle couplé Darcy-Richards – KDW dans ces conditions. Et cela peut s’expliquer par un impact important du terme d’échange sur la dynamique hydrique globale de la colonne : la matrice étant plus sèche, sa capacité d’absorption hydrique est plus importante qu’en condition humide. En conditions humide et moyennement sèche, le modèle utilisant les données de la tomographie est plus éloigné de la donnée observée. Cela peut sans doute être expliqué par des difficultés du modèle à gérer la teneur en eau plus faible de la matrice, ce qui entraîne des difficultés à gérer le temps de percée comparé aux simulations à capacité au champ. En effet, les courbes de stockage simulées en condition humide montrent que l’estimation avec les données d’imagerie entraîne un comportement du modèle comme si celui-ci engendrait beaucoup moins d’échange depuis les macropores vers la matrice, avec des temps de percée

plus précoces et des pentes durant la phase transitoire plus importantes et plus éloignées de l'observation.

Le modèle est testé sur différents types de sols et à différentes teneurs en eau afin de voir ses performances et ses limites éventuelles. Le sol du Lysimètre est le sol pour lequel le modèle a plus de difficulté à reconstituer la donnée observée et indépendamment de la teneur en eau initiale. Pour les deux autres types de sols, quelle que soit la teneur en eau initiale, le modèle est assez performant dans la reconstitution des données observées lorsque les données de l'imagerie sont utilisées. Si l'ensemble des paramètres de l'équation de KDW et du terme d'échange sont estimés (version 1), le modèle éprouve moins de difficulté à reconstituer les données observées.

IV.4.2. Estimation des paramètres du terme d'échange et à partir de l'imagerie

L'étude de la littérature sur la modélisation des écoulements préférentiels a montré différents types d'approches possibles. Les modèles à double compartiments ont un terme d'échange (ou de couplage) qui permet des mouvements d'eau depuis les macropores vers la matrice pour la plupart, et rarement dans le sens inverse (matrice vers macropores). Ces termes d'échanges sont basés sur les principes suivants : par gradient de teneur en eau, gradient de potentiel matriciel ou flux d'eau. Des paramètres de formes et d'échelles sont intégrés afin de prendre en compte la géométrie des agrégats ou du milieu poreux, ce sont souvent les seuls à devoir être estimés.

Le modèle utilisé ici, intègre un terme de couplage afin de traduire les échanges d'eau entre la matrice et la macroporosité. Les équations de Darcy-Richards et de KDW ont déjà été validés par de nombreux travaux précédant cette thèse, mais le couplage entre ces deux équations n'a jamais été testé auparavant.

Pour l'ensemble des cas testés dans ce travail de thèse, la modélisation avec l'intégration des données issues de l'imagerie montre que l'hypothèse faite sur la signification physique des deux paramètres de la distance intermacropores et de la macroporosité est une hypothèse valide, et qui permet de simuler les courbes observées à l'aide des mesures gravimétriques. Cette hypothèse est appuyée par le fait que les bilans de masse tracés sont corrects et complets par compartiments de porosité (matrice et macropores) pour chaque expérience aucune perte et/ou gain d'eau n'a été constaté (annexe 3a et 3b).

L'ajout des profils d'imagerie pour remplacer l'estimation de certains paramètres induit une perte dans la qualité de reconstitution des courbes de drainage et de stockage. La différence entre données expérimentales et simulées est plus marquée pour les expériences dont la teneur en eau initiale s'éloigne de la capacité au champ, ce qui s'explique car le terme d'échange devient plus important quand la matrice n'est plus saturée. On peut supposer que la distance intermacropores est un paramètre important, mais mal compris ou mal intégré dans le modèle. De plus, l'analyse de sensibilité faite sur la variance du drainage cumulé en bas de colonne et en sortie des macropores, indique une forte contribution de ce paramètre, bien plus que la macroporosité ($\theta_{max-mac}$). Cette analyse montre aussi une grande interaction entre les paramètres testés dans le cas où aucun profil n'est intégré. On suppose que les deux paramètres du terme d'échange testés induisent des interactions entre eux et avec les autres paramètres du modèle KDW (a , b et ν). Les interactions indiquent une interdépendance des paramètres entre

eux. L'influence du paramètre de distance intermacropores sur la variable de sortie testée indique bien l'importance de ce dernier, les interactions constatées complètent cette observation.

Dans le terme d'échange, le paramètre de distance intermacropores est présent au carré. Ceci peut contribuer à augmenter son importance dans les échanges entre matrice et macroporosité. Cela semble être confirmé car les modélisations faites avec et sans le profil de ce paramètre diffèrent plus lorsque les conditions initiales de teneur en eau s'éloignent de la capacité au champ. Plus le paramètre de distance est grand, et plus le terme d'échange diminue et moins la quantité échangée est importante depuis les macropores vers la matrice.

IV.4.2.1. Estimation expérimentale du paramètre d

La mesure de ce paramètre à partir des images est une première approche. La méthodologie globale du traitement d'images de tomographie médicale a été établie et éprouvée également avant ce travail de thèse (Sammartino et al., 2012, 2015). De nouvelles étapes ont été ajoutées notamment l'extraction du profil de distance intermacropores, cette étape a été réalisée sur les images de la macroporosité « percolante ». Cette information est définie sur les sections (2D) puis réduite à une information purement verticale en moyennant l'information par section. On peut supposer une perte d'information de la continuité verticale des macropores (résolution à 400 μm). On peut envisager d'extraire cette information d'une autre manière sur les images, en trouvant une autre méthodologie afin confronter les données mesurées selon plusieurs protocoles.

IV.4.2.2. Comparaison des distances intermacropores ajustées et obtenues en tomographie

L'estimation des paramètres par DREAM donne des valeurs de la distance intermacropores d'environ un ordre de grandeur supérieur à la moyenne calculée sur les profils, pour toutes les expériences réalisées au scanner. Cette constatation ajoutée à la moins bonne qualité de la modélisation lors de l'utilisation des profils de distance (vue précédemment) semble indiquer que le paramètre de distance intermacropores, présent au carré dans le terme d'échange, n'est peut-être pas le plus pertinent sous cette forme. Bien que DREAM estime d dans un intervalle relativement large.

On peut supposer que ce paramètre de distance caractéristique des milieux poreux soit plus complexe, et inclut plusieurs phénomènes physiques ne signifiant pas uniquement l'influence de la distance entre les macropores dans l'échange macropores – matrice. On pourrait revoir la façon dont la dimension caractéristique des milieux poreux est définie dans ce terme de couplage. Pour cela on pourrait définir deux paramètres de distance dans le terme d'échange, par exemple en gardant (i) la distance intermacropores qui prend en compte la distance séparant deux macropores, et en ajoutant (ii) une taille d'agrégat.

IV.4.2.3. Estimation expérimentale du paramètre $\theta_{max-mac}$

Le paramètre $\theta_{max-mac}$ est défini dans le modèle utilisé dans cette thèse avec pour définition d'être la macroporosité maximale. Afin d'intégrer une donnée mesurée, ce paramètre

a été assimilé à la quantité de macropores présents dans le sol, ce qui se traduit par la mesure de la macroporosité sur les images tomographiques. Afin d'être plus représentatif des écoulements, il a été choisi d'intégrer plutôt la macroporosité « percolante » ce qui se traduit par l'extraction de l'ensemble de la macroporosité connectée à la surface du sol.

IV.4.2.4. Limites de l'estimation expérimentale du profil de macroporosité

Dans le terme d'échange, la macroporosité ($\theta_{max-mac}$), n'est pas un paramètre ressortant comme influençant la variance de la variable testée dans l'analyse de sensibilité. Cependant le remplacement de paramètres du modèle par des mesures est nécessaire afin de pouvoir estimer au mieux les paramètres restants ne pouvant pas être mesurés et d'avancer vers une indépendance des paramètres du modèle aux conditions aux initiales et aux limites.

Nous avons supposé que la macroporosité était égale au pourcentage de macroporosité percolante dans les sols. La mesure des profils sur les images ne nécessite pas d'étape particulière de traitement d'image comme c'est le cas pour le paramètre de distance moyenne intermacropores. Les profils des macroporosités totales et percolantes montrent peu de différence, seules les valeurs changent mais les patterns sont identiques. L'extraction de ce profil sur les images, que ce soit la macroporosité percolante ou totale n'induit probablement pas de biais ou d'erreur comme cela est potentiellement le cas pour le profil de distance intermacropores. Cependant la seule limite à noter est que la macroporosité détectée au scanner médical n'est pas égale à celle réellement présente dans les colonnes de sol, limitation de la résolution du scanner. La limite de la mesure de la macroporosité présente dans un sol au scanner est donc liée quasi uniquement à la résolution des images. Un facteur peut aussi entraîner un biais de quantification : la présence d'effet de bordure induit par le bord PVC autour du sol, ceci n'est évidemment pas présent dans un champ et donc peut entraîner une surestimation lors de travaux d'imagerie. Mais il convient de conserver la quantification des macropores de bordure car durant l'infiltration – drainage réalisée dans cette étude, ils contribuent potentiellement à l'écoulement de l'eau. Il faut cependant garder en tête, qu'au champ il peut se développer des fissures très grandes. Dans l'absolu, d'un point de vue expérimentations en laboratoire, il conviendrait de développer une enceinte PVC (ou autre matériau, type caoutchouc) afin d'entourer les échantillons de sol dans une enveloppe déformable qui accompagnerait les mouvements du sol pendant des phases de retrait et qui permettrait également le gonflement lors de phases d'humectation pendant les expériences d'infiltrations.

IV.5. Comparaison qualitative des teneurs en eau des macropores : imagerie – modèle

L'analyse des images tomographiques donne accès aux marqueurs « eau » contenus dans les macropores durant le passage de l'eau, cette information peut être comparée **qualitativement** à la quantité d'eau s'écoulant dans la macroporosité simulée par les deux versions du modèle pour les restrictions déjà abordées auparavant.

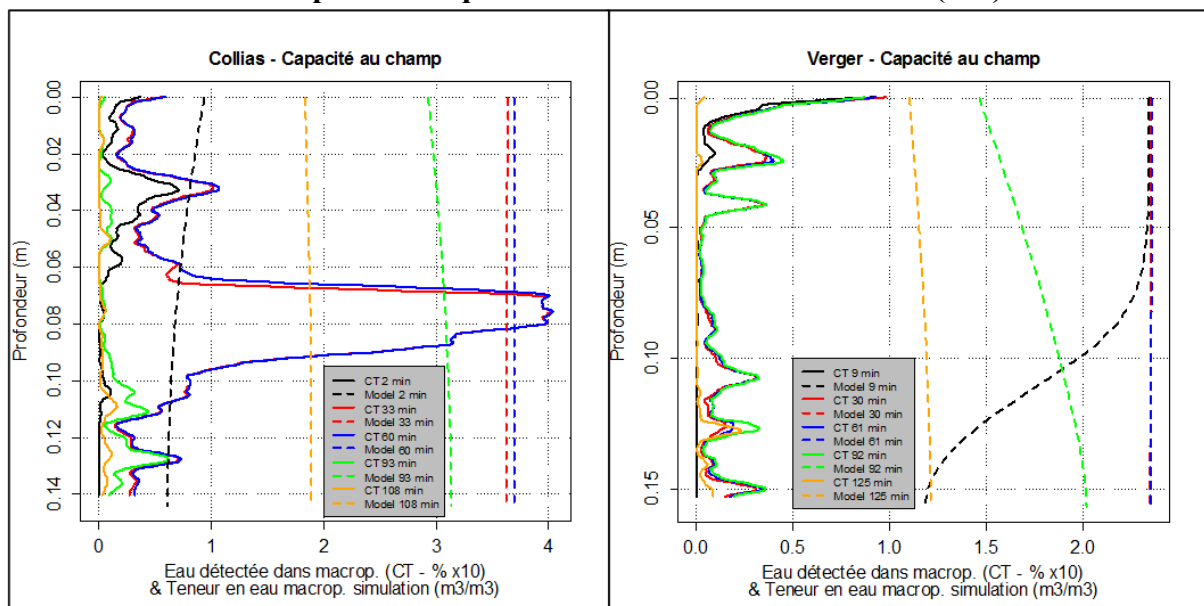
Les graphiques des figures IV – 13 et 14 présentent les profils de la teneur en eau modélisée par les deux versions du modèle. Afin de faciliter la comparaison visuelle entre ces

deux informations, les valeurs des marqueurs eau ont été multipliées par 10 : les profils ne peuvent donc être comparés **uniquement** de façon **qualitative** entre eux. La figure IV – 13 présente la comparaison des marqueurs eau détectés au scanner avec teneur en eau dans les macropores de la version 1 du modèle et la figure IV – 14 présente la version 2 du modèle.

La dynamique temporelle des marqueurs eau détectés au scanner montre que pendant l'infiltration d'eau (90 min), la quantité détectée augmente pour atteindre son maximum de détection à 90 min. Ensuite, pendant la phase de drainage, la quantité d'eau détectée décroît fortement à capacité au champ, et très peu pour les deux conditions initiales plus sèches. La dynamique temporelle de teneur en eau simulée dans les macropores présente une augmentation durant l'infiltration, atteint son maximum à 90 min et diminue pendant le drainage, quelle que soit les versions du modèle.

Une différence majeure réside dans la forme de la courbe simulée selon la version du modèle employée. En effet, dans le cas de la version 1 du modèle, les profils montrent peu de variations selon la profondeur voire sont quasi constants. Tandis que dans la version 2 du modèle, on peut voir que les courbes simulées présentent plus de variations selon la profondeur. Ceci est particulièrement vrai pour les deux expériences les plus sèches. On peut mettre en évidence ici l'importance de la prise en compte de la « forme » de la macroporosité, puisque la version 2 du modèle intègre les profils tomographiques. Dans la version 1, les paramètres prenant en compte la structure dans le modèle, sont uniques et identiques sur la hauteur du profil ce qui explique les courbes quasi rectilignes selon la profondeur.

Figure IV – 13 : Profils de teneur en eau dans la macroporosité simulée (version 1) comparée à la quantité d'eau détectée au scanner (x10).



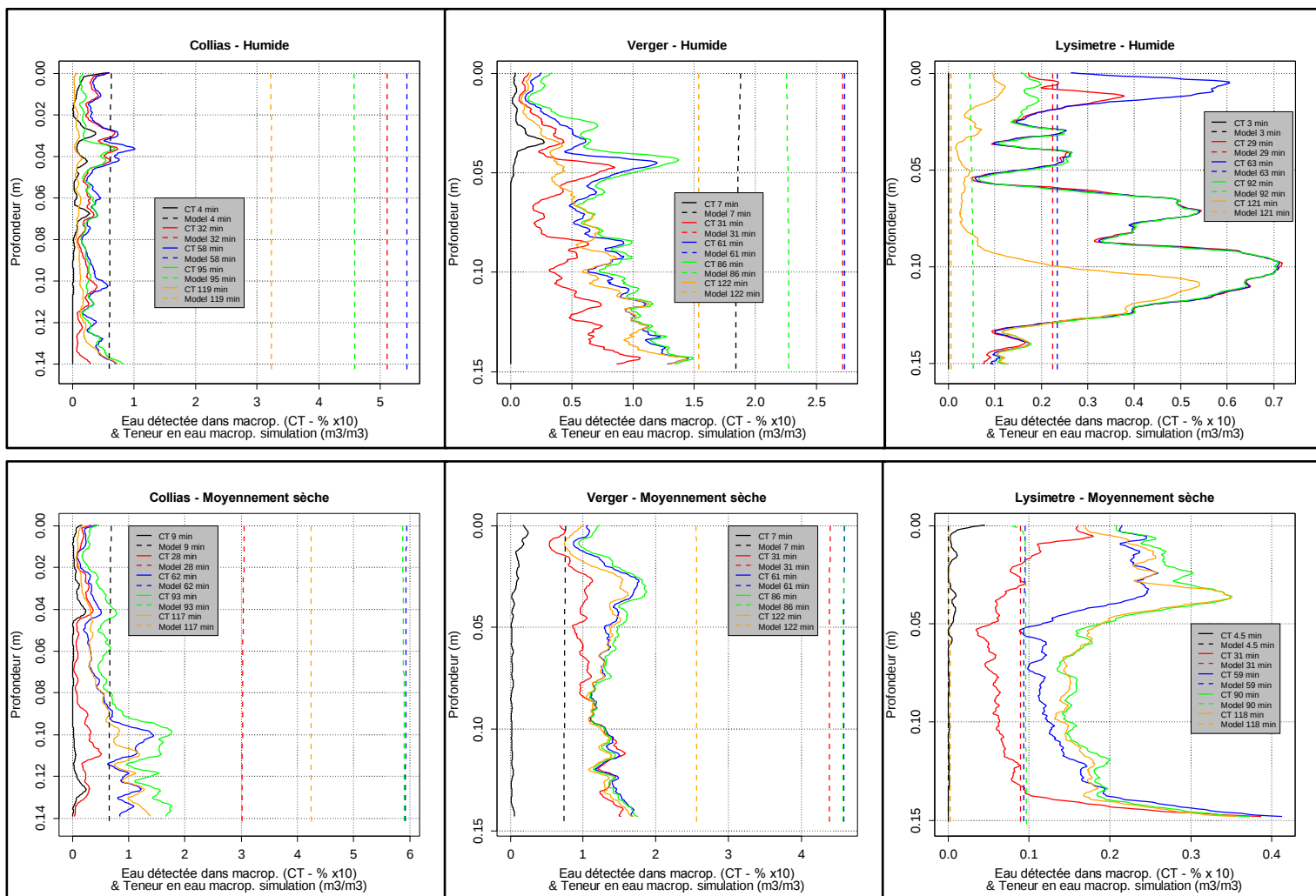
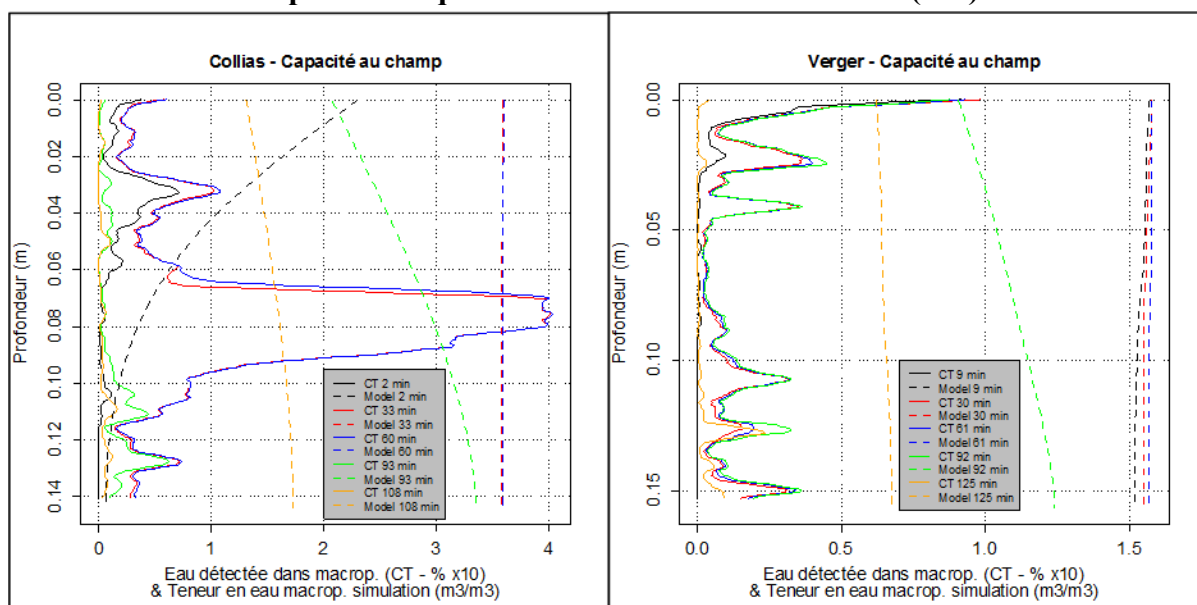
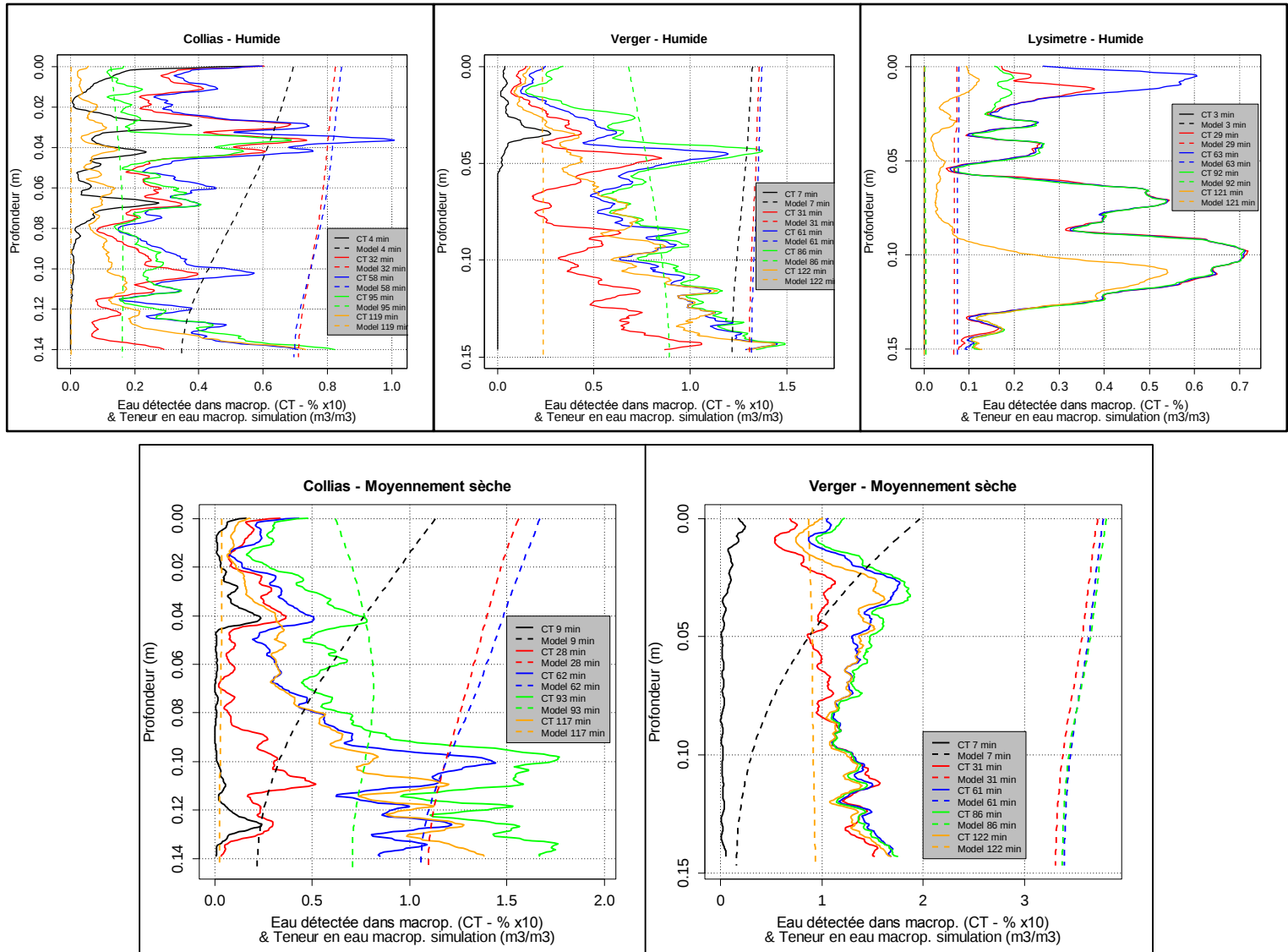


Figure IV – 14 : Profils de teneur en eau dans la macroporosité simulée (version 2) comparée à la quantité d'eau détectée au scanner (x10).





IV.6. Apport de l'expérience dans la modélisation des écoulements préférentiels

Le but de ces travaux de thèse était d'intégrer des mesures physiques réalisées au tomographe RX afin d'améliorer la prise en compte des écoulements préférentiels dans un modèle de transfert d'eau. A notre connaissance, il n'existe que peu d'études menées sur cette thématique.

Naveed et al. (2016) a réalisé une étude dans le but d'améliorer la prédiction des écoulements dans un sol comportant des biopores. Pour cela, il a prélevé 65 échantillons non perturbés d'un sol non travaillé depuis 3 ans, et cultivé lors du prélèvement. Les échantillons sont scannés dans un tomographe industriel (chaîne du traitement d'images figure IV – 15), qui montre les différents paramètres mesurés sur la structure : la macroporosité totale, percolante, la macroporosité percolante effective, la surface spécifique, le rayon hydraulique, le diamètre moyen des macropores, la dimension fractale, la connectivité globale et locale des macropores. Après l'imagerie, les échantillons ont été utilisés pour déterminer : la texture, la teneur en carbone organique, la perméabilité en air, la diffusivité des gaz à -30 et -100 cm de potentiel matriciel, et la conductivité hydraulique à saturation. Le sol du site étudié est classé comme un

sol à texture sablo – limoneux (USDA-NRCS Web Soil Survey, 2010), avec de faibles teneurs en argiles entre 14 et 19 %. Ce sol se rapprocherait du sol de Collias utilisé dans la thèse.

Les modèles empiriques et fonctions de pédotransfert ont été testés afin de prédire la conductivité hydraulique à saturation des échantillons testés, mais ont échouées et montrent bien l'inefficacité de ces modèles ne prenant pas en compte la macroporosité des sols. Les auteurs ont réalisés une analyse de corrélation entre les paramètres extraits des images et les paramètres physiques mesurés, selon les rangs Spearman et en distinguant les sols à écoulement matriciel ou préférentiel dominant. Ces corrélations permettent de mettre en lumière des relations entre la structure des sols et les écoulements d'eau ou le remplissage par les gaz.

Les auteurs, après avoir réalisé une étude statistique complète, ont testé l'utilisation de l'équation de Kozeny – Carmann (Ahuja et al., 1984) afin de modéliser les paramètres d'écoulement d'eau ou du remplissage par les gaz. L'équation est paramétrée de deux façons : (i) avec le paramétrage d'origine de Ahuja et al. (1984) avec la porosité remplie d'air à -30kPa pour la porosité effective, et (ii) en intégrant les paramètres dérivés de l'imagerie.

La prédiction avec les paramètres issus des images donnent de meilleurs résultats que le paramétrage initial. Cela indique que les mesures faites à 129 μm de résolution permettent de modéliser certains paramètres physiques des sols à seule condition contraignante de distinguer le régime d'écoulement (dominant matriciel ou macroporeux avec des macropores percolants).

Cette étude est l'une des rares à mêler imagerie et modélisation avec aussi les études de Katuwal et al. (2015b, 2015a) dans le but de tirer des informations sur la macroporosité afin de les intégrer dans les équations. On voit bien l'apport de la technique afin de mieux prendre en compte les écoulements rapides et préférentiels. On peut voir aussi que les paramètres tirés des images correspondent globalement à ceux extraits dans l'ensemble des études menées : le pourcentage total de macropores, et de macropores percolants, les indices de connectivités, la tortuosité, des indices de Minkowski (Sammartino et al., 2015). Ce sont également ceux qui ont été extraits dans cette thèse, dont quelques-uns sous forme de profils et durant une expérience d'infiltration – drainage.

Figure IV – 15 : Chaîne de traitement et extraction des paramètres de la macroporosité (Naveed et al., 2016)

