Résultats

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse sont présentés suivant les techniques ou méthodologies mises en place et décrites précédemment. La première partie est consacrée à la présentation des résultats issus du suivi gravimétrique des colonnes durant les essais d'infiltrations – drainages. La seconde partie aborde les résultats issus du traitement des acquisitions dynamiques de l'évolution de la macroporosité et de l'eau durant les expériences d'infiltrations – drainages. Et la troisième partie présente les résultats obtenus par modélisation des écoulements et porte plus précisément sur les analyses de sensibilités réalisées et les estimations des paramètres non mesurables.

Résultats du suivi gravimétrique lors des expériences d'infiltrations – drainages

Cette partie présente les résultats de l'évolution de la masse d'eau circulant dans les colonnes de sol (hauteur d'eau dans la colonne) et de la quantité d'eau drainée en bas de colonne lors des expériences d'infiltration d'eau réalisées dans le scanner médical. Ces données permettent de vérifier la quantité apportée et le débit imposé à chaque essai, et d'aborder aussi les limitations de cette technique de suivi.

III.1.1. Vérification des conditions expérimentales : débit et quantité d'eau apportés pour chaque essai

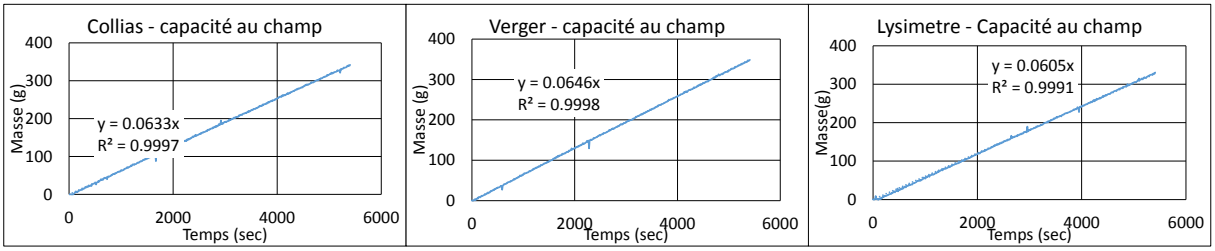
Le suivi de la masse d'eau stockée dans la colonne et drainée, est réalisé toutes les 10 s. Pour vérifier la quantité d'eau apportée, on additionne la masse mesurée par la balance qui collecte l'eau de drainage (suivi du drainage) et les masses mesurées par les balances qui supportent la colonne (suivi de la hauteur d'eau). Il est à noter que pour les colonnes instrumentées (« colonnes jumelles »), en conditions humide et moyennement sèche, le dispositif expérimental est différent : la colonne est disposée sur une balance reliée au dispositif enregistrant aussi les données des microtensiomètres. Cet ensemble enregistre les données toutes les 20 min, sauf dans le cas de la colonne Lysimètre qui est posée sur une balance à enregistrement toutes les 10 s. Pendant l'expérience au scanner médical sur la colonne Verger en condition humide, l'enregistrement de la masse d'eau drainée n'a pas été fait. Durant toute l'expérience, la masse a été suivie manuellement toutes les deux minutes.

L'ensemble des expériences réalisées montre un apport d'eau relativement variable, dont la variabilité est corrélée à celle du flux imposé par le simulateur de pluie constant (fig. III – 1). En effet, bien que la valeur cible soit de 20 $mm.h^{-1}$ et que le simulateur de pluie soit étalonné avant chaque expérience (étalonnage réalisé sur 3 min), on observe une variabilité importante du débit délivré par le simulateur de pluie entre les expériences. Les causes possibles de cette variation peuvent être une erreur d'opérateur (erreur de mesure du débit, ou de calcul du débit) ou des modifications de pertes de charges lors de l'installation du simulateur de pluie (coincement ou courbure des tubes, présence de bulles d'air dans le circuit, pliure au niveau d'aiguilles hypodermiques, …) (tableau III – 1). Les intensités et les apports d'eau sont plus variables pour les essais effectués avec une teneur en eau initiale loin de la capacité au champ, ces variations doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats. Ce problème

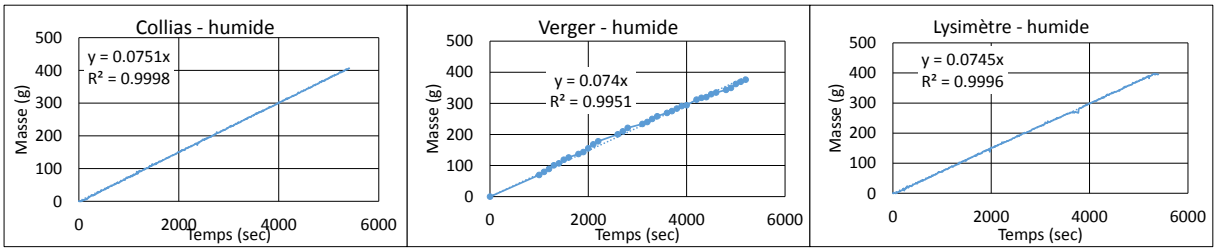
d'intensité délivrée différente n'a pu être vu qu'à l'issu de l'expérience lors du traitement des données mesurées par les balances. L'apport d'eau durant les expériences est constant.

Figure III – 1 : Suivi de l'apport d'eau (sortie délivrée par le simulateur de pluie) pendant la phase d'infiltration (de a à c = expériences réalisées au scanner ; d à f = expériences sur « colonnes jumelles » en laboratoire)

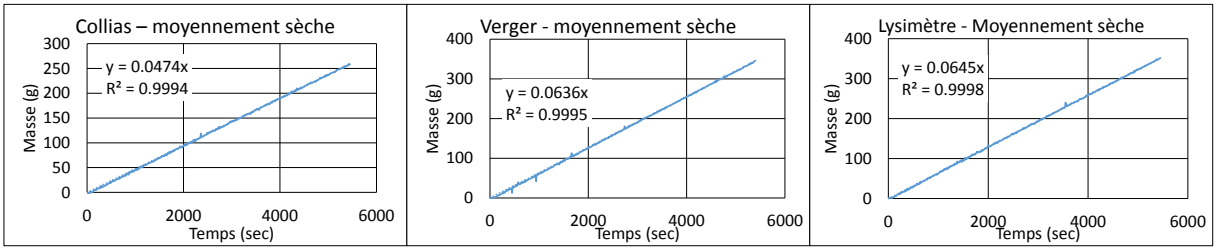
(a)



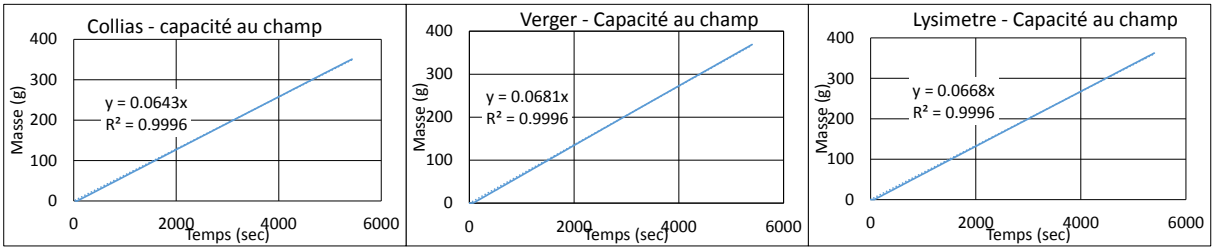
(b)



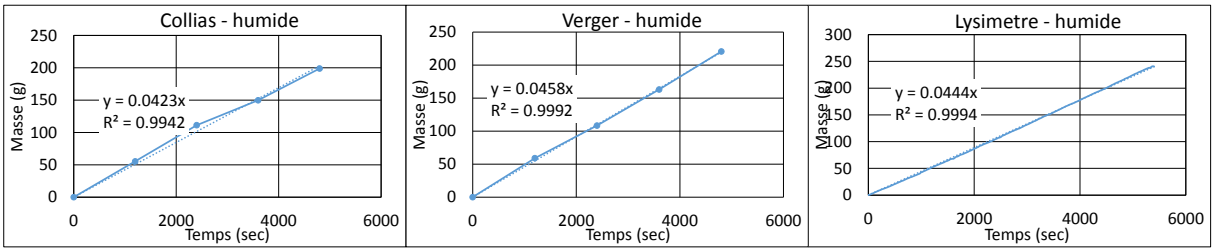
(c)



(d)



(e)



(f)

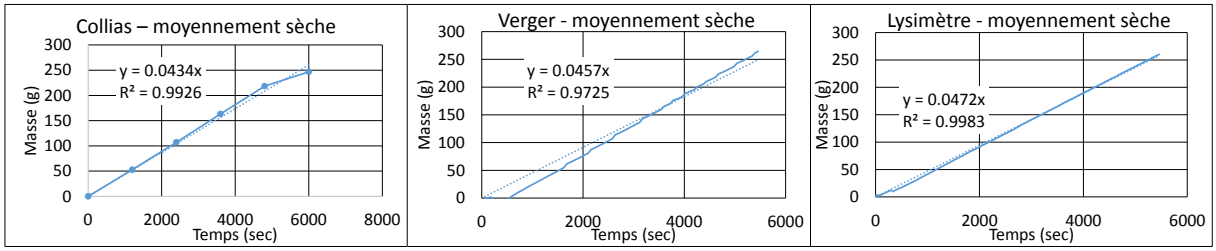


Tableau III – 1 : Résumé des expériences d'infiltration – drainage faites au scanner et au laboratoire

(« scanner » signifie les colonnes ayant fait l'objet d'infiltrations au scanner médical ; « instru. » signifie les colonnes jumelles restant en laboratoire et qui sont instrumentées)

	Collias scanner	Collias instru.	Verger scanner	Verger instru.	Lysimètre scanner	Lysimètre instru.
Expérience infiltration – drainage 1 : « Capacité au champ » (potentiel matriciel init. ~ -0,1 m)						
Apport eau (mm)	30.5	35.1	30.6	32.8	28.8	32.2
Eau drainée (mm)	27.2	32.3	28.2	30.2	5.9	28.7
Eau stockée (mm)	3.4	2.7	2.4	2.6	22.8	3.6
Intensité ($mm.h^{-1}$)	20.3	23.4	20.5	21.8	19.2	21.5
Expérience infiltration – drainage 2 : « Humide » (potentiel matriciel init. ~ -4 m)						
Apport eau (mm)	35.2	**19.4**	32.5	22	34.4	21.4
Eau drainée (mm)	24.7	**9.2**	25.9	14	27.5	14.1
Eau stockée (mm)	10.4	**10.1**	6.6	8	6.9	7.2
Intensité ($mm.h^{-1}$)	23.5	**12.9**	21.6	14.6	23.0	14.3
Expérience infiltration – drainage 3 : « Moyennement sèche » (potentiel matriciel init. ~ -8 m)						
Apport eau (mm)	23.2	21.4	30.9	24.3	31.1	22.7
Eau drainée (mm)	14.2	5.1	18.9	14.4	21.2	11.4
Eau stockée (mm)	8.9	16.3	11.9	9.8	9.9	11.2
Intensité ($mm.h^{-1}$)	15.5	14.3	20.7	16.2	20.7	15.1

III.1.2. Suivis du drainage et du stockage

Le suivi temporel du drainage et du stockage dans les colonnes de sols permettent de visualiser la dynamique globale de l'écoulement d'eau, avec les régimes d'imbibition : (a) phase transitoire, (b) pseudo-stationnaire et (c) drainage libre. Les figures III – 2 (trait plein) montrent les infiltrations réalisées à la même teneur en eau initiale (une teneur en eau par colonne) et pour les trois sols étudiés ainsi que la courbe de stockage et de drainage des colonnes « jumelles » restées en laboratoire (instrumentées afin de définir les conditions initiales du potentiel matriciel en trait pointillé).

À capacité au champ, il est remarquable que les graphiques de drainage (fig. III – 2a) et stockage (fig. III – 2b) montrent des courbes très proches entre les trois sols utilisés, présentant des structures différentes, que ce soit pour les colonnes instrumentées ou passées au

scanner. Seule la colonne Lysimètre au scanner montre un comportement différent. Dans cette colonne, l'eau apportée a stagné en surface (phénomène de « flaquage ») et s'est très peu infiltrée durant l'expérience. Le drainage a été lent (plusieurs heures) et donc le stockage a été plus important (voir paragraphe IV.1). Les intensités de pluie ont été identiques (proches à 20% cependant), quel que soit le sol et la colonne. Seule une différence de structure entre Lysimètre passée au scanner et Lysimètre instrumentée peut expliquer la différence de comportement hydrodynamique. Le fait que les autres colonnes instrumentées et passées au scanner aient des comportements similaires à cette teneur en eau initiale, apporte une première validation de l'utilisation des colonnes jumelles. Les résultats sont cependant différents quand l'état hydrique initial est plus sec.

En condition humide, les courbes de drainage (fig. III – 2a) des colonnes passées au scanner restent assez semblables alors qu'elles sont différentes de celles qui sont instrumentées. Le fait que les colonnes instrumentées se comportent différemment des colonnes scannées semble mettre en évidence la nécessité de la structure propre de chaque colonne. Cependant, une partie des différences peut s'expliquer par les conditions aux limites différentes (les intensités de pluies ont été différentes). La colonne instrumentée de Collias à un comportement différent des colonnes instrumentées, Verger et Lysimètre, alors que les trois colonnes passées au scanner ont un comportement similaire : ceci peut s'expliquer par une intensité de pluie imposée à la colonne Collias instrumentée significativement inférieure à celle imposée aux colonnes instrumentées Lysimètre et Verger.

En condition moyennement sèche, les courbes de drainage sont très différentes entre elles que ce soit entre les trois colonnes scannées, les trois colonnes instrumentées ou entre les colonnes scannées et instrumentées. Les courbes des sols passés en scanner médical sont systématiquement supérieures à celles des colonnes « jumelles » : de 33% (Verger) à 50% (Collias et Lysimètre). Ceci peut s'expliquer soit par des intensités de pluie différentes, soit par des différences de structures d'un sol à l'autre dont l'impact sur la dynamique de drainage n'apparait qu'à partir de ce niveau de dessiccation.

Ainsi lorsque l'on regarde la courbe de drainage, il est difficile de conclure sur le comportement hydrodynamique des colonnes et sur la complémentarité des colonnes jumelles car des difficultés expérimentales ont conduits à modifier de façon involontaire les conditions aux limites entre les colonnes scannées et instrumentées.

Les courbes de stockage (fig. III – 2b) mesurées renseignent sur le déroulement global de l'infiltration – drainage. En effet, trois phases sont repérables sur chaque courbe : (1) phase A : phase transitoire, (2) phase B : phase pseudo-stationnaire, et (3) phase C : phase de drainage libre. Sur les graphiques de la figure III – 2 est ajouté une droite verticale à 5400 s représentant l'arrêt de l'apport d'eau, certaines courbes de drainage et de stockage semblent décalée par rapport à cette courbe, cela s'explique par un arrêt de l'apport d'eau parfois décalé involontairement de quelques minutes, cela est plus marquée pour certaines colonnes instrumentées.

Plus en détail, la phase A correspond à l'arrivée de l'eau dans la matrice et la porosité du sol, et à son infiltration dans la colonne sans atteindre sa face inférieure, donc avant la percée. La phase B, correspond à la phase d'infiltration – drainage, la pluie n'est pas encore arrêtée alors que le drainage a commencé. La phase C correspond à une phase où l'apport d'eau par la

surface est stoppé, l'eau libre et gravitaire restante dans la porosité s'évacue durant les 30 ou 40 min d'enregistrement des balances.

Les courbes de stockage d'eau dans les colonnes (fig. III – 2b), elles sont dans les deux conditions humide et moyennement sèches de forme assez similaires pour les colonnes passées au scanner et les « jumelles » à l'exception de la colonne Collias instrumentée en condition moyennement sèche. Entre la condition la plus humide et la plus sèche, on voit que la quantité d'eau stockée augmente avec la diminution de teneur en eau initiale, et en toute logique la quantité drainée diminue. En suivant les pentes des courbes de hauteur d'eau dans la phase B, on peut noter que le régime stationnaire n'est atteint pour aucun des sols (pentes jamais horizontales, il y a toujours un flux vers la matrice). Notamment pour les états hydriques « humide » et « moyennement sec » pour lesquels les colonnes sont très loin d'un régime stationnaire ou pseudo-stationnaire avec une pente proche de 0.

Les courbes des colonnes passées au scanner et présentées ici sont utilisées par la suite dans la modélisation afin de servir de variable « observée » pour l'estimation des paramètres, en tenant compte de la condition réelle de flux imposé.

Les différences de comportements entre les colonnes jumelles sont moins marquées pour le stockage d'eau dans les colonnes que pour le drainage, les courbes de stockage des deux colonnes jumelles de chaque sol sont assez proches. Ainsi malgré des conditions aux limites différentes entre les colonnes jumelles, nous pensons que les mesures réalisées pour définir l'état hydrique initial sont relativement similaires entre les colonnes jumelles.

Les différences entre les courbes de drainage et de stockage observées pour les colonnes jumelles peuvent s'expliquer par : (i) les intensités très différentes pour les conditions humide et moyennement sèche des colonnes instrumentées, avec une valeur autour de 15 $mm.h^{-1}$ au lieu de 20 $mm.h^{-1}$ mais aussi par (ii) la structure des colonnes « jumelles » qui peut être différente et qui engendrer ces différences. En effet à des teneurs en eau loin de la capacité au champ, la présence ou l'absence de galeries de lombrics ou d'anciens passages de racine peut modifier l'infiltration de l'eau entre deux sols identiques en texture.

Les pentes des phases B, décrites précédemment, renseignent sur la quantité d'eau échangée entre la surface d'entrée et la matrice, et les macropores et la matrice, alors qu'une partie du flux d'entrée est drainée. Cet échange a été estimé pour les phases A et B en calculant la pente de chaque phase et pour les trois conditions initiales (tableau III – 2). Comme indiqué précédemment, la phase A représente le débit imposé par le simulateur de pluie.

Le débit dans la phase C est plus délicat à quantifier et représente la vidange des macropores percolants et d'une partie de la mésoporosité. Ce phénomène de vidange suit habituellement une décroissance exponentielle en fonction du temps. En effet, la phase C présente deux parties de courbes distinguables : la première est une diminution rapide du stock d'eau due à une évacuation rapide de l'eau la moins liée (fig. III – 3a ; C_1) (ou la plus soumise à la gravité), la seconde partie de la courbe correspond à une vidange plus lente de l'eau et progressivement forme une asymptote plus ou moins horizontale, plus ou moins marquée, avec une droite parallèle à l'axe des abscisses (fig. III – 3a ; C_2).

Le débit d'infiltration de la phase A tend à diminuer avec la diminution de la teneur en eau initiale, cependant la dispersion des valeurs calculées aux conditions humide et moyennement sèche augmente (fig. III – 4a). Dans la phase B, la diminution de la teneur en eau initiale induit une augmentation de l'échange macropores – matrice, les valeurs sont cependant

assez dispersées (fig. III – 4b). Enfin dans la phase C_1, le débit de drainage diminue avec la diminution de la teneur en eau initiale des sols. Aux conditions plus sèches, la matrice de sol est moins saturée, la phase d'imbibition est plus lente, d'autant qu'il faut aussi prendre en compte la vitesse d'apport d'eau qui est plus faible dans certains cas (voir précédemment) ce qui peut contribuer à des échanges plus faibles. Les échanges dans la phase B sont plus importants en conditions les plus sèches ce qui indique une plus grande rétention de l'eau dans la matrice du sol de par la non saturation initiale. La première partie de la phase C (C_1) montre des drainages d'écoulement plus lents dans les cas les plus secs, cela signifie que, pour ces conditions, l'eau est plus retenue par la microporosité du sol que dans le cas plus saturé.

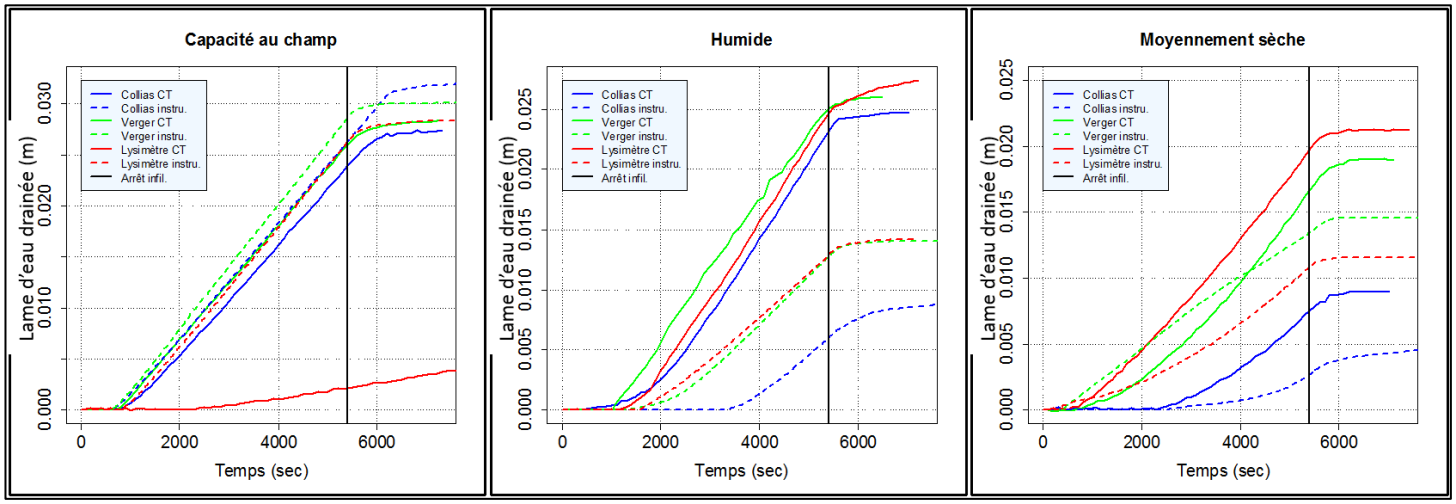
Afin d'expliquer les différences de comportements entre les colonnes jumelles nous comparons les profils de macroporosités totales imagées avant le début de l'expérience d'infiltration 1 (figure III – 4a). On observe que les profils du sol Collias présentent un pattern relativement similaire si l'on fait exception d'une forte macroporosité dans la colonne instrumentée présente entre 1 et 3 cm. En observant les images du tomographe, on peut supposer que cette zone ressemble à une zone fracturée pendant le prélèvement (fig. III – 4a – zone entre 1 et 3 cm de profondeur illustrée figure III – 4b). Le sol de Verger de la colonne instrumentée présente une macroporosité beaucoup plus constante sur la hauteur, mais aussi beaucoup moins développée, elle se situe autour d'une valeur moyenne de 2,5% contre 8% pour la colonne imagée au scanner. Cette dernière présente des zones avec d'importantes variations cela peut s'expliquer par la zone de prélèvement des colonnes. En effet la parcelle est un verger, les colonnes ont été échantillonnées entre les arbres et les réseaux racinaires, et galeries de lombrics passés et actuels peuvent être très différents à quelques décimètres près. Les deux sols du Lysimètre présentent une similitude de profil de macroporosité entre 0 et 7 cm de profondeur : diminution du pourcentage depuis la surface (11% à ~1,5%). Au-delà les profils divergent. La colonne scanner présente une zone de plus grande porosité qui tend à se réduire après 12 cm de profondeur (9% à 12%), alors que le profil de celle instrumentée diminue entre 7 et 11 cm (7% à 2%) de profondeur, mais tend à augmenter légèrement jusqu'au fond de la colonne (2% à 6%).

La structure des colonnes étudiées via l'information de macroposité présentent des profils différents entre les sols et entre les deux types de colonne, scanner et instrumentée.

Dans la phase B, la diminution de la teneur en eau initiale induit une augmentation de l'échange macropores-matrice, les valeurs sont cependant assez dispersées (fig. III – 4b). Enfin dans la phase C (1ère partie), le débit de drainage diminue avec la diminution de la teneur en eau initiale des sols. Aux conditions plus sèches, la matrice de sol est moins saturée, la phase d'imbibition est plus lente, d'autant qu'il faut aussi prendre en compte la vitesse d'apport d'eau qui est plus faible dans certains cas (voir précédemment) ce qui peut contribuer à des échanges plus faibles. Les échanges dans la phase B sont plus importants en conditions les moins humides ce qui indique une plus grande rétention de l'eau dans la matrice du sol de par la non saturation initiale. La première partie de la phase C (C_1) montre des drainages d'écoulement plus lents dans les cas les plus secs, cela signifie que, pour ces conditions, l'eau est plus retenue par la microporosité du sol que dans le cas plus saturé.

Figure III – 2 : Evolution (a) du drainage et (b) du stockage d'eau pendant l'expérience d'infiltration – drainage, pour les 3 types de sols et 3 teneurs en eau initiales (en trait plein : colonnes passées au scanner ; en trait pointillé : colonnes de laboratoire instrumentées).

(a)



(b)

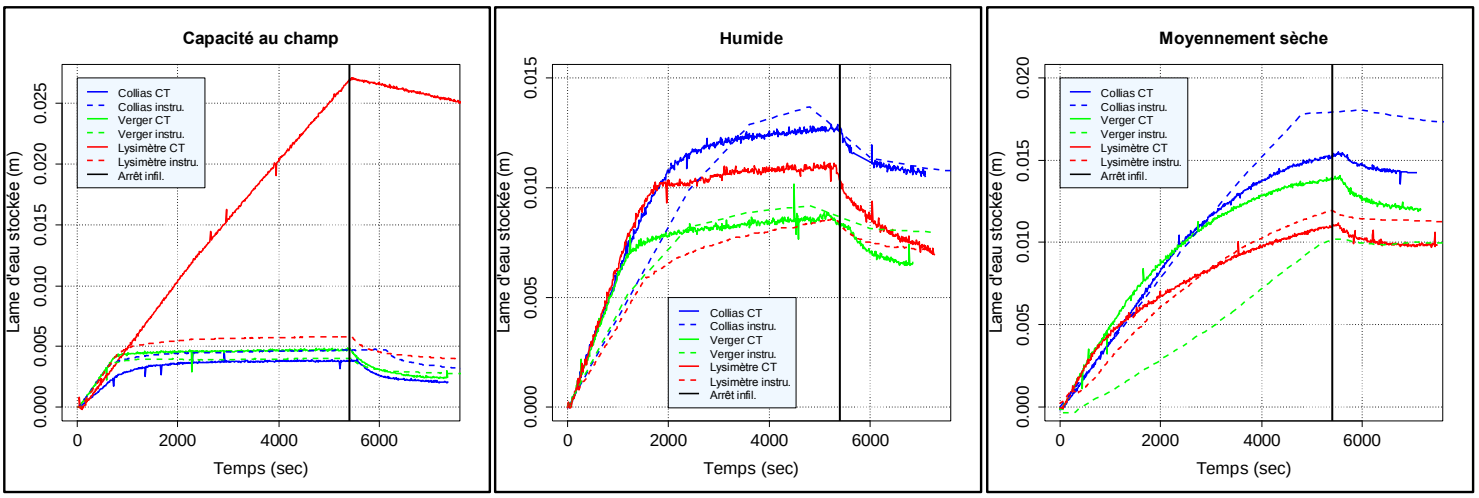
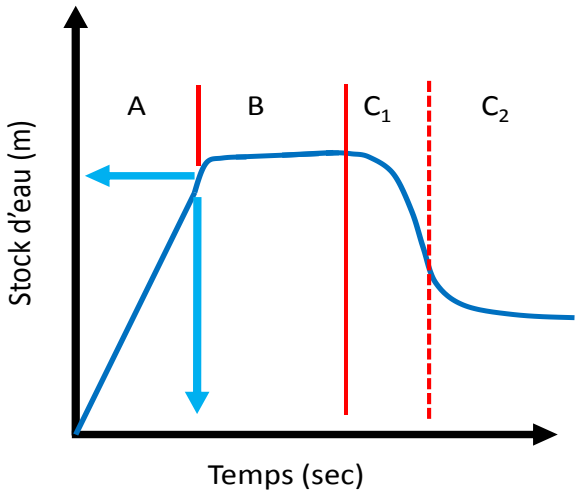
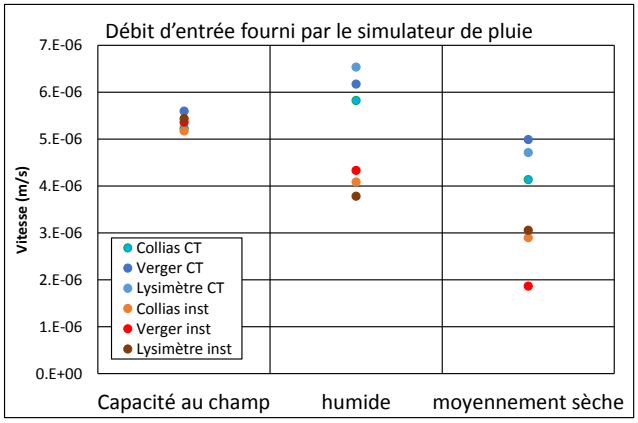


Figure III – 3 : (a) Schéma du calcul du débit à partir des courbes de stockage.

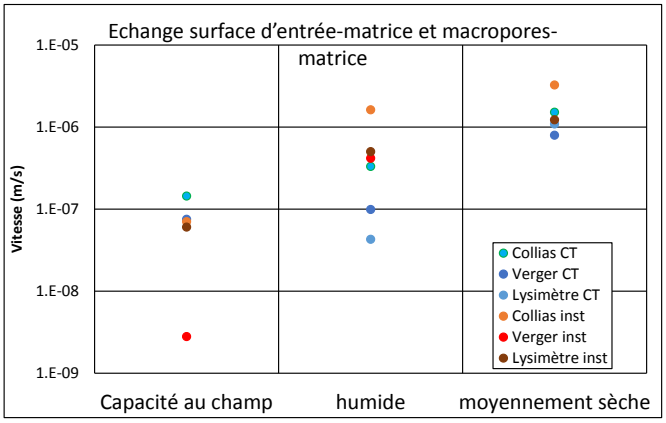


(b) Evolution de la vitesse d'infiltration $(m.s^{-1})$ pour chaque type de sol et en fonction de la teneur en eau initiale.

Phase A



Phase B



Phase C_1

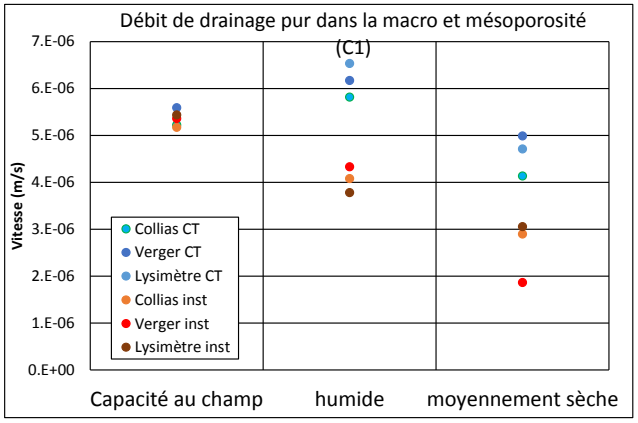
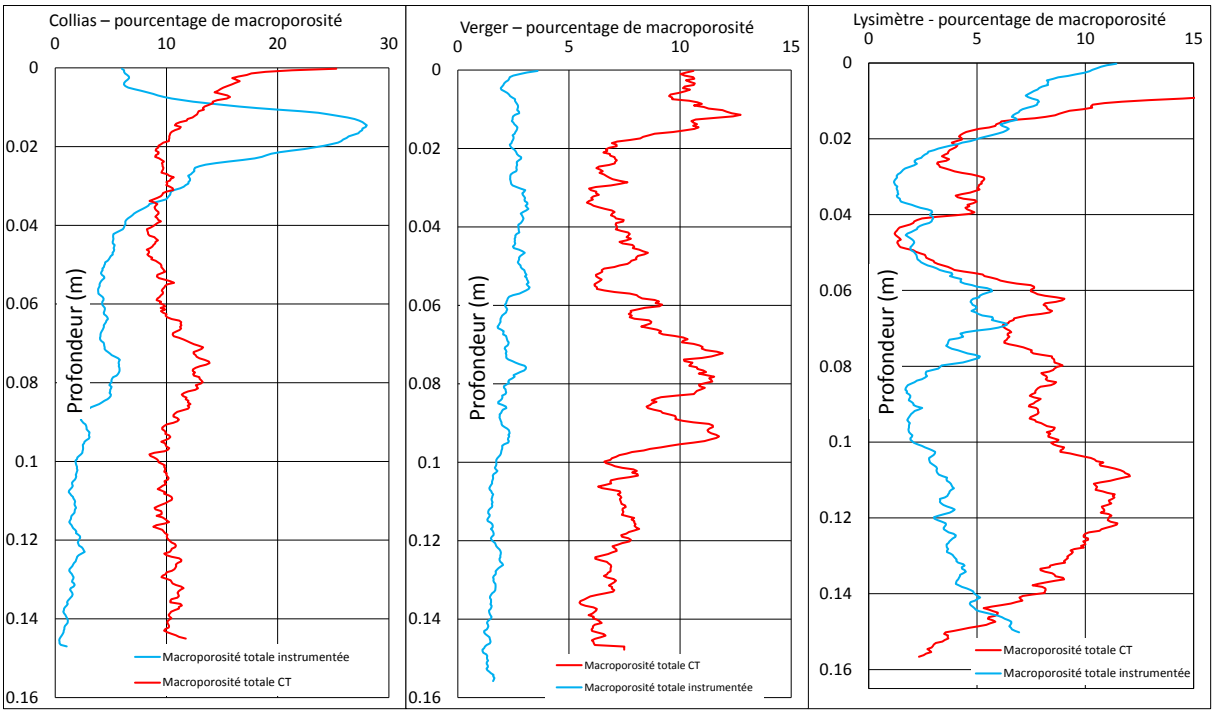


Tableau III – 2 : Débit d'eau pour chaque phase de la courbe de stockage, chaque teneur en eau initiale et pour chaque colonne de sol ($m.s^{-1}$)
(CT= mesures sur colonnes passées au scanner ; inst. = mesures sur colonnes instrumentées).

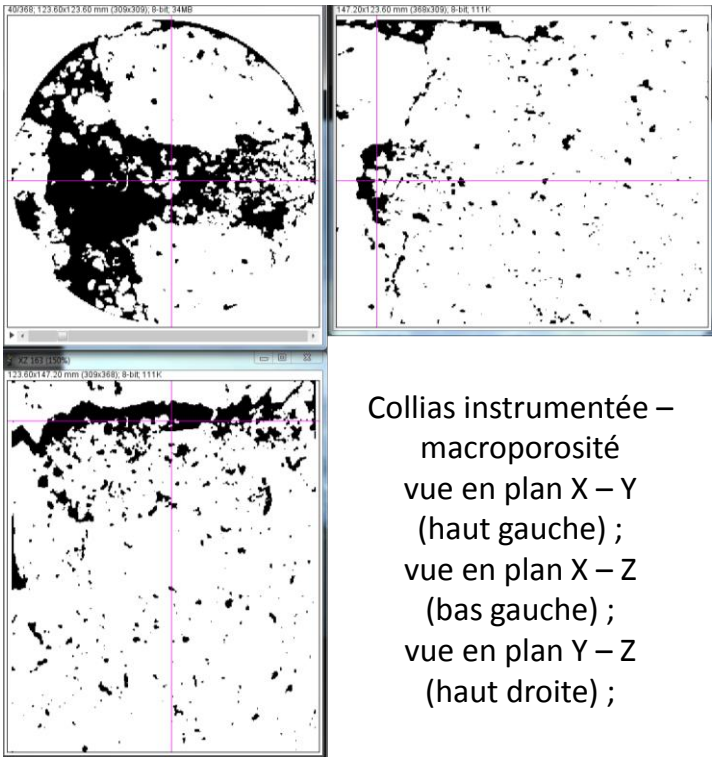
		Collias CT	Collias inst.	Verger CT	Verger inst.	Lysimètre CT	Lysimètre inst.
Phase A	Capacité au champ	$5{,}2.10^{-6}$	$5{,}2.10^{-6}$	$5{,}6.10^{-6}$	$5{,}4.10^{-6}$	ND	$5{,}4.10^{-6}$
	Humide	$5{,}8.10^{-6}$	$4{,}1.10^{-6}$	$6{,}2.10^{-6}$	$4{,}3.10^{-6}$	$6{,}5.10^{-6}$	$3{,}8.10^{-6}$
	Moyennement sèche	$4{,}1.10^{-6}$	$2{,}9.10^{-6}$	$5{,}0.10^{-6}$	$1{,}9.10^{-6}$	$4{,}7.10^{-6}$	$3{,}1.10^{-6}$
Phase B	Capacité au champ	$1{,}4.10^{-7}$	$7{,}0.10^{-8}$	$7{,}5.10^{-8}$	$2{,}8.10^{-9}$	ND	$6{,}0.10^{-8}$
	Humide	$3{,}3.10^{-7}$	$1{,}6.10^{-6}$	$9{,}9.10^{-8}$	$4{,}2.10^{-7}$	$4{,}3.10^{-8}$	$5{,}0.10^{-7}$
	Moyennement sèche	$1{,}5.10^{-6}$	$3{,}3.10^{-6}$	$8{,}0.10^{-7}$	ND	$1{,}1.10^{-6}$	$1{,}2.10^{-6}$
Phase C_1	Capacité au champ	$3{,}3.10^{-6}$	$2{,}6.10^{-6}$	$3{,}8.10^{-6}$	$2{,}1.10^{-6}$	ND	$2{,}2.10^{-6}$
	Humide	$4{,}1.10^{-6}$	$1{,}9.10^{-6}$	$1{,}9.10^{-6}$	$9{,}2.10^{-7}$	$5{,}0.10^{-6}$	$1{,}6.10^{-6}$
	Moyennement sèche	$9{,}7.10^{-7}$	$3{,}2.10^{-7}$	$2{,}6.10^{-6}$	$1{,}1.10^{-6}$	$3{,}7.10^{-6}$	$1{,}1.10^{-6}$

Figure III – 4 : (a) Profils de la macroporosité totale imagée avant le début de l'infiltration des colonnes jumelles de chaque sol ; (b) Illustration de la zone très macroporeuse dans la colonne Collias instrumentée

(a)



(b)



Collias instrumentée – macroporosité
vue en plan X – Y (haut gauche) ;
vue en plan X – Z (bas gauche) ;
vue en plan Y – Z (haut droite) ;

III.1.3. Limitations du suivi gravimétrique

La mesure de l'évolution des masses d'eau stockée dans la colonne et drainée en bas de colonne peut être qualifiée de mesure de référence. Les balances choisies détectent en effet des variations infimes (à une résolution 0,01g) de masse pour des quantités mesurées de l'ordre de la centaine ou plusieurs centaines de grammes.

Une difficulté rencontrée pour la mesure de la masse de colonnes et pour leur suivi dynamique est liée à la ventilation nécessaire au bon fonctionnement du scanner médical. En effet, pour éviter les problèmes de surchauffe du tube à rayons X, le dispositif impose l'utilisation d'une ventilation forcée qui entraine des fluctuations au niveau des balances. Un système de déflecteur a été mis en place pour atténuer le flux d'air en direction des balances. La ventilation forcée est éteinte entre les acquisitions, cela signifie que la plupart du temps le signal n'est pas perturbé.

Une seconde difficulté est liée à la mesure du drainage. En effet, afin d'éviter que la balance de drainage ne soit incluse dans le champ de mesure, celle-ci est déportée par rapport à la colonne de sol. L'eau drainée en bas de colonne est donc collectée par un collecteur de pluie réalisé avec des feuilles plastiques pour être déportée vers la balance. Le collecteur est collé au support de colonne, cette feuille est inclinée et une rainure centrale permet d'évacuer l'eau au plus vite. Cependant l'eau, une fois arrivée en bas de la colonne de sol, va être retenue par capillarité au niveau du plastique de la grille fixée à la colonne ; dès que la goutte est suffisamment grande pour échapper à la capillarité, elle tombe sur la feuille de plastique. Le même phénomène se déroule sur la feuille de plastique guidant l'eau jusqu'à la balance avec en plus la longueur de la feuille de plastique (29 cm).

Ces deux phénomènes consécutifs vont entrainer un retard dans la mesure de la masse d'eau en bas de colonne par la balance et donc l'estimation du temps de percée. L'étude des images peut donner une idée du temps d'arrivée de la première goutte en bas de la colonne. Cependant l'acquisition d'images n'est pas réalisée en continue, et il est possible d'être précis à quelques minutes près pour la mesure du temps réel d'arrivée de l'eau. Une solution complémentaire et plus onéreuse serait de fixer une caméra miniature sous la colonne, le dispositif tel qu'il est le permettrait. Cette caméra filmant en continue la surface de sortie de la colonne aiderait à déterminer le temps d'arrivée de la première goutte en bas de la colonne. Elle apporterait également des informations complémentaires sur la répartition du flux en bas de colonne. Cette solution n'a pas pu être mise en place lors de ce travail.

Les données mesurées par gravimétrie sur les colonnes passées au scanner et instrumentées permettent d'approcher la dynamique d'écoulement d'eau dans ces colonnes dans de bonnes conditions. Elles permettent également de comparer les colonnes instrumentées et les colonnes « scanner » afin de déterminer si la teneur en eau initiale mesurée par l'instrumentation est utilisable en entrée du modèle Darcy-Richards – KDW. Elles fournissent également une base de référence pour les comparaisons avec les données d'imagerie.

Au vu des quelques biais expérimentaux, nous avons conclu que les données mesurées par l'instrumentation sont utilisables pour la modélisation des infiltrations – drainages réalisées au scanner.

III.2. Résultat du suivi des expériences d'infiltration – drainage par tomographie RX

Cette partie traite des résultats obtenus à partir des images réalisées au cours des expériences d'infiltration – drainage faites à l'intérieur du scanner médical, c'est-à-dire en combinant des essais d'infiltration, avec mesure des flux d'infiltration et de drainage et acquisition de séries d'images 3D. Les résultats concernent la caractérisation 1) de la macroporosité et de l'écoulement macroporeux vus au scanner, et 2) de l'évolution de la structure pendant la durée de l'infiltration et du drainage ; les essais d'infiltration étant réalisés pour des teneurs en eau initiales différentes. Les résultats de l'évolution structurale visualisée au scanner sont complétés par des mesures réalisées au rétractomètre. Nous étudions les données obtenues au scanner médical sous deux angles : (i) l'état structural initial entre les trois sols et selon la teneur en eau initiale d'un point de vue global et en profil (selon la profondeur) et (ii) l'évolution de l'état structural durant les expériences d'infiltration – drainage pour les trois sols et selon la teneur en eau initiale d'un point de vue global et en profil. Les états structuraux ainsi que l'évolution structurale sont déterminés à partir des fonctionnelles de Minkowski.

III.2.1. Visualisation et comparaison des structures des sols dans leurs différents états hydriques initiaux

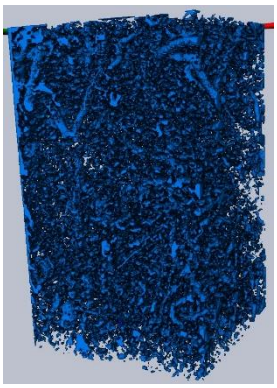
La teneur en eau initiale est un paramètre important à prendre en compte, car elle influence la structure initiale des colonnes et son évolution durant l'infiltration. Le but ici est de comparer les structures des 3 sols entre elles en utilisant certaines de leurs propriétés géométriques, pour les trois teneurs en eau initiales. En d'autres termes, on se pose la question de savoir 1) si les structures échantillonnées sont semblables ou différentes et quelles propriétés les différencient, et 2) quel est l'effet de la teneur en eau initiale sur les propriétés géométriques de ces structures ?

La figure III – 5 présente des vues 3D des macroporosités totales et percolantes (macroporosité connectée reliant surfaces d'entrée et de sortie de la colonne) de chaque sol pour chaque teneur en eau initiale. Une zone d'intérêt a été ajoutée afin de ne visualiser que la structure interne sans les effets de bords éventuels à l'interface entre le sol et le porte-échantillon en PVC.

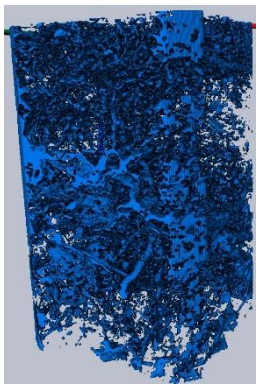
L'échantillon limoneux-sableux « Collias » présente une macroporosité plus diffuse que les deux autres échantillons qui présentent des macropores complexes de grandes tailles, bien visibles dans l'échantillon Verger, par exemple. Le fait de stabiliser l'état hydrique loin de la capacité au champ (-4 ou -8 m de pression de succion) génère des effets de bords importants, décollements entre le sol et le PVC, pour les trois sols. Le fait de ne considérer que la macroporosité percolante diminue beaucoup la macroporosité visualisée par rapport à la macroporosité totale. Cet effet est bien visible pour Lysimètre et semble favoriser les passages entre le sol et le PVC, en particulier pour les échantillons argileux (Lysimètre et Verger), dans l'état hydrique le plus sec (-8 m de pression de succion).

Figure III – 5 : Images 3D des macroporosités initiales totales et percolantes (macroporosité connectée reliant les surfaces d'entrée et de sortie de la colonne) pour chaque sol et chaque état hydrique initial.

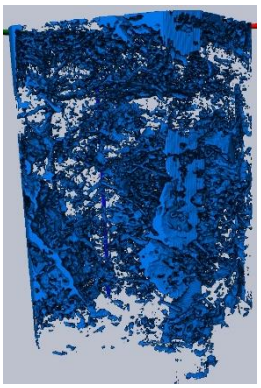
Collias totale capacité au champ



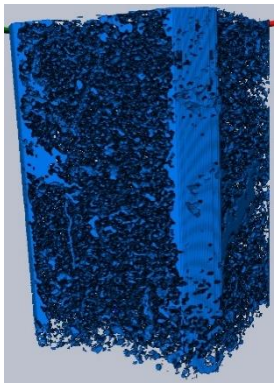
Verger totale capacité au champ



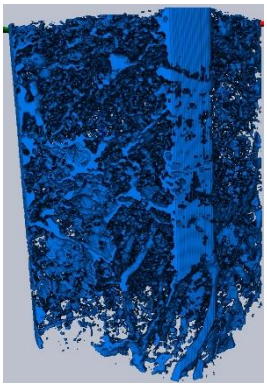
Lysimètre totale capacité au champ



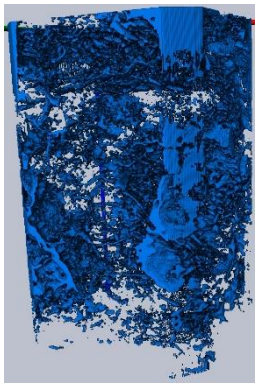
Collias totale humide



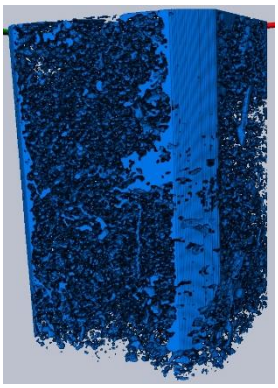
Verger totale humide



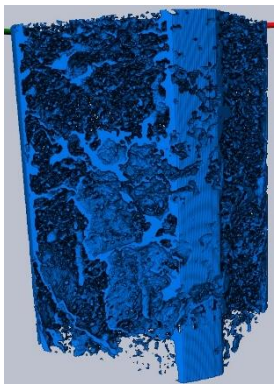
Lysimètre totale humide



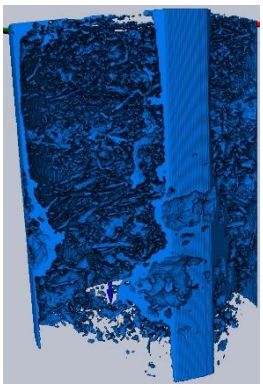
Collias totale moyennement sèche



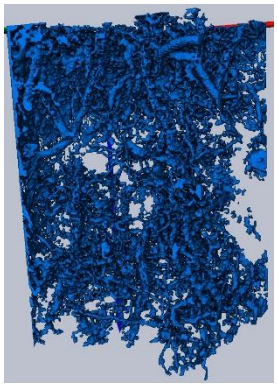
Verger totale moyennement sèche



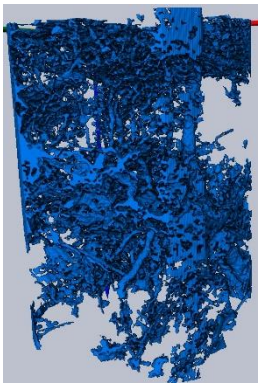
Lysimètre totale moyennement sèche



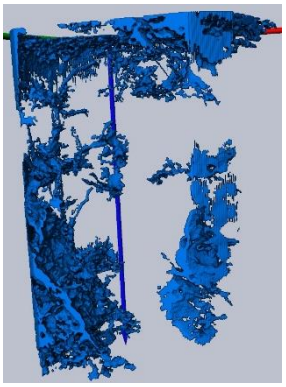
Collias percolante capacité au champ



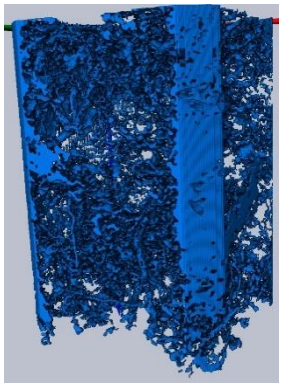
Verger percolante capacité au champ



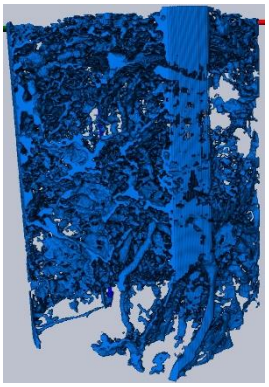
Lysimètre percolante capacité au champ



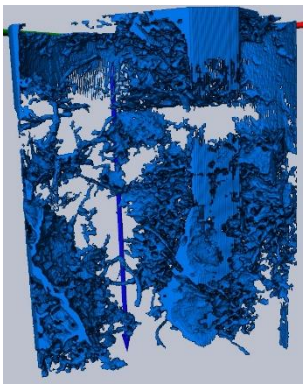
Collias percolante humide



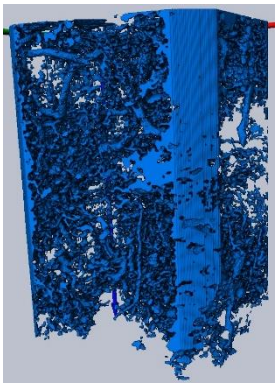
Verger percolante humide



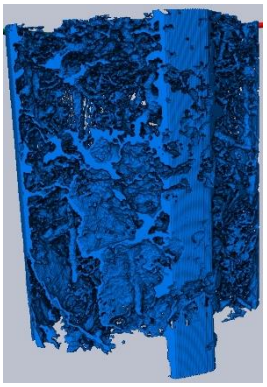
Lysimètre percolante humide



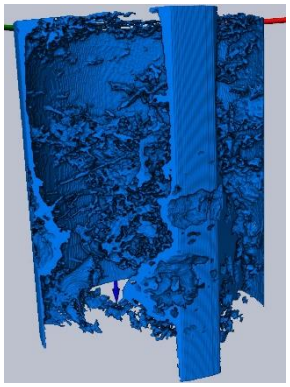
Collias percolante moyennement sèche



Verger percolante moyennement sèche



Lysimètre percolante moyennement sèche



III.2.1.1. Comparaison par les indices géométriques globaux

La première question à laquelle il nous semblait intéressant de répondre porte sur les différences entre les structures des sols échantillonnés, et leurs évolutions en fonction de l'état hydrique initial. L'ensemble des tableaux III – 3 à III – 5 ainsi que les graphiques de la fig. III – 6, nous permet de comparer globalement les trois sols étudiés aux trois teneurs en eau initiales via des descripteurs géométriques. Pour rappel, nous utilisons ici un nombre limité de descripteurs géométriques des structures tridimensionnelles appelés fonctionnelles de Minkowski :

- (i) le volume macroporeux,
- (ii) la surface des macropores (interface entre les macropores et la matrice du sol),
- (iii) l'intégrale de la courbure moyenne de cette interface (IMC) qui caractérise la forme plus ou moins courbe de l'espace poral,
- (iv) et la caractéristique d'Euler – Poincaré (EPC) qui est un indice d'inter–connectivité des réseaux de macropores.

A ces quatre fonctionnelles, il a été ajouté deux autres indices : le nombre d'objets macropores et le nombre de connexions redondantes. Ces données sont présentées dans le tableau III – 3. A partir des six descripteurs précédents, il est possible de calculer six propriétés (ou indices) géométriques normalisées pour chaque structure considérée (totale ou percolante avec ou sans effet de bord) : la macroporosité, la surface spécifique, la complexité de la surface des macropores, l'indice de connectivité des macropores, la densité de macropores et la densité de connexions dans la macroporosité. Ces données sont présentées dans le tableau III – 4. En considérant les indices calculés à capacité au champ comme une référence structurale par rapport aux indices calculés aux plus faibles teneurs en eau initiales, nous avons calculé des taux de variation de ces indices, présentés dans le tableau III – 5).

Les deux ROI (*Region Of Interest* – avec et sans bordures) sont étudiées afin de voir si des effets de bord sont présents et modifient significativement la valeur des indices. Les deux types de macroporosités (macroporosités totale et percolante) sont comparés afin de quantifier la part de la macroporosité percolante par rapport à la macroporosité totale sur les différents indices.

Les quantifications présentées sont faites sur les macroporosités initiales, c'est à dire avant le début de l'infiltration (à T_0), et sur les structures stabilisées dans les états hydriques initiaux (capacité au champ, état humide, état moyennement sec).

Une comparaison de la structure des sols entre eux est donc réalisée sur la base des taux de variation des propriétés et des indices géométriques calculés (tableau III – 5 et figure III – 6).

La macroporosité des sols étudiés est assez variable et comprise entre 3 et 11 % suivant le type de structure (structure totale ST ou Percolante SP) et de la zone d'intérêt (volume total ou volume sans bord SB) (tableau III – 4). Cette gamme de valeurs de macroporosités est conforme à la macroporosité habituelle des sols structurés (Luo et al., 2008; Katuwal et al., 2015a).

A capacité au champ, matrice quasi saturée, pour la ROI la plus grande (ST : Structure Totale) le sol travaillé referme le moins de macroporosité 7 % (Lysimètre) alors que Collias et Verger referment respectivement 11% et 8,5 % de macroporosité. Les effets de bords, i.e. la macroporosité située à l'interface entre le sol et le tube PVC, sont évalués de 15 à 18 % de la structure totale, respectivement pour les trois sols. Les effets de bords sont légèrement plus importants pour les deux sols non travaillés (Collias et Verger) que pour celui qui est travaillé (Lysimètre). La partie percolante de la macroporosité correspond à un volume macroporeux plus petit que celui de la macroporosité totale mais elle représente cependant une partie importante de ce volume : 79 % pour Collias, 88 % pour Verger et 84 % pour Lysimètre. En comparant, la structure percolante sans bord et la structure percolante avec bord (SPSB et SP),

on évalue la partie percolante de la structure sans effet de bords à 54 % de la structure percolante pour Collias, 61 % de la structure percolante pour Verger et 65 % de la structure percolante pour Lysimètre. Cependant, Lysimètre a toujours la macroporosité percolante la plus petite (3 %) et ne présente pas de réseau connecté sans utiliser la bordure de l'échantillon, Collias a la macroporosité percolante la plus élevée, ensuite Verger.

La surface spécifique suit la même évolution que celle décrite par la macroporosité. Les rayons hydrauliques que l'on peut déterminer avec le volume macroporeux et la surface sont donc assez peu variables, 0,4 mm pour Collias et Verger, et 0,5 mm pour Lysimètre, à capacité au champ. Le paramètre complexité de la surface n'est pas discriminant pour Collias et Verger. Par contre Lysimètre, dont la structure est travaillée, présente une surface plus « accidentée », i.e. dont les surfaces des objets macropores s'éloignent de la planéité.

Si l'on considère la structure totale avec ou sans effet de bordure (ST et STSB), l'indice de connectivité est toujours très positif, ce qui signifie une prédominance d'objets isolés par rapport aux connexions entre les objets. Selon cet indice, Collias présente la structure la moins connectée avec la densité de macropores isolés la plus importante. Les échantillons argileux, Verger et Lysimètre, présentent les structures les plus connectées, ce que l'on retrouve pour Verger dans la densité de connexion la plus élevée. Dès lors que l'on considère la partie percolante de la macroporosité, l'indice de connectivité devient négatif, ce qui indique la prédominance de connexions entre les objets par rapport à la présence d'objets isolés. Cet indice permet de mettre en évidence un effet de la bordure de l'échantillon, car l'indice de connectivité est plus négatif (structure plus connexe) en conservant la bordure de l'échantillon ; ce qui confirme la possibilité d'écoulement à l'interface entre le cylindre de sol et le tube PVC.

Le passage aux deux états hydriques plus secs entraine une augmentation du volume macroporeux. Ce changement est plus important pour l'état moyennement sec que pour l'état humide. La variation du volume macroporeux de Collias est faible cependant avec une augmentation de 6 % de la macroporosité totale. Pour les échantillons argileux, Verger et Lysimètre, la variation est très importante, avec une augmentation de plus de 50 % du volume macroporeux total par rapport à l'état hydrique à capacité au champ. Il est remarquable de voir que le passage à l'état hydrique moyennement sec entraine un changement de hiérarchisation de sols, la macroporosité de Verger devient plus importante et celle de Lysimètre aussi pour la partie percolante. On peut remarquer également que les macroporosités percolantes, qui sont le siège des échanges gazeux avec l'atmosphère présentent les évolutions les plus importantes, 62% pour Verger et plus de 200% pour Lysimètre.

La surface spécifique suit la même évolution que la macroporosité. Le rayon hydraulique moyen pour la structure percolante de l'échantillon Lysimètre moyennement sec augmente à 0,7 mm.

L'indice de complexité de la surface varie assez peu sauf pour les échantillons argileux, en particulier la structure totale sans bord de l'échantillon Lysimètre pour laquelle l'augmentation est de 50 %.

Pour les indices de connectivité, la hiérarchisation est identique à celle décrite à capacité au champ pour les structures totales par contre, elle évolue avec la diminution de la teneur en eau. La partie percolante de Verger devient la plus connectée. Selon cet indice, Collias présente la structure la moins connectée avec la densité de macropores isolés la plus importante. Les

échantillons argileux, Verger et Lysimètre, présentent les structures les plus connectées, ce que l'on retrouve pour Verger dans la densité de connexions des macropores la plus élevée. Dans le détail, les valeurs de l'indice augmentent indiquant une diminution de la connexion dans les volumes investigués avec la diminution de la teneur en eau initiale. Les processus de variation de la structure liés au séchage entrainent une augmentation de macropores isolés plus importantes que de connexions. La densité de connexions diminue de façon significative dans les échantillons argileux et augmente dans l'échantillon Collias.

En résumé, les structures observées sont composées d'éléments macroporeux de différentes natures (trous d'anciennes racines, macropores autour des racines, galeries de vers de terre, macropores inter-agrégats et macropores à l'interface avec le tube PVC). Les différences entre ces structures sont soient déterminées, semble-t-il, par leur texture (sableuse ou argileuse) en particulier les différences de comportement devant la variation de teneur en eau, ou par leur histoire, sol travaillé ou non travaillé. La teneur en eau initiale joue un rôle important sur le volume macroporeux, en particulier sur la partie percolante de la macroporosité qui augmente de façon significative avec le séchage dans les échantillons argileux, et sur la connectivité (via l'indice utilisé) qui elle diminue avec le séchage pour les échantillons argileux.

A capacité au champ, le sol sableux referme une macroporosité plus importante (> 10 %) que celle des sols argileux. La diminution de la teneur en eau augmente très peu sa macroporosité (variation de + 5 %) alors qu'elle augmente beaucoup celles des échantillons argileux, de plus de 50 %, du fait du retrait des minéraux argileux gonflants. Le volume macroporeux des échantillons argileux dépassent ou arrivent au même ordre de grandeur que celui de Collias. Donc, si on ne tenait compte que du volume macroporeux, l'échantillon sableux dans ses trois états hydriques et les échantillons argileux dans l'état « moyennement sec » seraient équivalents. Les structures étudiées sont bien au-dessus du seuil de percolation, puisque au moins 80 % du volume macroporeux crée un réseau interconnecté entre le haut et le bas de l'échantillon quel que soit le sol. En comparant les structures percolantes avec et sans effets de bords, nous pouvons conclure qu'environ 60 % du réseau percolant identifié est interne au sol ; les 40 % restant sont liées à des connexions qui existent, qui ont été créées ou qui se créent en bordure du PVC. Ces macro-discontinuités sont prises en compte au même titre que les autres macroporosités puisqu'elles participent aussi à l'écoulement. Si le volume macroporeux des échantillons est du même ordre de grandeur, leur connectivité via l'indice connectivité utilisé, est bien différente. Elle est dépendante de la texture et probablement du travail du sol : Collias présentant un échantillon peu connecté car refermant une proportion de macropores structuraux isolés importante et Lysimètre étant l'échantillon présentant l'espace poreux le plus connecté.

Tableau III – 3 : Fonctionnelles de Minkowski avec le nombre de composantes connexes (macropores et clusters de macropores) et le nombre de connexions redondantes (tous les sols et états hydriques (CC : capacité au champ ; H : humide ; MS : moyennement sec), pour les deux types de macroporosité (totale et percolante) et les deux régions d'intérêt (ROI avec ou sans zone de bordure avec le tube PVC).

Type macro-porosité et ROI	Fonctionnelles de Minkowski	Collias			Verger			Lysimètre		
		CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
Totale	Volume de macropores (cm^3)	178,35	183,50	188,73	153,00	182,00	234,00	126,33	128,76	194,72
	Surface des macropores (cm^2)	4344,8	4703,8	4810,0	3653,0	3909,0	4816,0	2510,0	2570,0	3050,0
	IMC de l'espace poral (cm)	93922	104153	106858	65445	66034	74326	243444	248242	288837
	Nombre Euler	16203	12898	18565	2313	4024	8647	1778	2907	3277
	Nb. Macropores & clusters	25175	27076	29363	13260	14112	20160	7255	7853	6570
	Nb. connexion redondantes	8972	14178	10798	10947	10088	11513	5477	4946	3293
Totale sans bord	Volume de macropores (cm^3)	123,90	137,90	142,61	120,40	139,60	169,50	94,00	97,38	109,90
	Surface des macropores (cm^2)	3175,1	3498,7	3731,4	2630,7	2875,4	3612,6	1815,4	1827,7	1936,2
	IMC de l'espace poral (cm)	79092	86189	93655	49139	51152	67938	176670	180529	289148
	Nombre Euler	22221	23594	24946	7729	9571	13812	3297	4510	4466
	Nb. Macropores & clusters	24758	26616	28678	11797	13190	19788	5920	6623	6480
	Nb. connexion redondantes	2537	3022	3732	4068	3619	5976	2623	2113	2014
Percolante	Volume de macropores (cm^3)	125,63	133,1	138,5	130,95	158,8	211,8	54,1	105,7	177
	Surface des macropores (cm^2)	2534,3	2925,04	2980,5	2861,8	3085	3925,4	929,2	1836,1	2488,6
	IMC de l'espace poral (cm)	34281	43914,3	42777,2	37704	37324	38051	58266	113000	126394
	Nombre Euler	-8795	-13455	-10032	-10629	-9864	-11144	-2023	-4096	-2937
	Nb. Macropores & clusters	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Nb. connexion redondantes	8796	13456	10033	10630	9865	11145	2024	4097	2938
Percolante sans bord	Volume de macropores (cm^3)	60,2	75,1	81,9	97,2	113,3	144,4	ND	ND	ND
	Surface des macropores (cm^2)	1150,2	1457,3	1691,1	1830	1995,2	2649,9	ND	ND	ND
	IMC de l'espace poral (cm)	16963	21956,3	26821,7	22675	22341	30591	ND	ND	ND
	Nombre Euler	-1610	-2128	-2828	-3747	-3359	-5579	ND	ND	ND
	Nb. Macropores & clusters	1	1	1	1	1	1	ND	ND	ND
	Nb. connexion redondantes	1611	2129	2829	3748	3360	5580	ND	ND	ND

Tableau III – 4 : Propriétés et indices géométriques (*1 pondération par la surface de l'espace poral ; *2 pondération par le volume de l'espace poral), pour chaque sol, pour chaque état hydrique (CC : capacité au champ ; H : humide ; MS : moyennement sec), pour les deux types de macroporosité (totale et percolante) et les deux régions d'intérêt (ROI avec ou zone de bordure avec le tube PVC).

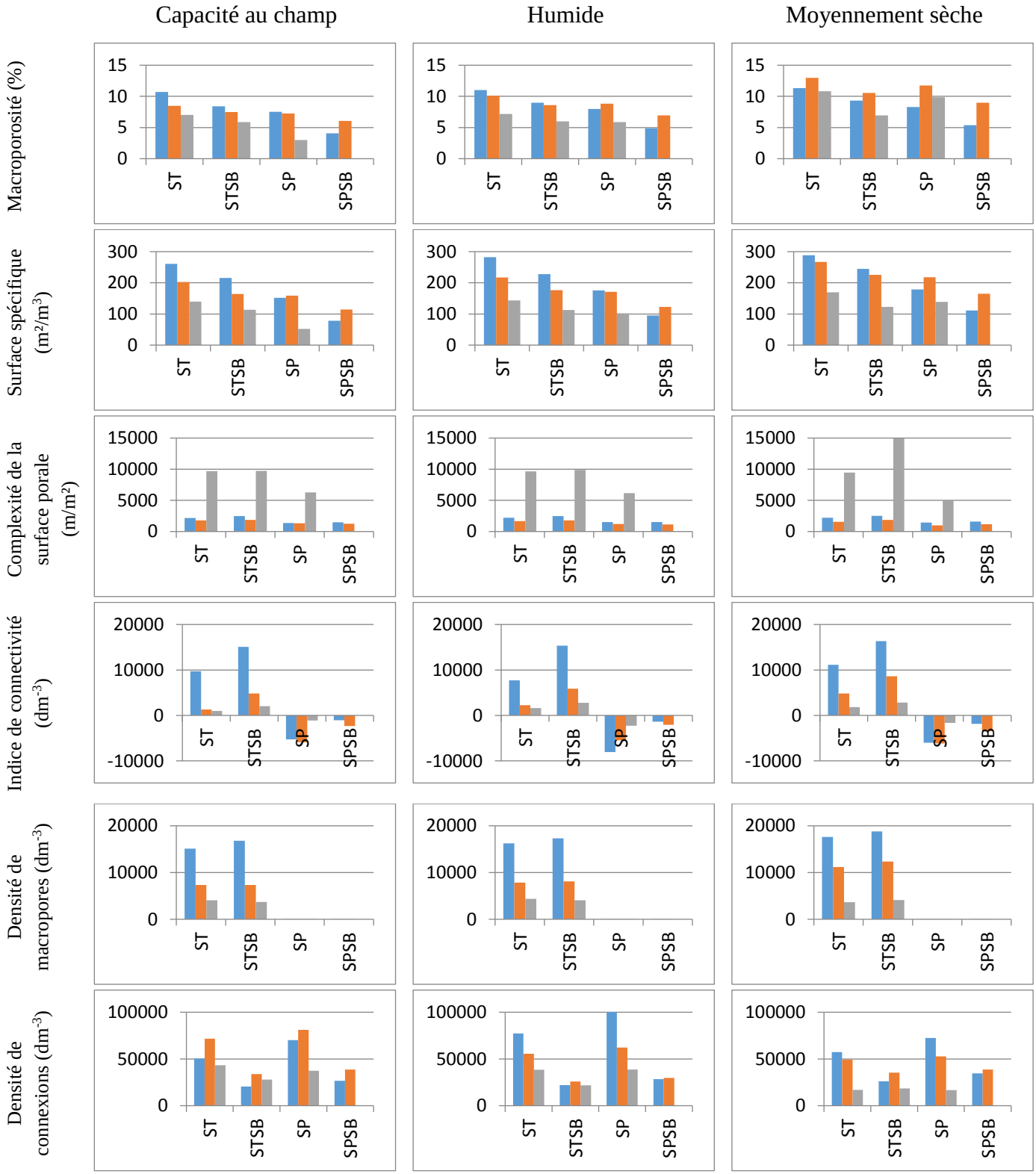
Type macro-porosité et ROI	Propriétés & indices géométriques	Collias			Verger			Lysimètre		
		CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
Totale	Macroporosité (%)	10,70	11,01	11,32	8,49	10,10	12,99	7,03	7,16	10,83
	Surface spécifique (m^2/m^3)	260,7	282,2	288,6	202,7	217,0	267,3	139,7	143,0	169,7
	Complexité de la surface de l'espace poreux (m/m^2)*1	2161,7	2214,2	2221,6	1791,5	1689,3	1543,3	9699,0	9659,2	9470,1
	Indice de connectivité des macropores (dm^{-3})	9722	7739	11139	1284	2233	4799	989	1618	1823
	Densité de macropores & clusters (dm^{-3})	15105	16246	17618	7359	7832	11189	4037	4370	3656
	Densité de connexion dans l'espace poreux (dm^{-3})*2	50306	77264	57214	71549	55429	49201	43355	38414	16911
Totale sans bord	Macroporosité (%)	8,41	8,97	9,34	7,50	8,58	10,56	5,87	6,00	6,96
	Surface spécifique (m^2/m^3)	215,4	227,7	244,5	164,0	176,7	225,1	113,4	112,6	122,7
	Complexité de la surface de l'espace poreux (m/m^2)*1	2491,0	2463,5	2509,9	1867,9	1778,9	1880,6	9731,7	9877,4	14933,8
	Indice de connectivité des macropores (dm^{-3})	15076	15355	16347	4817	5882	8608	2060	2779	2830
	Densité de macropores & clusters (dm^{-3})	16798	17321	18792	7352	8106	12332	3699	4081	4106
	Densité de connexion dans l'espace poreux (dm^{-3})*2	20476	21914	26169	33787	25924	35257	27904	21699	18326
Percolante	Macroporosité (%)	7,54	7,99	8,31	7,27	8,81	11,75	3,01	5,88	9,85
	Surface spécifique (m^2/m^3)	152,1	175,5	178,8	158,8	171,2	217,9	51,7	102,2	138,5
	Complexité de la surface de l'espace poreux (m/m^2)*1	1352,7	1501,3	1435,2	1317,5	1209,8	969,3	6270,5	6154,3	5078,9
	Indice de connectivité des macropores (dm^{-3})	-5277	-8073	-6019	-5899	-5475	-6185	-1126	-2279	-1634
	Densité de macropores & clusters (dm^{-3})	0,600	0,600	0,600	0,555	0,555	0,555	0,556	0,556	0,556
	Densité de connexion dans l'espace poreux (dm^{-3})*2	70015	101097	72440	81176	62122	52620	37412	38761	16599
Percolante sans bord	Macroporosité (%)	4,08	4,89	5,37	6,06	6,96	9,00	ND	ND	ND
	Surface spécifique (m^2/m^3)	78,0	94,8	110,8	114,1	122,6	165,1	ND	ND	ND
	Complexité de la surface de l'espace poreux (m/m^2)*1	1474,8	1506,6	1586,1	1239,1	1119,7	1154,4	ND	ND	ND
	Indice de connectivité des macropores (dm^{-3})	-1092	-1385	-1853	-2335	-2064	-3477	ND	ND	ND
	Densité de macropores & clusters (dm^{-3})	0,678	0,651	0,655	0,623	0,615	0,623	ND	ND	ND
	Densité de connexion dans l'espace poreux (dm^{-3})*2	26761	28349	34542	38560	29656	38643	ND	ND	ND

Tableau III – 5 : Taux de variation des propriétés et indices géométriques avec l'état hydrique à capacité au champ comme référence, pour chaque sol, pour les états hydriques humide (H) et moyennement sec (MS), pour les deux types de macroporosité (totale et percolante) et les deux régions d'intérêt (ROI avec ou zone de bordure avec le tube PVC). Bleu foncé = variations les plus négatives par rapport à la référence ; rouge foncé = variations les plus positives par rapport à la référence

Type macro-porosité	Propriétés & indices géométriques	Collias			Verger			Lysimètre		
		CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
Totale	Taux de la variation de la macroporosité (%)	Ref.	2,89	5,82	Ref.	18,95	52,94	Ref.	1,92	54,14
Totale sans bord		Ref.	6,76	11,17	Ref.	14,34	40,78	Ref.	2,16	18,57
Percolante		Ref.	5,95	10,24	Ref.	21,27	61,74	Ref.	95,38	227,17
Percolante sans bord		Ref.	19,66	31,40	Ref.	14,94	48,56	Ref.	ND	ND
Totale	Taux de la variation de la Surface spécifique (%)	Ref.	8,26	10,71	Ref.	7,01	31,84	Ref.	2,39	21,51
Totale sans bord		Ref.	5,69	13,50	Ref.	7,78	37,32	Ref.	-0,72	8,17
Percolante		Ref.	15,42	17,61	Ref.	7,80	37,16	Ref.	97,60	167,82
Percolante sans bord		Ref.	21,53	42,00	Ref.	7,51	44,80	Ref.	ND	ND
Totale	Taux de la variation de la complexité de la surface de l'espace poreux (%)	Ref.	2,43	2,77	Ref.	-5,71	-13,86	Ref.	-0,41	-2,36
Totale sans bord		Ref.	-1,11	0,76	Ref.	-4,76	0,68	Ref.	1,50	53,45
Percolante		Ref.	10,99	6,10	Ref.	-8,17	-26,42	Ref.	-1,85	-19,00
Percolante sans bord		Ref.	2,16	7,55	Ref.	-9,63	-6,83	Ref.	ND	ND
Totale	Taux de la variation de l'indice de connectivité des macropores (%)	Ref.	-20,40	14,58	Ref.	73,97	273,84	Ref.	63,50	84,31
Totale sans bord		Ref.	1,85	8,43	Ref.	22,11	78,70	Ref.	34,89	37,38
Percolante		Ref.	52,98	14,06	Ref.	-7,20	4,85	Ref.	102,47	45,18
Percolante sans bord		Ref.	26,78	69,65	Ref.	-11,60	48,89	ND	ND	ND
Totale	Taux de la variation de la Densité de macropores&clusters (%)	Ref.	7,55	16,64	Ref.	6,43	52,04	Ref.	8,24	-9,44
Totale sans bord		Ref.	3,12	11,87	Ref.	10,26	67,74	Ref.	10,32	11,01
Percolante		Ref.	0,00	0,00	Ref.	0,00	0,00	Ref.	0,00	0,00
Percolante sans bord		Ref.	-4,08	-3,42	Ref.	-1,39	0,00	Ref.	ND	ND
Totale	Taux de la variation de la Densité de connexion dans l'espace poreux (%)	Ref.	53,59	13,73	Ref.	-22,53	-31,23	Ref.	-11,40	-60,99
Totale sans bord		Ref.	7,02	27,80	Ref.	-23,27	4,35	Ref.	-22,24	-34,33
Percolante		Ref.	44,39	3,46	Ref.	-23,47	-35,18	Ref.	3,60	-55,63
Percolante sans bord		Ref.	5,93	29,08	Ref.	-23,09	0,22	Ref.	ND	ND

Figure III – 6 : Propriétés et indices géométriques par type de sol, type de macroporosité et de région d'intérêt, pour chaque indice, pour chaque l'état hydrique présenté séparément. Bleu : Collias, orange : Verger, gris : Lysimètre.

ST : structure totale ; STSB : structure totale sans bord ; SP : structure percolante ; SPSB : structure percolante sans bord.



Dans le paragraphe suivant, nous ne présentons que les profils de macroporosité de la partie percolante qui présente le plus d'évolution.

III.2.1.2. Evolution des profils de macroporosité percolantes initiales

Les profils de macroporosité percolante (avec bord) sont tracés pour chaque sol et chaque teneur en eau (fig. III – 7). Les profils des trois sols présentent une similitude : ils sont tous caractérisés par une décroissante importante de la macroporosité dans les premiers centimètres avec une remontée entre 5 et 7 cm de profondeur. Plus en profondeur, les profils diffèrent. L'évolution est différente avec la teneur en eau initiale et aussi en fonction de la texture.

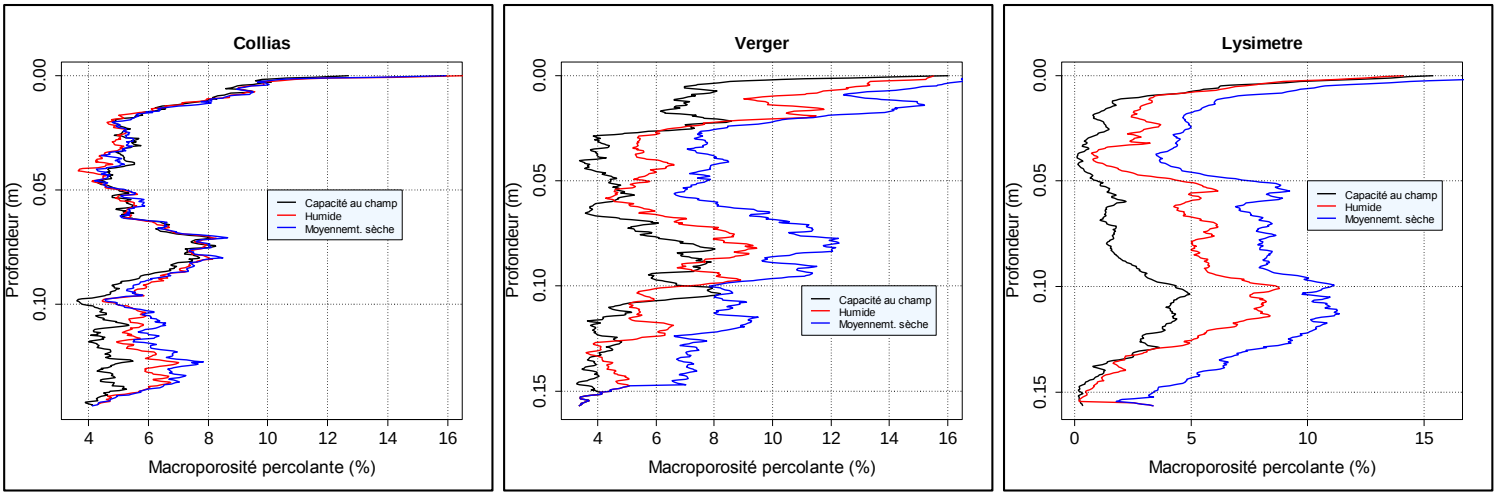
Dans le cas de Collias, la macroporosité percolante varie de 11 à 4 % environ. Par contre, les profils de macroporosité varient très peu en fonction de la teneur en eau dans les 10 premiers centimètres, ils sont pratiquement confondus. De 10 à 14 cm, la macroporosité pour les conditions hydriques humide et moyennement sèche est bien au-dessus de celle pour la capacité au champ. L'effet de la diminution de la teneur en eau de la matrice n'est donc pas homogène sur la hauteur de l'échantillon et n'est visible ici que sur les 4 derniers centimètres. Ce résultat est contre intuitif si l'on considère un séchage des colonnes prépondérant par le haut de l'échantillon.

Dans le cas de Verger, la macroporosité percolante varie en de 17 à 4 % environ. Les profils présentés sont relativement semblables par contre l'écart entre les profils est plus marqué, ils se décalent vers des macroporosités plus importantes avec la diminution de la teneur en eau initiale. Dans cet échantillon, la diminution de la teneur en eau de la matrice de sol a un effet quasi homogène sur la hauteur de l'échantillon.

Dans le cas de Lysimètre, la macroporosité percolante varie en de 15 à 0,2 % environ. Les profils présentent là aussi une différence avec la teneur en eau initiale, les profils augmentent avec le dessèchement de la structure. Par ailleurs, une zone à très faible macroporosité percolante est détectée à la profondeur de 4 cm environ et d'une valeur de 0,2 % ce qui est le plus bas mesuré et représente une zone d'étranglement dans la structure macroporeuse.

Ces résultats mettent en évidence l'évolution différente des profils de macroporosité percolante entre l'échantillon sableux et les échantillons argileux sous l'effet d'un séchage modéré du sol. De façon indirecte, ils mettent en évidence la limite d'utilisation d'une valeur globale unique pour caractériser ce paramètre important que constitue le volume macroporeux. En effet, les variations de macroporosité à l'intérieur de l'échantillon, sur un profil de profondeur d'une quinzaine de centimètres, sont supérieures aux variations des valeurs globales de macroporosité en fonction de la teneur en eau initiale.

Figure III – 7 : Macroporosité « percolante » initiale (avant le début de l'infiltration) pour les trois teneurs en eau initiales et les trois sols.



III.2.2. Evolution structurale pendant l'infiltration

La seconde question à laquelle il nous semblait intéressant de répondre, porte sur la caractérisation de l'évolution d'une structure lors d'un événement pluvieux.

Les colonnes de sols sont soumises à un apport d'eau sous la forme d'une pluie simulée et voient potentiellement leur structure se modifier. Dans cette partie, nous avons voulu mettre en évidence l'évolution des propriétés de la structure durant l'essai d'infiltration. En effet, dans les séries d'acquisition faites au scanner, la macroporosité a été seuillée à chaque acquisition, grâce à la méthode mise en place qui permet d'affecter un seuil à chaque acquisition. Dans un premier temps, nous comparons les indices géométriques pour les structures totales et percolantes qui sont imagées, avant le démarrage de la pluie (structure initiale, T_0), à l'arrêt de la pluie (durée 90 min T_{90}) et après 30 min de drainage seul (durée environ 120 min T_{120}). Les effets de bords sont pris en compte car ils constituent également des voies d'écoulement possibles.

III.2.2.1. Evolution des indices globaux des structures pendant l'expérience

En considérant la structure totale (tableau III – 6 – 7(a) et fig. III – 8), la macroporosité totale diminue avec l'apport d'eau : le pourcentage est maximal à T_0, minimal à T_{90} et ré-augmente à T_{120} pour devenir intermédiaire. Les diminutions de T_0 à T_{90} sont de l'ordre de 8 à 30 % du volume macroporeux initial (T_0), ce qui est très significatif. A l'arrêt de la pluie, une remontée assez rapide de la macroporosité est détectée, de l'ordre de quelques pourcents à une vingtaine de pourcents par rapport au volume macroporeux à l'arrêt de la pluie (T_{90}). La teneur en eau initiale influence les amplitudes de variations, de diminution et de ré-augmentation, de la macroporosité. Ainsi à partir d'un état initial moyennement sec, la décroissance de macroporosité entre T_0 et T_{90} est plus marquée et la ré-augmentation entre T_{90} et T_{120} est moins marquée.

La surface spécifique suit les mêmes tendances que la macroporosité. Le rayon hydraulique moyen associé au réseau de macropores augmente avec la diminution de la teneur en eau initiale pour les deux sols argileux mais reste relativement constante dans le cas du sol limono-sableux (Collias) avec des valeurs situées autour de 0,4 mm (Collias) à 0,5 mm (Lysimètre). L'influence du temps dans l'expérience semble montrer que le rayon diminue à T_{90} et ré-augmente légèrement à T_{120}, mais toujours avec le même ordonnancement : Lysimètre > Verger > Collias. Cela est aussi constaté pour la macroporosité percolante, avec des valeurs plus élevées : 0,5 mm (Collias) à 0,65 mm (Lysimètre). La complexité de la surface est la plus faible à T_0, la plus grande à T_{90} et intermédiaire à T_{120}. Elle est du même ordre de grandeur pour Collias et Verger, à tous les temps considérés, et très largement supérieure pour Lysimètre aux trois temps considérés.

L'indice de connectivité suit la même évolution temporelle, il augmente de T_0 à T_{90} (la connectivité diminue) et devient intermédiaire de T_{90} à T_{120}. L'indice de connectivité de la structure totale augmente du fait d'une diminution de la densité de connexions dans le volume macroporeux quel que soit le sol, cela peut être le signe de la fermeture de certains rétrécissements des macropores. La variation de cet indice est cependant beaucoup plus forte pour les échantillons argileux, en particulier celui qui est structuré, Verger. Il est à noter que la diminution de la connectivité est d'autant plus forte que la teneur en eau initiale est plus élevée, pour les échantillons structurés : Collias et Verger. Cette tendance n'est pas visible pour Lysimètre. L'évolution de la densité de macropores dans l'échantillon est plus complexe. La densité de macropores diminue pour Collias, dans les deux états hydriques les plus secs, et augmente pour les échantillons argilo-limoneux. Pour ces derniers, les taux de variation semblent diminuer avec la teneur en eau initiale. Pour les trois sols, les taux de variations restent cependant modérés, de 1 à 15%. La densité de connexions dans la macroporosité diminue pendant l'infiltration, sauf pour les échantillons argileux dans un état hydrique initial moyennement sec.

En considérant la macroporosité percolante (tableau III – 6 (b) ; III – 7 (b) et figure III – 9), le pourcentage de macroporosité ainsi que la surface spécifique montrent les mêmes évolutions temporelles pour les trois sols et les trois teneurs en eau initiales que celles décrites précédemment : diminution de T_0 à T_{90}, et ressaut de T_{90} à T_{120}. Le taux de diminution de la macroporosité percolante, pendant l'infiltration, qui s'échelonne de 21 à 50 % est plus important que celui de la macroporosité totale. Le ressaut de macroporosité à l'arrêt de la pluie est aussi plus important que pour la macroporosité totale. Par opposition, la complexité de la surface varie peu contrairement à celle de la macroporosité totale.

L'indice de connectivité est très largement négatif à tous les temps, indiquant un système présentant toujours plus de connexions que d'objets isolés. Avec l'infiltration, la connectivité du système augmente même (l'indice de connectivité diminue) pour tous les sols et les teneurs en eau initiales, contrairement à ceux de la macroporosité totale. La densité de macropores reste constante puisqu'un seul macropore percolant n'est détecté à chaque fois. Les deux sols structurés, Collias et Verger, ont des indices à T_0 très proches (~-5000) et Lysimètre autour de ~-2000. La densité de connexions dans la macroporosité percolante montre des variations complexes. Pour Collias et Verger aux deux états les plus humides, elle évolue peu aux différents temps de l'expérience. Il est à noter que dans le cas de Lysimètre à capacité au champ et humide, il n'est pas possible de générer d'objets macropores percolant aux temps 90 et 120

min, seul une macroporosité percolante est trouvée à T_0. En condition moyennement sèche, la macroporosité percolante est générée à chaque temps d'acquisition.

En résumé, l'humectation du sol lors de l'expérience d'infiltration – drainage réduit la macroporosité quel que soit le sol, la teneur en eau initiale et la structure considérée. L'arrêt de la pluie entraine un phénomène inverse que nous avons appelé un **ressaut de macroporosité**. Les taux de diminution de la macroporosité sont plus faibles si la matrice est à capacité au champ pour Collias et Lysimètre. Par opposition, les ressauts de la macroporosité sont plus faibles si la matrice est moyennement sèche. Les variations, diminution ou augmentation, sont globalement plus importantes pour la macroporosité percolante que pour la macroporosité totale, indiquant donc dans l'ensemble des processus impliqués dans ces phénomènes de modification structurale, un processus local lié au passage de l'eau (infiltration et drainage) dans la macroporosité active, incluse dans la macroporosité percolante. Si l'on considère la propriété de connectivité de l'espace poral, les résultats indiquent une diminution de la connectivité de la macroporosité totale avec l'infiltration (augmentation de l'indice) quels que soient le sol et la teneur eau initiale, due principalement à une augmentation du nombre de macropores ou à une diminution de la connexion de la macroporosité. La connectivité de la macroporosité percolante augmente quel que soit le sol et la teneur eau initiale en lien avec une augmentation de la densité de connexion dans la macroporosité percolante. Ce résultat laisserait supposer que même si globalement la macroporosité se referme, du fait de l'imbibition et du gonflement de la matrice lors de l'infiltration, les voies d'écoulement préférentielles sont préservées.

Tableau III – 6 : Fonctionnelles de Minkowski avec le nombre de composantes connexes (macropores et clusters de macropores) et le nombre de connexions redondantes, pour chaque sol, pour chaque état hydrique (CC : capacité au champ ; H : humide ; MS : moyennement sec), pour les deux types de macroporosités, totale (a) et percolante (b) à T0 : temps initial avant le début de la pluie ; T90 : temps à l'arrêt de la pluie ; T120 : temps à l'arrêt de l'expérience.

(a)

	Collias			Verger			Lysimètre		
T0	CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
Volume (cm3)	178.35	183.52	188.73	153.00	182.16	233.63	126.33	128.76	194.72
Surface (cm²)	4344.77	4703.79	4806.03	3652.75	3908.83	4815.51	2509.12	2571.03	3052.55
IMC de l'espace poral (cm)	93921.7	104153	106858	65445.1	66033.7	74326.3	243444	248242	28883.7
Nombre Euler	16203	12898	18565	2313	4024	8647	1778	2907	3277
Nb. Macropores & clusters	25175	27076	29363	13260	14112	20160	7255	7853	6570
Nb. connexion redondantes	8972	14178	10798	10947	10088	11513	5477	4946	3293
T90									
Volume (cm3)	149.28	133.12	141.36	127.13	156.40	171.42	115.36	88.56	141.51
Surface (cm²)	3723.44	3417.51	3649.53	3114.88	3410.49	3877.77	2323.45	1889.54	2572.58
IMC de l'espace poral (cm)	87355.7	83394.4	87994.6	63546.4	65235.7	74176.7	239965	220591	29917.8
Nombre Euler	19278	14945	20342	6568	8105	11995	2806	4790	3639
Nb. Macropores & clusters	26126	24361	27434	15155	16242	21331	7682	8172	6637
Nb. connexion redondantes	6848	9416	7092	8587	8137	9336	4876	3382	2998
T120									
Volume (cm3)	162.081	147.469	145.736	143.749	166.797	178.875	111.601	99.1374	141.77
Surface (cm²)	3938.13	3749.08	3732.1	3470.5	3595.12	4033.92	2170.67	2026.25	2618.97
IMC de l'espace poral (cm)	88259.9	86991.8	88621.9	65343.1	65536.4	75888.6	216167	221361	31411.1
Nombre Euler	18332	13965	20884	4616	7796	11921	2506	4131	3364
Nb. Macropores & clusters	26201	24571	27623	14426	16314	21575	6601	8018	6729
Nb. connexion redondantes	7869	10606	6739	9810	8518	9654	4095	3887	3365

(b)

	Collias			Verger			Lysimètre		
T0	CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
Volume (cm3)	125.629	133.089	138.47	130.954	158.795	211.814	54.1747	105.682	177.001
Surface (cm²)	2534.28	2925.04	2980.47	2861.84	3085.01	3925.39	929.23	1836.15	2488.58
IMC de l'espace poral (cm)	34281.3	43914.3	42777.2	37703.8	37323.8	38050.7	58265.8	113291	12639.4
Nombre Euler	-8795	-13455	-10032	-10629	-9864	-11144	-2023	-4096	-2937
Nb. Macropores & clusters	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nb. connexion redondantes	8796	13456	10033	10630	9865	11145	2024	4097	2938
T90									
Volume (cm3)	83.9979	66.7485	83.4986	97.9777	124.816	144.385	ND	ND	123.206
Surface (cm²)	1649.28	1303.97	1711.98	2112.28	2377.3	2848.66	ND	ND	2000.63
IMC de l'espace poral (cm)	23603.7	19476.2	25241.4	30033.1	30964.5	34655.1	ND	ND	13552.1
Nombre Euler	-5515	-5836	-6051	-8108	-7815	-8912	ND	ND	-2820
Nb. Macropores & clusters	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nb. connexion redondantes	5516	5837	6052	8109	7816	8913	ND	ND	2821
T120									
Volume (cm3)	102.591	93.5827	86.9061	117.866	136.834	151.427	ND	ND	122.697
Surface (cm²)	1975.29	1954.57	1772.94	2568.67	2602.01	2998.78	ND	ND	2027.52
IMC de l'espace poral (cm)	26098.9	30069.5	25378.9	34668.3	32040.3	36157.1	ND	ND	14662.3
Nombre Euler	-6876	-9477	-5890	-9400	-8274	-9282	ND	ND	-3137
Nb. Macropores & clusters	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Nb. connexion redondantes	6877	9478	5891	9401	8275	9283	ND	ND	3138

Tableau III – 7 : Fonctionnelles de Minkowski avec le nombre de composantes connexes (macropores et clusters de macropores) et le nombre de connexions redondantes, pour chaque sol, pour chaque état hydrique (CC : capacité au champ ; H : humide ; MS : moyennement sec), pour les deux types de macroporosités, totale (a) et percolante (b) à T0 : temps initial avant le début de la pluie ; T90 : temps à l'arrêt de la pluie ; T120 : temps à l'arrêt de l'expérience. (c) et (d) sont les tableaux de variations pour les deux macroporosités étudiées.

(a) Macroporosité totale

		Collias			Verger			Lysimètre		
		CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
T0	Macroporosité %	10.70	11.01	11.32	8.49	10.11	12.97	7.03	7.16	10.83
T90		8.96	7.99	8.48	7.06	8.68	9.51	ND	ND	7.87
T120		9.72	8.85	8.74	7.98	9.26	9.93	ND	ND	7.89
T0	Surface spécifique (m²/m3)	260.69	282.23	288.36	202.73	216.94	267.26	139.61	143.06	169.85
T90		223.41	205.05	218.97	172.88	189.28	215.22	ND	ND	143.14
T120		236.29	224.95	223.93	192.61	199.53	223.88	ND	ND	145.72
T0	Complexité de la surface de l'espace poreux (m/m²)*1	2161.7	2214.2	2223.4	1791.7	1689.3	1543.5	9702.4	9655.4	946.2
T90		2346.1	2440.2	2411.1	2040.1	1912.8	1912.9	ND	ND	1162.9
T120		2241.2	2320.4	2374.6	1882.8	1822.9	1881.3	ND	ND	1199.4
T0	Indice de connectivité des macropores (dm-3)	9722	7739	11139	1388	2414	5188	1067	1744	1966
T90		15105	16246	17618	7956	8467	12096	4353	4712	3942
T120		5383	8507	6479	6568	6053	6908	3286	2968	1976
T0	Densité de macropores&clusters (dm-3)	1553.72	2099	1582	5733	3507	2331	4080	2701	2005
T90		1355	1630	1349	2307	2004	1778	ND	ND	1824
T120		1429	1759	1323	3125	2093	1810	ND	ND	2000
T0	Densité de connexion dans l'espace poreux (dm-3)*2	50305	77257	57213	71549	55380	49280	43356	38414	16911
T90		45874	70735	50170	67547	52029	54463	ND	ND	21185
T120		48550	71920	46241	68244	51068	53971	ND	ND	23736

(b) Macroporosité percolante

		Collias			Verger			Lysimètre		
		CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
T0	Macroporosité %	7.54	7.99	8.31	7.27	8.81	11.76	3.01	5.88	9.85
T90		5.04	4.00	5.01	5.44	6.93	8.01	ND	ND	6.86
T120		6.16	5.62	5.21	6.54	7.59	8.40	ND	ND	6.83
T0	Surface spécifique (m²/m3)	152.06	175.50	178.83	158.83	171.22	217.86	51.70	102.17	138.47
T90		98.96	78.24	102.72	117.23	131.94	158.10	ND	ND	111.32
T120		118.52	117.28	106.38	142.56	144.41	166.43	ND	ND	112.82
T0	Complexité de la surface de l'espace poreux (m/m²)*1	1352.7	1501.3	1435.3	1317.5	1209.8	969.3	6270.3	6170.0	507.9
T90		1431.2	1493.6	1474.4	1421.8	1302.5	1216.5	ND	ND	677.4
T120		1321.3	1538.4	1431.5	1349.7	1231.4	1205.7	ND	ND	723.2
T0	Indice de connectivité des macropores (dm-3)	-5277	-8073	-6019	-6377	-5918	-6686	-1214	-2458	-1762
T90		-340	-360	-373	-500	-482	-550	ND	ND	-174
T120		-357	-492	-306	-488	-429	-481	ND	ND	-163
T0	Densité de macropores & clusters (dm-3)	-0.11	0	0	0	0	0	0	0	0
T90		0	0	0	0	0	0	ND	ND	0
T120		0	0	0	0	0	0	ND	ND	0
T0	Densité de connexion dans l'espace poreux (dm-3)*2	70016	101105	72456	81174	62124	52617	37361	38767	16599
T90		65668	87448	72480	82764	62620	61731	ND	ND	22897
T120		67033	101279	67786	79760	60475	61303	ND	ND	25575

(c) Macroporosité totale

Macroporosité totale		Collias			Verger			Lysimètre		
		CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
T0 min	Taux variation macroporosité (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation Surface spécifique (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation complexité surface de l'espace poreux (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation Indice de connectivité des macropores (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation Densité de macropores & clusters (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation Densité de connexion dans l'espace poreux (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
T90 min	Taux variation macroporosité (%)	-16.3	-27.5	-25.1	-16.9	-14.1	-26.6	-8.7	-31.2	-27.3
	Taux variation Surface spécifique (%)	-14.3	-27.3	-24.1	-14.7	-12.7	-19.5	-7.4	-26.5	-15.7
	Taux variation complexité surface de l'espace poreux (%)	8.5	10.2	8.4	13.9	13.2	23.9	6.4	20.9	-87.7
	Taux variation Indice de connectivité des macropores (%)	19.0	15.9	9.6	184.0	101.4	38.7	57.8	64.8	11.0
	Taux variation Densité de macropores & clusters (%)	3.8	-10.0	-6.6	14.3	15.1	5.8	5.9	4.1	1.0
	Taux variation Densité de connexion dans l'espace poreux (%)	-8.8	-8.4	-12.3	-5.6	-6.1	10.5	-2.5	-0.6	25.3
T120 min	Taux variation macroporosité (%)	8.6	10.8	3.1	13.1	6.7	4.3	-3.3	11.9	0.2
	Taux variation Surface spécifique (%)	5.8	9.7	2.3	11.4	5.4	4.0	-6.6	7.2	1.8
	Taux variation complexité surface de l'espace poreux (%)	-4.5	-4.9	-1.5	-7.7	-4.7	-1.7	-3.6	-6.4	3.1
	Taux variation Indice de connectivité des macropores (%)	-4.9	-6.6	2.7	-29.7	-3.8	-0.6	-10.7	-13.8	-7.6
	Taux variation Densité de macropores & clusters (%)	0.3	0.9	0.7	-4.8	0.4	1.1	-14.1	-1.9	1.4
	Taux variation Densité de connexion dans l'espace poreux (%)	5.8	1.7	-7.8	1.0	-1.8	-0.9	-13.2	2.7	12.0

(d) Macroporosité percolante

Macroporosité percolante		Collias			Verger			Lysimètre		
		CC	H	MS	CC	H	MS	CC	H	MS
T0 min	Taux variation macroporosité (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation Surface spécifique (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation complexité surface de l'espace poreux (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation Indice de connectivité des macropores (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation Densité de macropores&clusters (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
	Taux variation Densité de connexion dans l'espace poreux (%)	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref	ref
T90 min	Taux variation macroporosité (%)	-33.1	-49.8	-39.7	-25.2	-21.4	-31.8	ND	ND	-30.4
	Taux variation Surface spécifique (%)	-34.9	-55.4	-42.6	-26.2	-22.9	-27.4	ND	ND	-19.6
	Taux variation complexité surface de l'espace poreux (%)	5.8	-0.5	2.7	7.9	7.7	25.5	ND	ND	-86.7
	Taux variation Indice de connectivité des macropores (%)	-37.3	-56.6	-39.7	-23.7	-20.8	-20.0	ND	ND	-4.0
	Taux variation Densité de macropores&clusters (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	ND	ND	0.0
	Taux variation Densité de connexion dans l'espace poreux (%)	-6.2	-13.5	0.0	2.0	0.8	17.3	ND	ND	37.9
T120 min	Taux variation macroporosité (%)	22.1	40.2	4.1	20.3	9.6	4.9	ND	ND	-0.4
	Taux variation Surface spécifique (%)	19.8	49.9	3.6	21.6	9.5	5.3	ND	ND	1.3
	Taux variation complexité surface de l'espace poreux (%)	-7.7	3.0	-2.9	-5.1	-5.5	-0.9	ND	ND	6.8
	Taux variation Indice de connectivité des macropores (%)	24.7	62.4	-2.7	15.9	5.9	4.2	ND	ND	11.2
	Taux variation Densité de macropores&clusters (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	ND	ND	0.0
	Taux variation Densité de connexion dans l'espace poreux (%)	2.1	15.8	-6.5	-3.6	-3.4	-0.7	ND	ND	11.7

Figure III – 8 : Propriétés et indices géométriques par type de sol, macroporosité totale (avec bordure), pour chaque indice, pour chaque l'état hydrique présenté séparément. Bleu : T0, orange : T90, gris : T120. CC : capacité au champ ; H : Humide et MS : Moyennement Sèche.

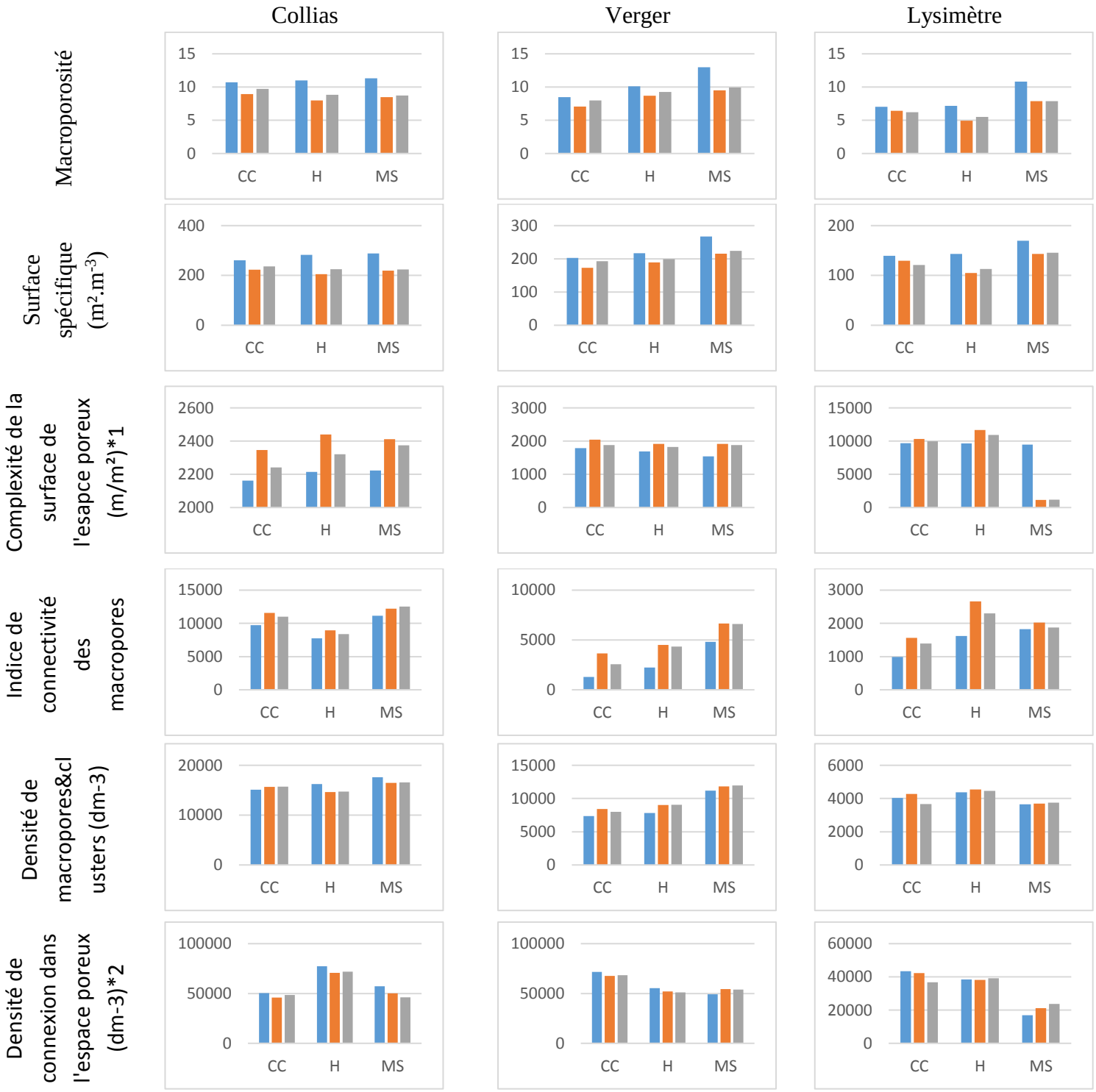
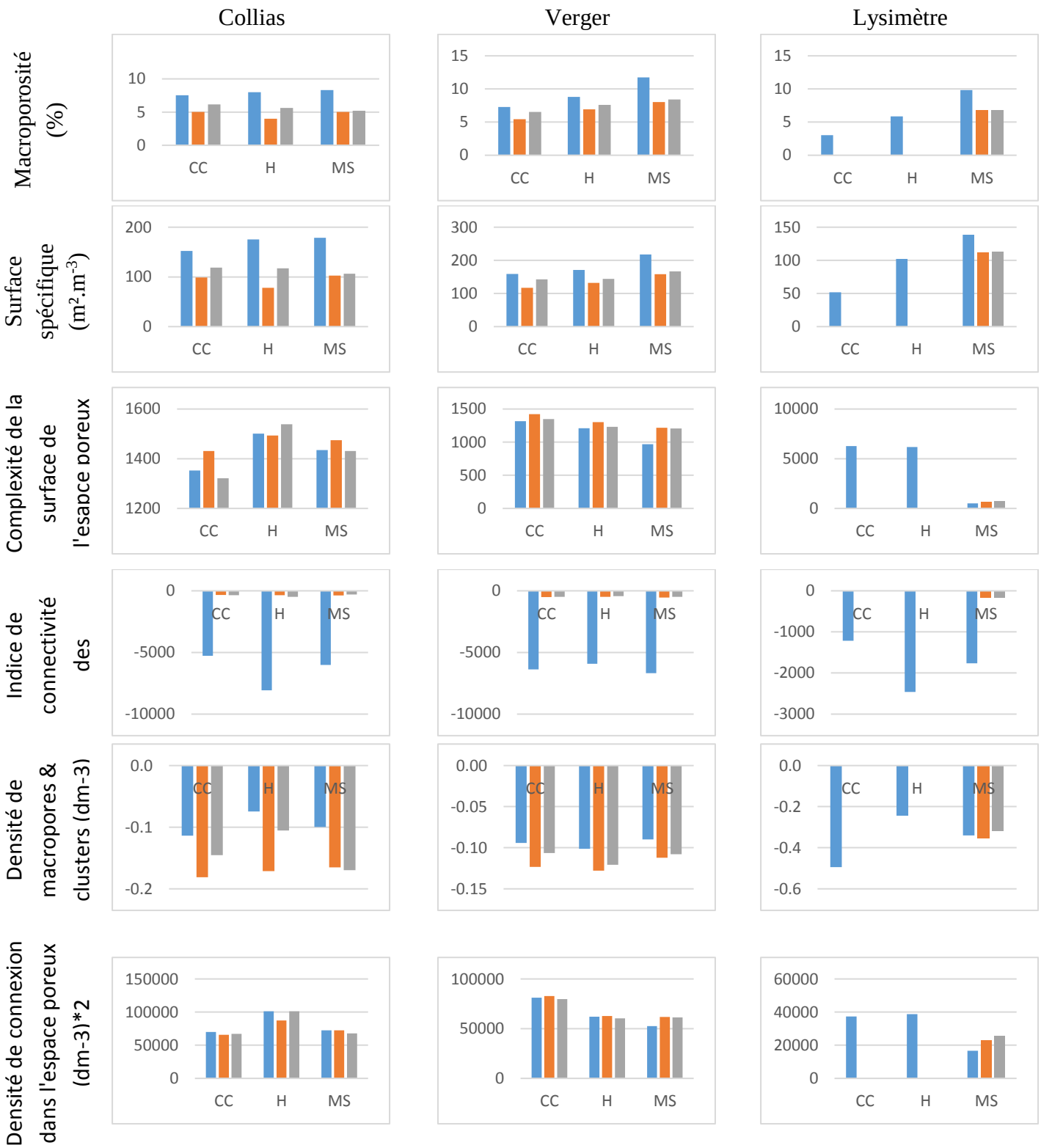


Figure III – 9 : Propriétés et indices géométriques par type de sol, macroporosité percolante (avec bordure), pour chaque indice, pour chaque l'état hydrique présenté séparément. Bleu : T0, orange : T90, gris : T120. CC : capacité au champ ; H : Humide et MS : Moyennement Sèche.



Dans la suite, nous avons cherché à décrire plus en détail l'évolution des indices durant l'infiltration, donc en fonction aussi des différents régimes, transitoire et stationnaire, ou pseudo-stationnaire. Les fonctionnelles de Minkowski ont été déterminées à chaque acquisition et tracées en fonction du temps (figure III – 10) pour les structures totales et percolantes.

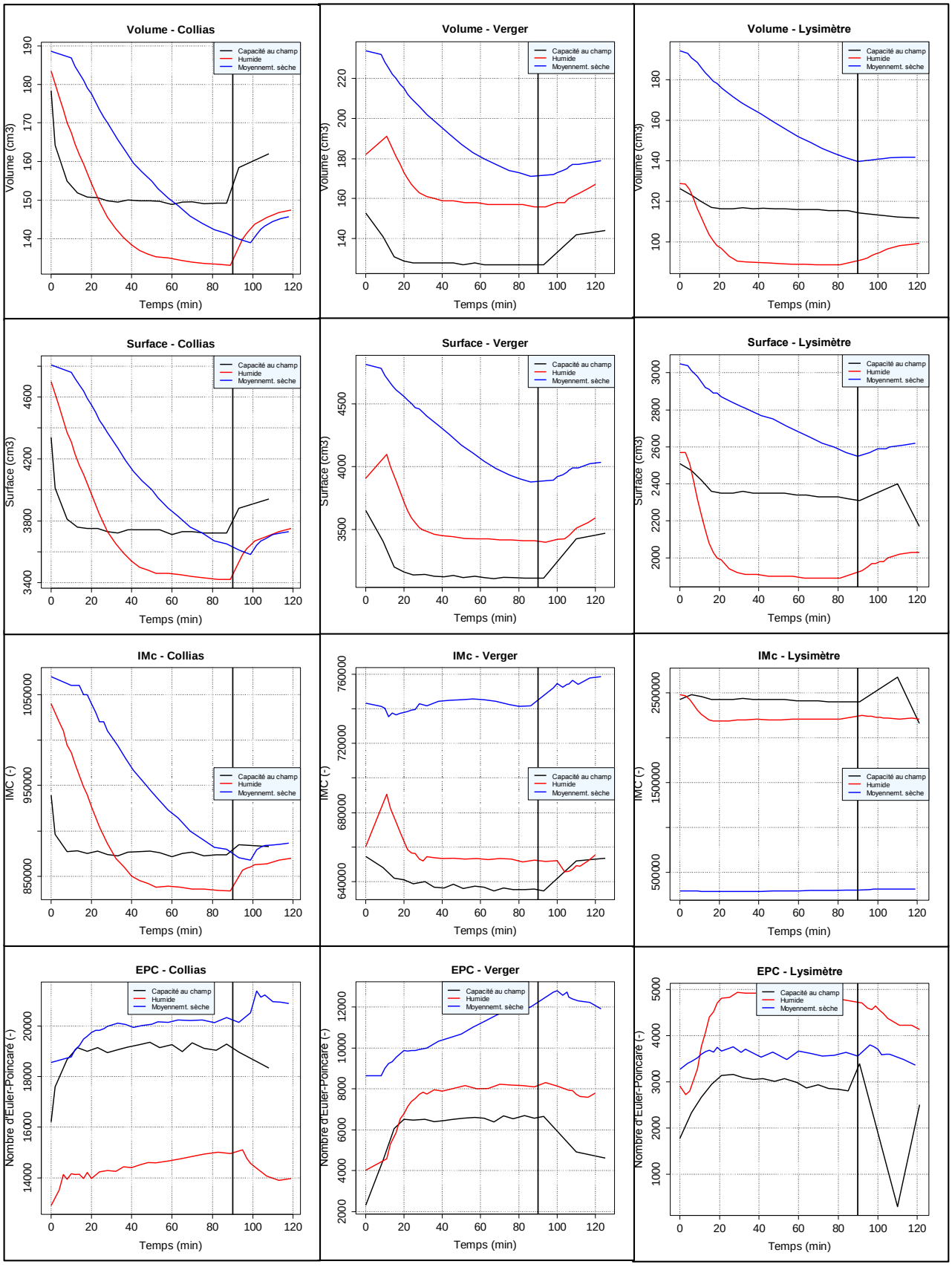
Les courbes des indices pour les états hydriques à capacité au champ et humide, montrent une évolution importante et rapide, suivie d'un palier marqué jusqu'à l'arrêt de la pluie. Pour l'état hydrique le plus sec, l'évolution se poursuit souvent durant toute la durée de l'événement pluvieux, en particulier pour le volume macroporeux, la surface et la complexité de la surface de l'espace poral.

Ces courbes mettent donc en évidence que les modifications conjointes de la structure, et de l'espace poral complémentaire, se produisent principalement pendant la phase de pénétration de l'eau dans l'échantillon et pendant la période transitoire, succédant à la percée et précédant l'arrivée sur le palier stationnaire (palier horizontal) ou pseudo stationnaire (pente non nulle). Dans ce dernier cas, l'indice continue à évoluer jusqu'à la fin de l'évènement pluvieux. Pour les échantillons dans l'état hydrique moyennement sec, l'apport d'eau n'est pas suffisant pour atteindre le régime pseudo-stationnaire.

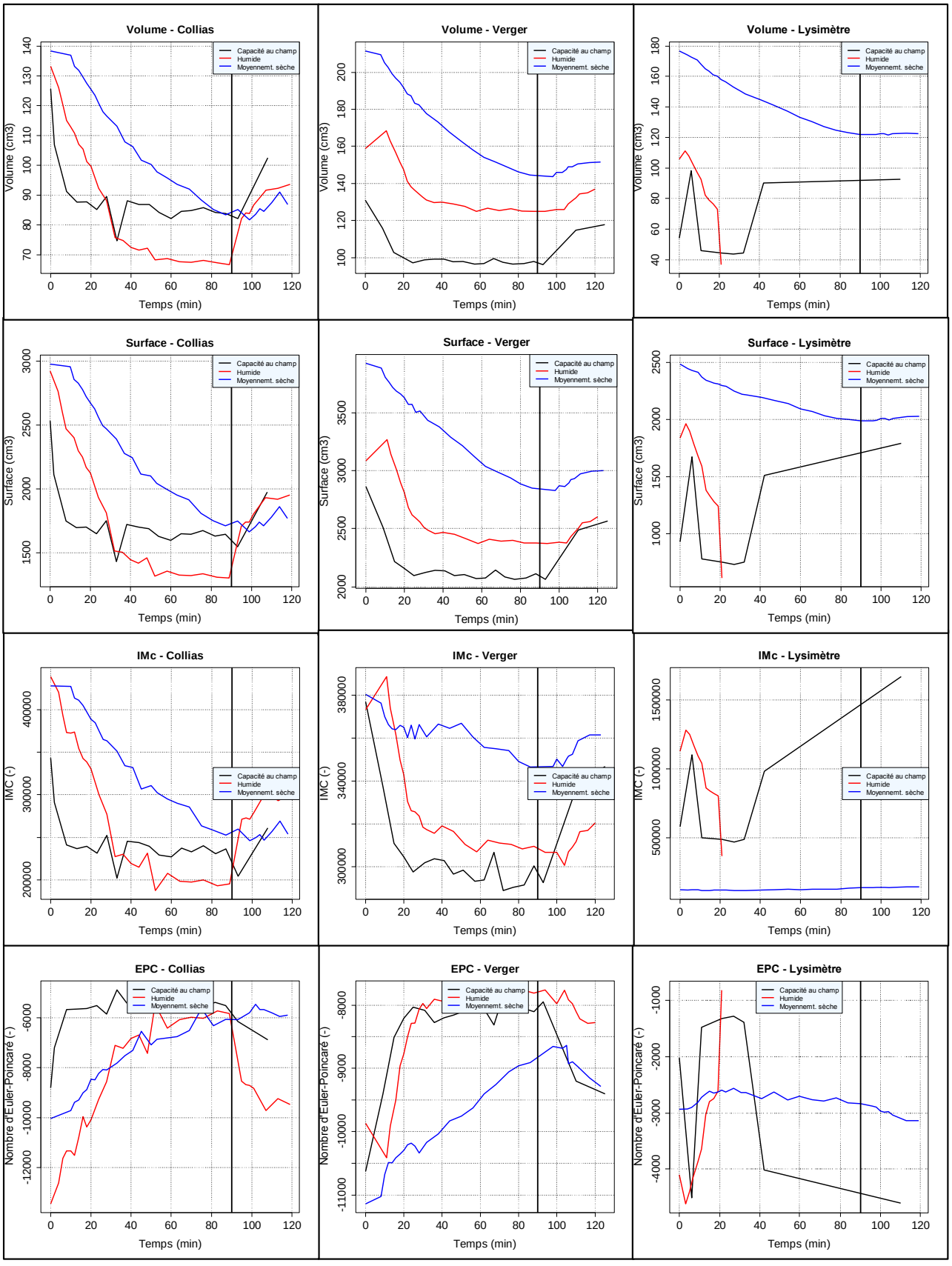
Pour l'échantillon Collias, dans l'état hydrique humide, par exemple, la première pente est suivie d'une seconde, indiquant que le régime stationnaire n'est pas atteint. A contrario, l'échantillon Lysimètre montre une évolution quasi nulle de sa connectivité et de l'indice de complexité de la surface de l'espace poral, pour sa structure totale à l'état hydrique moyennement sec. Ces résultats mettent également en évidence qu'une caractérisation efficace de la structure à partir d'indices de ce type pourrait être de quantifier 1) leurs taux d'évolution dans la phase d'humectation et de percée et 2) leurs moyennes et variabilités quand le palier est atteint.

Figure III – 10 : Fonctionnelles de Minkowski pour tous les sols, toutes les teneurs en eau initiales, pour les deux types de structures « percolantes » et « totales ». trait vertical à 90 : arrêt pluie

(a) Macroporosités totales



(b) Macroporosités percolantes



III.2.2.2. Evolution des profils de macroporosité pendant l'expérience

Les profils des figures suivantes (figures III – 11 et 12) ne sont pas les profils de macroporosités dites « percolante » car le traitement sous Avizo pour extraire la macroporosité percolante prend du temps et les macroporosités percolantes à T_{90} et T_{120} de la colonne Lysimètre à capacité au champ et humide n'existent pas. De plus et comme seul le profil à T_0 est utilisé dans le modèle, c'est le seul temps auquel nous avons extrait la macroporosité « percolante ». Pour tous les autres temps, nous avons l'information de la macroporosité totale. Les figures III – 11 et 12 présentent les profils de la macroporosité totale obtenus à T_0, T_{90} et T_{120} pour les trois types de sols ((a) Collias ; (b) Verger ; (c) Lysimètre) et pour les trois teneurs en eau initiales.

Les graphiques de la figure III – 11 montrent l'évolution de la macroporosité à chaque teneur en eau aux trois instants clés choisis durant l'infiltration. Les graphiques de la figure III – 12 montrent les profils de macroporosité à un temps clé fixé durant l'infiltration pour les trois teneurs en eau initiales.

Les profils de la figure III – 11 montrent que le profil entier de macroporosité totale a été modifié au cours de l'expérience. Cette modification porte sur la quantité totale et non sur la forme du profil de macroporosité, les profils acquis aux trois temps restent parallèles entre eux. Le profil acquis avant le début de l'infiltration, soit à T_0, est toujours supérieur aux deux autres. On remarque seulement la translation du profil vers des macroporosités plus petites à T_{90} et le ressaut de macroporosité, et la translation du profil vers les macroporosités plus grandes pour T_{120} par rapport à T_{90}. Les différents « pics » ou fluctuations se retrouvent sur les trois profils.

La teneur en eau initiale joue un rôle sur l'écart entre les profils. En effet, à l'état hydrique à capacité au champ, les trois courbes présentent les écarts les plus réduits et sont presque confondues. Les écarts augmentent ensuite avec la diminution de la teneur en eau, en particulier entre T_0 et T_{90} et en profondeur, dans la seconde moitié de la colonne.

La figure III – 12 reprend les mêmes informations que précédemment mais en comparant la macroporosité totale aux différentes teneurs en eau initiales pour un même temps dans l'essai d'infiltration. Les deux sols argileux ont un même comportement variable dans le temps et selon la teneur en eau initiale (Verger et Lysimètre). Tandis que Collias montre des profils très semblables pour les trois temps fixés avec cependant une modification dans les 6 derniers centimètres similaire à celle visibles sur la comparaison des profils initiaux (fig. III – 7). On peut noter également que la hiérarchie n'est pas respectée aux différents temps, en d'autres termes le profil à capacité au champ n'est pas toujours le plus bas. Pour l'échantillon Verger, la hiérarchie entre les profils est respectée aux trois temps. Les profils présentent cependant des écarts plus importants en haut de colonne, sur les 4 premiers centimètres. Dans le cas de l'échantillon Lysimètre, la hiérarchie n'est pas respectée aux temps T_{90} et T_{120}, entre les états hydriques à capacité au champ et humide. Les profils sont cependant de formes similaires.

D'une manière générale, la comparaison des trois temps fixés dans l'expérience et des trois teneurs en eau initiales (fig. III – 11), montrent que les profils faits à T_0 correspondent aux valeurs de macroporosité les plus grandes, ensuite celui fait à la fin de l'apport d'eau (T_{90}) est le plus bas et enfin le profil de macroporosité fait à l'arrêt du suivi au scanner (T_{120}) est

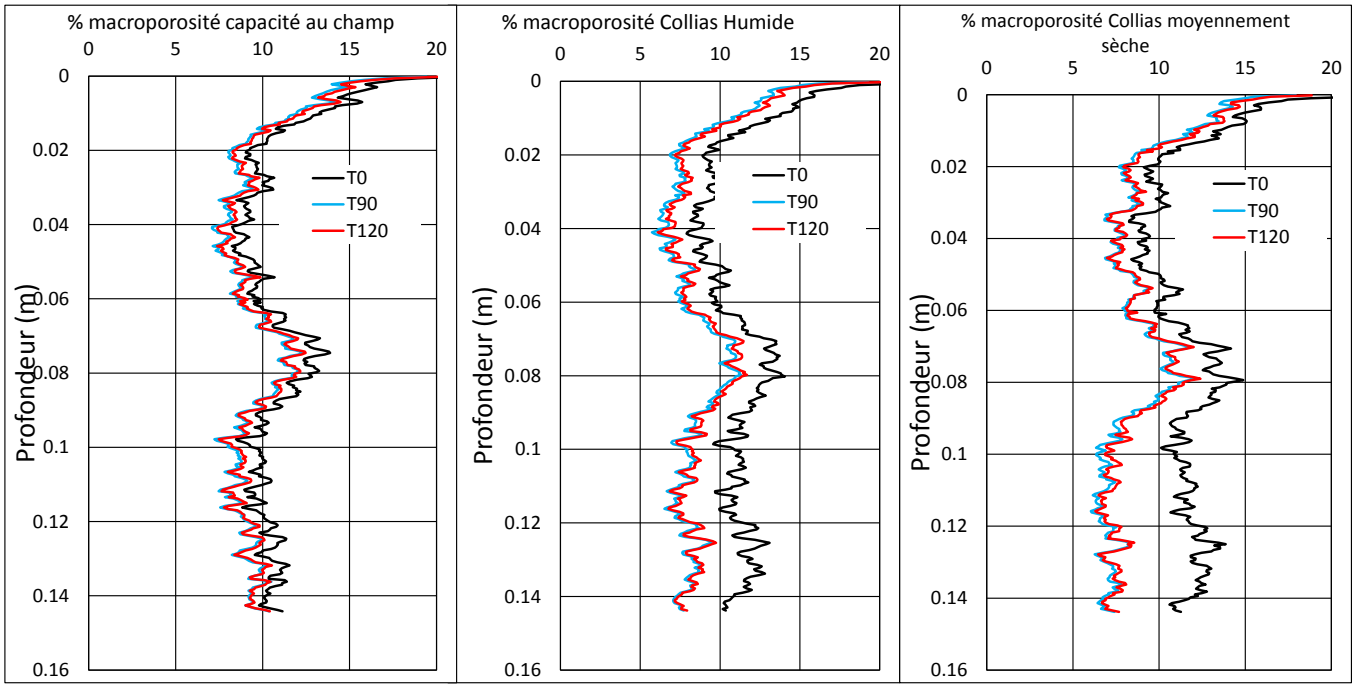
intermédiaire entre les deux. Pour une teneur en eau initiale et un sol donné, la structure est modifiée d'une façon presque homogène (profils pratiquement parallèles) sur toute la hauteur de la colonne. La modification est d'autant plus importante que la teneur en eau initiale est basse et elle est légèrement plus importante en bas de colonne pour Collias.

Pour un temps et un sol donné, i.e. en comparant aux mêmes temps les trois essais faits aux trois teneurs en eau, nous mettons en évidence des profils relativement semblables dans leurs formes, ce qui n'indique pas de modifications majeures lors des cycles d'humectation – dessiccation. Des différences significatives sont cependant visibles dans la partie inférieure de Collias et la partie supérieure de Verger.

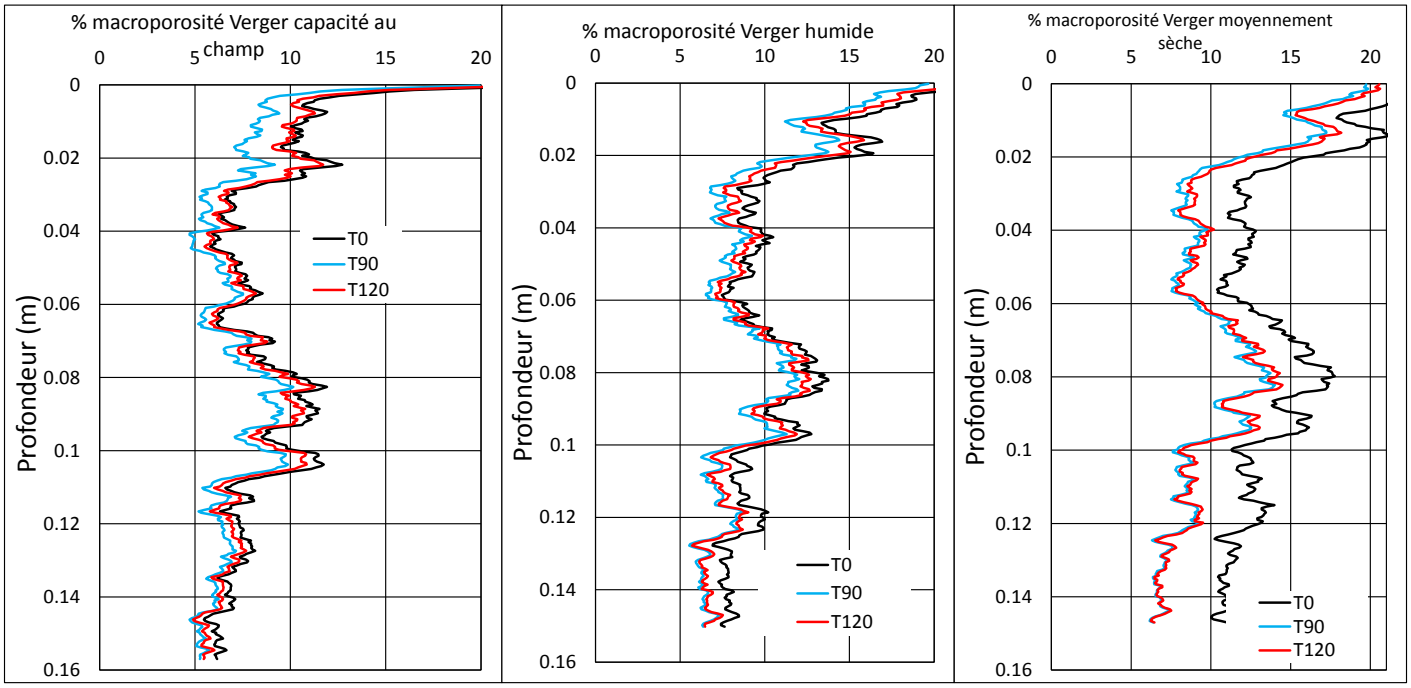
Ces résultats montrent qu'une part importante de la macroporosité, sur toute la hauteur de sol, est affectée par le gonflement de la matrice pendant l'expérience d'infiltration et son retrait en drainage seul. Par ailleurs, ces modifications structurales semblent être pour une part réversible. On observe en effet des profils pratiquement parallèles qui ont simplement été translatés. Il pourrait donc être possible de tenir compte de cette évolution dans un modèle, en faisant comme première l'hypothèse de la constante en z du profil et connaissant les propriétés de gonflement – retrait de la matrice.

Figure III – 11 : Dynamique temporelle de la macroporosité en fonction de la teneur en eau initiale. ((a) – Collias ; (b) – Verger ; (c) – Lysimètre)

(a) Collias



(b) Verger



(c) Lysimètre

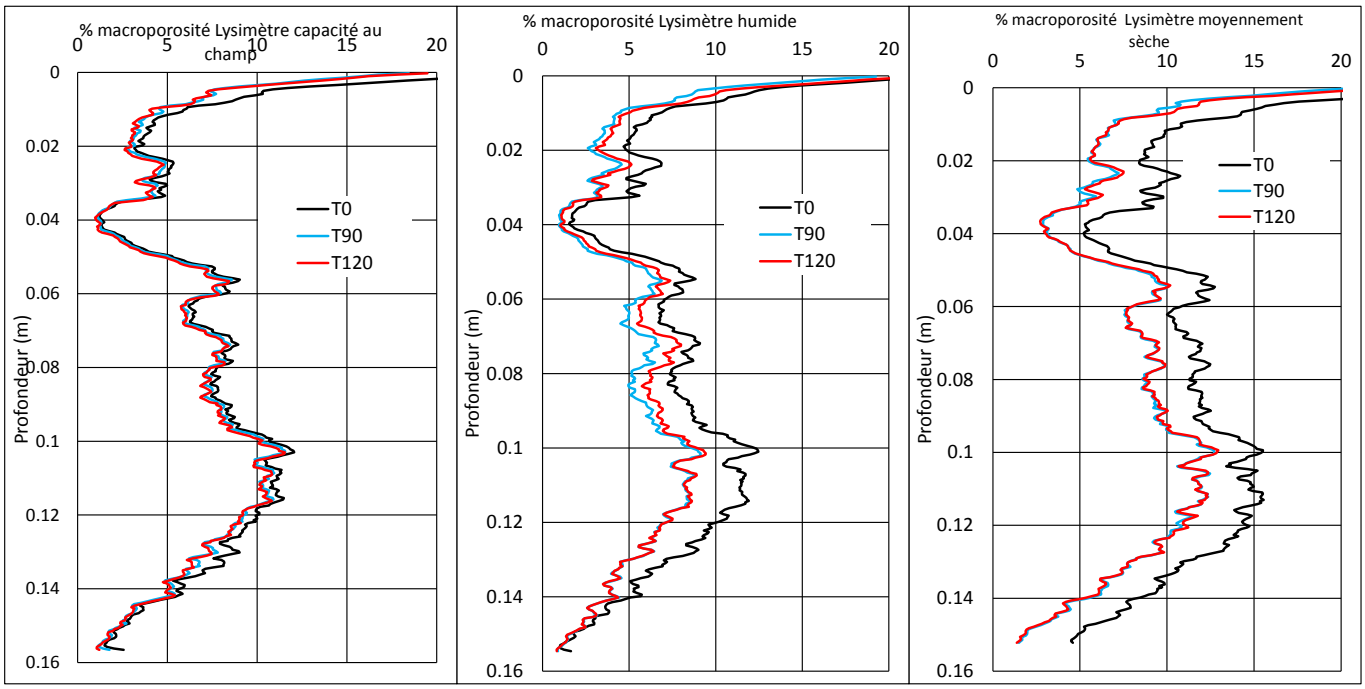
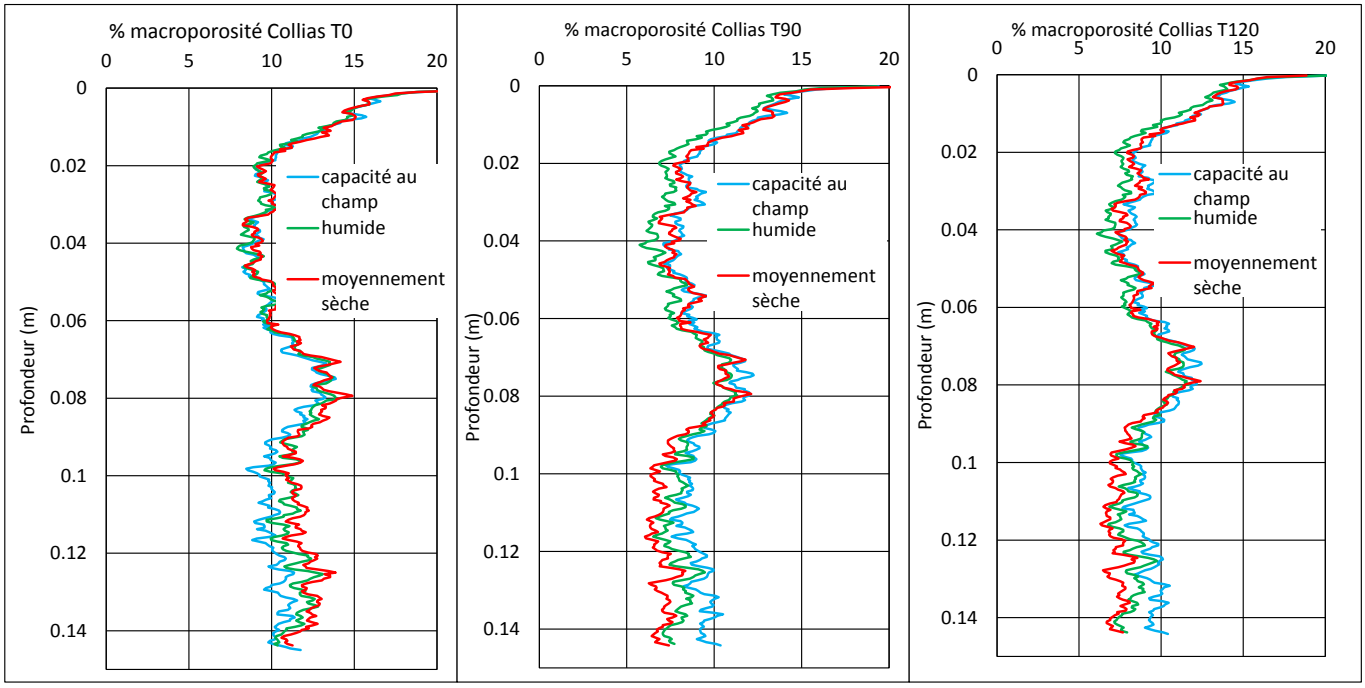
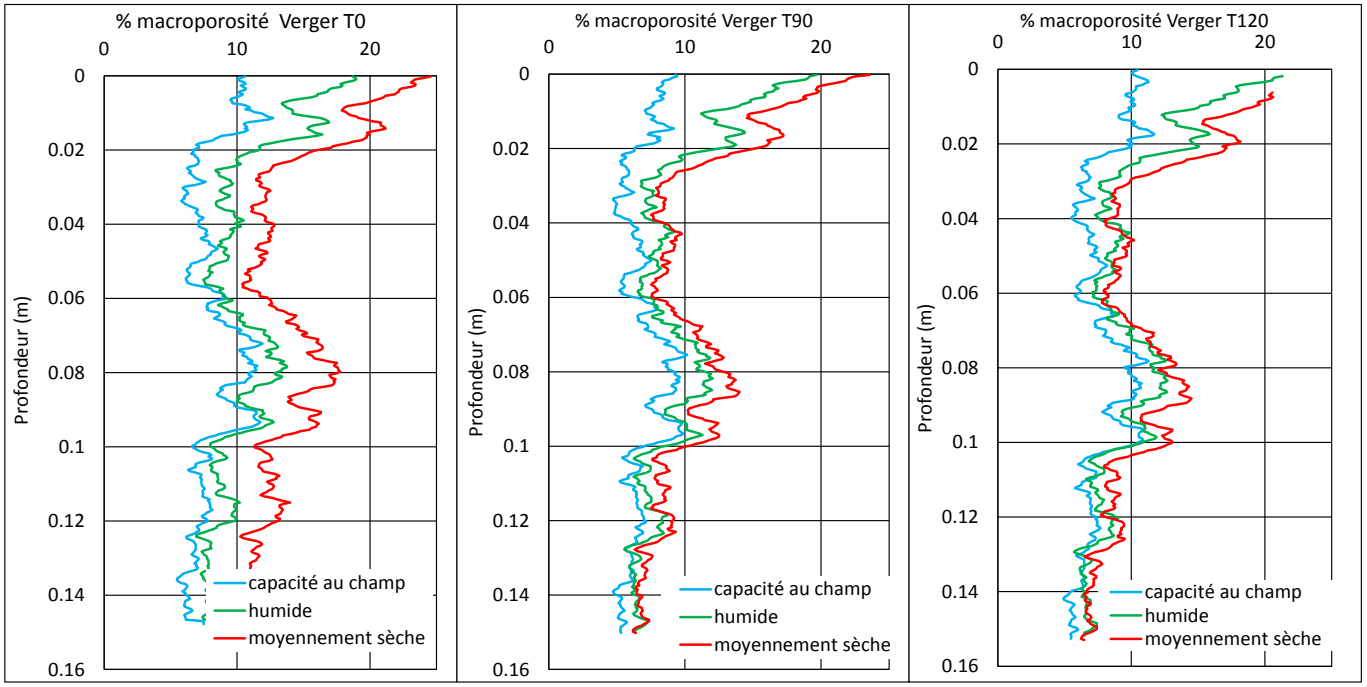


Figure III – 12 : Comparaison des profils de macroporosité en fonction de la teneur en eau initiale à trois temps clés de l'expérimentation. ((a) – Collias ; (b) – Verger ; (c) – Lysimètre)

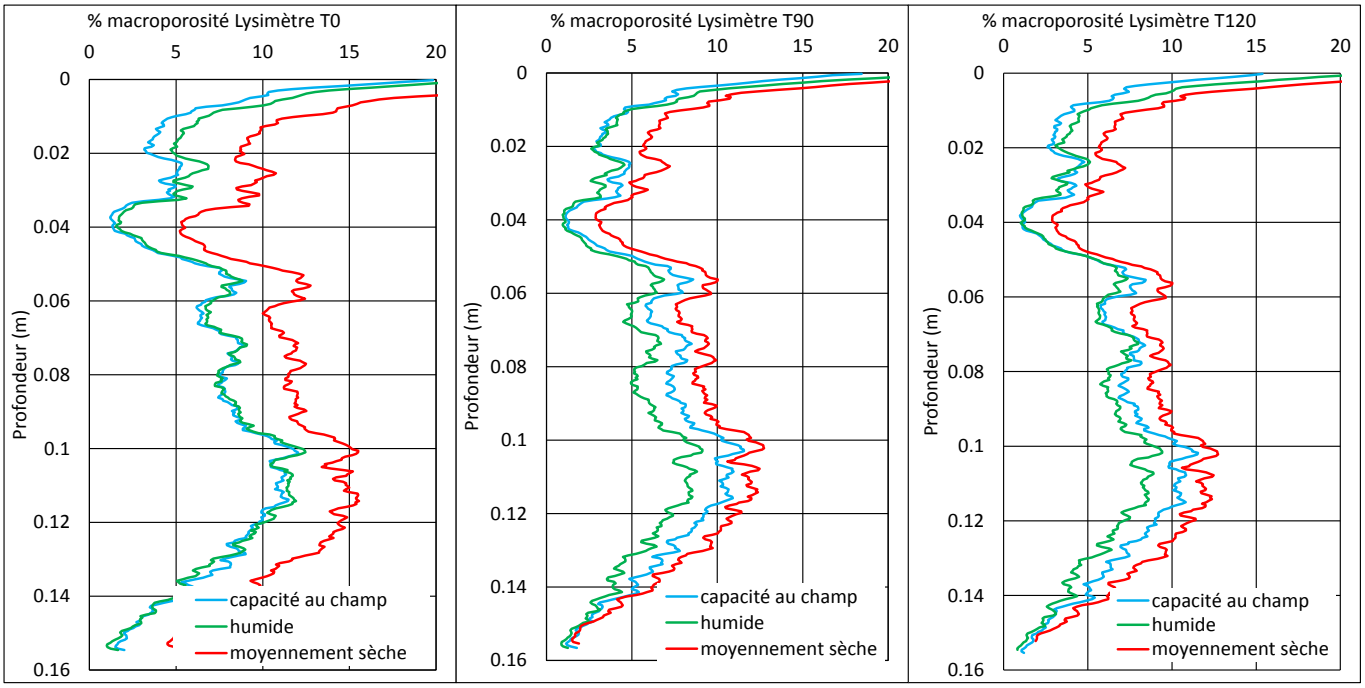
(a) Collias



(b) Verger



(c) Lysimètre



III.2.2.3. Evolution dynamique couplée de la macroporosité et du nombre de macropores

Toujours dans l'optique de comparer les structures des sols étudiés, nous avons couplé l'évolution de deux indicateurs de structure, le volume et le nombre de macropores, afin de représenter graphiquement les variations de structures observées.

Le nombre de macropores, déjà utilisé précédemment, est un indicateur global de la structure macroporeuse (Katuwal et al., 2015b). Dans un contexte d'évolution structurale, durant l'infiltration – drainage, l'évolution du nombre de macropores renseigne sur l'évolution des macropores structuraux, qui devraient être les plus sensibles, et sur l'évolution des connexions de l'espace poral. Ces évolutions sont corrélées à celle du volume de la macroporosité. Dans la suite, nous suivons l'évolution conjointe des macropores et du volume macroporeux au cours du temps, pendant les expériences d'infiltration – drainage, pour les différents états hydriques initiaux. Le graphique (fig. III – 13) montre le volume de macroporosité en fonction du nombre de macropores pendant l'infiltration – drainage aux trois teneurs en eau initiales uniquement, sans considérer les macropores de bordure. Afin de comparer les différents essais et les différents sols, le volume de macroporosité (en ordonnée) est normalisé par le volume de sol aux différents essais, de même que le nombre de macropores est normalisé par le volume de sol ce qui donne une densité de macropores (cm^{-3}).

La figure III – 13 montre que la densité de macropores permet d'établir une hiérarchie entre les trois structures. De plus, en combinant cette densité avec l'évolution du volume de macropores, les sols se regroupent par texture. En effet, Collias, dans ses différents états hydriques, comprend les plus grandes densités de macropores (environ 15 macropores au cm^3) du fait de sa structure plus grenue issue d'une texture plus sableuse. Ensuite, le sol Verger, se positionne avec une densité de macropores entre 7 et 14 macropores au cm^3, et finalement Lysimètre, qui a été travaillé, se situe autour de 4 macropores au cm^3, et referme le nombre de

macropores le plus petit. Le nombre de macropores par unité de volume, est donc en moyenne, le plus bas pour le sol travaillé, deux fois plus élevé pour le même sol non travaillé et 4 fois plus élevé entre le sol argileux-limoneux travaillé et le sol sablo-limoneux.

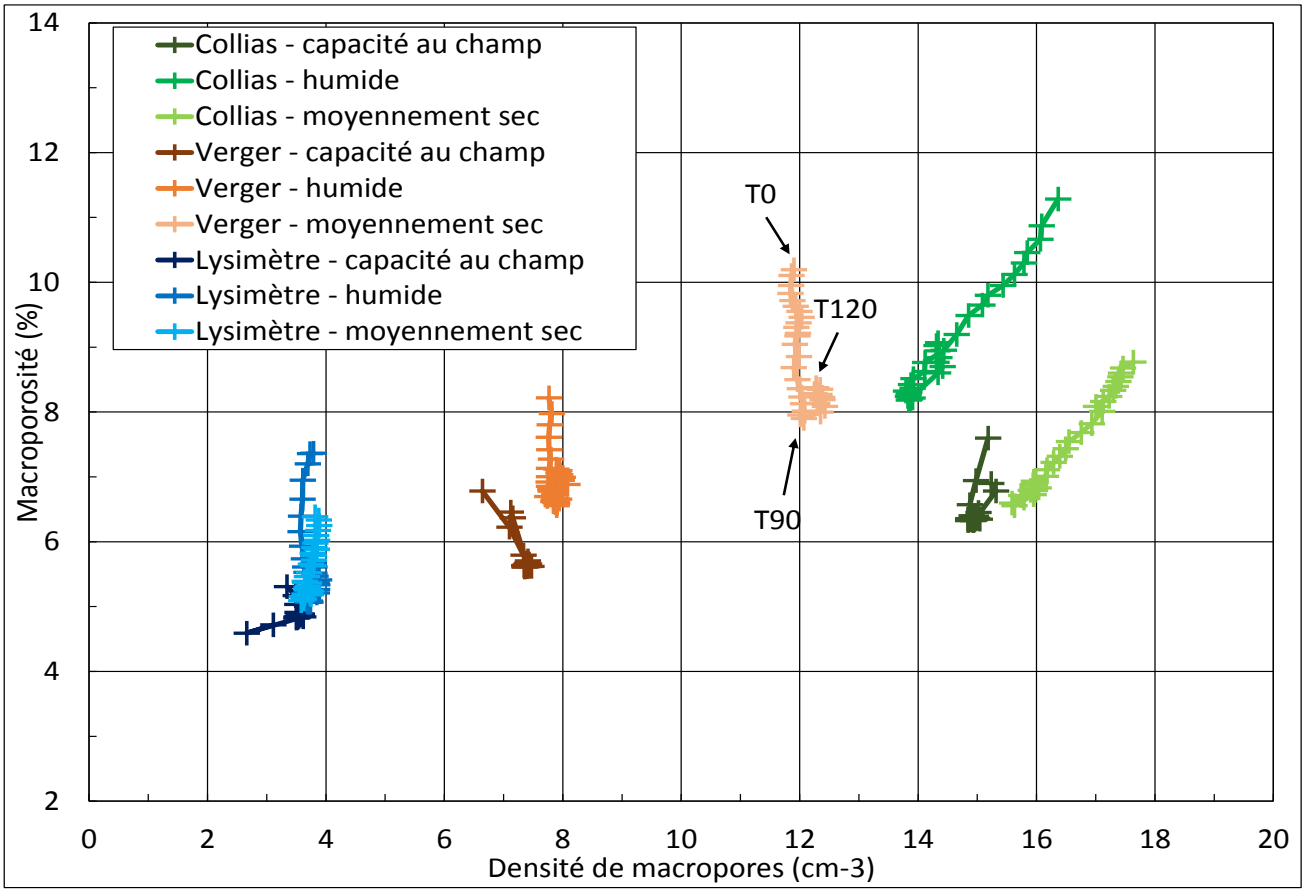
Si l'on considère l'évolution durant l'expérience, **dans le cas de Collias**, au début de l'expérience, le volume macroporeux est maximal (T_0 sur la figure III – 13), durant l'infiltration le volume macroporeux et nombre de macropores diminuent conjointement jusqu'à l'arrêt de l'apport d'eau (T_{90}). Pendant la phase de drainage, ces deux indicateurs ré-augmentent, en conservant la même dynamique (T_{120}). L'évolution conjointe des deux indicateurs montre une dynamique linéaire très marquée aux teneurs en eau les plus faibles, et moins marquée à capacité au champ.

Dans le cas de Verger, le volume de macropores montre une diminution durant l'infiltration alors que le nombre de macropores reste pratiquement constant. A partir de l'arrêt d'apport d'eau et pendant le drainage le volume et le nombre ré-augmente mais de façon « décalée » contrairement à Collias où la ré-augmentation se confond avec la phase de diminution (= infiltration). Cette évolution est valable pour les trois conditions initiales.

Dans le cas de Lysimètre, à capacité au champ, l'évolution conjointe des deux paramètres est singulière et probablement due au fait que l'eau ne s'est pas ou très lentement écoulée dans ce sol. Il y a en effet eu un problème de flaquage durant cette expérience (voir § IV.1). En conditions plus sèches, l'évolution est similaire au sol de Verger : diminution principale du volume de macropores pendant l'infiltration et ré-augmentation pendant le drainage sans modifications importantes du nombre de macropores. En condition humide, cette évolution ne semble pas linéaire contrairement à la courbe observée en condition moyennement sèche.

En résumé, cette approche, couplant la densité de macropores et la macroporosité permet une représentation graphique des sols et de leurs évolutions par textures et structures. Si on laisse à part, la teneur en eau initiale à capacité au champ, l'évolution structurale de Collias pendant l'infiltration – drainage est principalement liée à une diminution du nombre et du volume de macropores suivie d'une reprise avec la même dynamique ; cela indiquerait que la macroporosité se referme en collapsant certains macropores dits structuraux. L'évolution structurale des échantillons argileux, pendant l'infiltration – drainage est principalement liée à une diminution du volume de macropores et une reprise avec la même dynamique. La macroporosité se referme sans collapser les macropores, ce qui indiquerait plutôt une prédominance de l'effet gonflement – retrait sur la grosse macroporosité, tels que les biopores par exemple. L'évolution à capacité au champ est différente pour les trois sols. Cette représentation permettrait aussi de discriminer les états hydriques initiaux.

Figure III – 13 : Evolution de la macroporosité en fonction de la densité de macropores. Pour les trois sols et aux trois teneurs en eau initiales.



III.2.2.4. Analyses des variations de volumes par rétractométrie – Courbes de retrait

La dynamique de retrait rapide et importante du volume macroporeux, dans la phase de drainage seul, nous a poussés à réaliser des expériences complémentaires au rétractomètre afin de mieux comprendre les mécanismes de cette évolution. Avant de réaliser ces essais complémentaires, différents éléments méthodologiques ont été testés pour évaluer s'ils pouvaient être incriminés dans cette évolution.

- Au lieu de seuiller la macroporosité par la méthode classique, de -1024 UH à la moitié du pic de la matrice (pic variable en fonction du temps), nous avons (1) utilisé une valeur unique de seuil de 500 UH pour la borne supérieure et (2) nous avons seuillé uniquement les macropores remplis par de l'eau ou de l'air (seuillage entre -1024 et 0 UH). La dynamique d'évolution du volume macroporeux dans la zone de drainage a été la même. (voir annexe 2).
- Les effets de bords ont également été testés. Le haut, le bas et les bords de la zone d'intérêt ont été supprimés (suppression de 5 mm d'épaisseur) pour créer une nouvelle zone d'intérêt plus étroite. Il a été calculé un indice de vide : soit le rapport entre le volume de macropores internes et le volume total réel ; le volume total réel étant le volume de « solide » auquel il est soustrait le volume des macropores connectés à la

bordure. Ce calcul réalisé à différents temps montre aussi la même dynamique (voir annexe 2).

A notre connaissance, aucun élément méthodologique, dans le traitement et l'analyse des images, ne permet d'expliquer la dynamique rapide de « réouverture » de la macroporosité, ressaut de macroporosité dans la phase de drainage. Des courbes de retrait au rétractomètre ont été réalisées afin de mieux caractériser la dynamique « d'ouverture et de fermeture » de la macroporosité dans la phase de drainage.

Le protocole classique du rétractomètre a été appliqué, c'est-à-dire un suivi de la teneur en eau gravimétrique et des variations volumiques pendant le séchage, depuis la saturation jusqu'à un état presque anhydre. Un protocole supplémentaire est utilisé pour mimer les essais d'infiltration réalisés sur les colonnes de sol passées au scanner médical : c'est-à-dire que les échantillons ont subi une première phase séchage d'environ 12h et puis une phase réhumectation par vaporisation manuelle durant 4 à 5h, ensuite le protocole classique de séchage complet a été repris.

Afin de pouvoir être comparées entre elles les données volumiques sont exprimées à partir des données issues du rétractomètre, par le rapport :

$$\frac{Volume\ spécifique\ air}{Volume\ spécifique\ sol} = \frac{volume\ spécifique\ sol - \omega - \frac{1}{\rho_s}}{\frac{volume\ corrigé}{masse_{105°C}}};$$

Où ρ_s est la densité réelle des solides [kg.m^{-3}] et ω est la teneur en eau gravimétrique [g.g^{-1}].

Les graphiques de la figure III – 14 a à c montrent l'évolution temporelle de ce rapport en fonction du temps pour les données mesurées au rétractomètre (*« nom du sol » porosity*) et pour les données mesurées au tomographe (*« nom du sol » macroporosity*).

La figure III – 14d, présente le ratio : $\frac{volume\ porosité\ T_{120} - volume\ porosité\ T_{90}}{volume\ échantillon}$, et les variations de porosité obtenues au rétractomètre sur une durée de 30 min correspondant à la durée du drainage seul suivi au scanner.

Les graphiques III – 14 a à c montrent bien une remontée du volume poreux dès l'arrêt de l'apport en eau. Cette évolution temporelle du rapport de volumes spécifiques mesuré au rétractomètre et celle obtenue à l'aide des données imageries sont similaires en forme et du même ordre de grandeur. Pour le sol Lysimètre, cependant les données d'imagerie montrent une dynamique différente en fonction de la teneur en eau.

L'origine de l'axe des abscisses est centrée sur le temps d'arrêt de l'apport d'eau dans les deux graphiques en regard. Avant l'arrêt de l'apport d'eau, le rapport des volumes spécifiques diminue, après l'arrêt de l'apport ce rapport augmente, et ce pour les deux données comparées. Durant la phase de drainage pur, les graphiques pour les images tomographiques montrent une dynamique beaucoup plus exponentielle que ce qui est obtenu dans le cas du rétractomètre.

Bien que du même ordre de grandeur, les valeurs du rapport sont plus grandes pour les mesures faites au rétractomètre (*porosity*) comparées aux données du tomographe (*macroporosity*) pour des variations prises en même temps (à 30 min après l'arrêt de l'apport d'eau). Cela peut s'expliquer par la résolution des images du scanner qui ne permet pas d'explorer l'entièreté du système poral de la colonne de sol du fait de l'artefact de remplissage partiel. Par conséquent, il n'est mesuré que la macroporosité la plus grande, alors que les

mesures faites au rétractomètre prennent en compte la porosité dans sa globalité. Par ailleurs, les teneurs en eau initiales des mesures faites du rétractomètre sont quasi identiques car ce sont des réplicas, alors que les trois courbes des mesures tomographiques sont des expériences faites à trois teneurs en eau initiales très différentes.

Le graphique figure III – 14d synthétise la variation du volume de porosité pendant la phase de drainage pur, fournie par les deux types de mesures (rétractomètre et tomographie). Les figurés pleins représentent les ratios issus de la mesure tomographique et les figurés vides ceux issus du rétractomètre. L'axe des abscisses indique la condition initiale. Sur ce graphique, les mesures réalisées aux trois teneurs en eau initiales sont comparées à celle obtenues au rétractomètre avec trois réplicas de même condition hydrique initiale.

Ce graphique montre que les taux de variations des mesures obtenues avec les deux techniques sont du même ordre de grandeur. Les taux de variations issus de la tomographie montrent une décroissance avec la teneur en eau initiale. Plus on s'éloigne de la capacité au champ et plus le ressaut de porosité après l'arrêt de l'apport en eau est faible. Par ailleurs, la variabilité des données du rétractomètre (échantillons dans le même état hydrique initialement) est plus faible que l'amplitude des variations liées aux états hydriques différents des colonnes de sol pour Lysimètre et Collias ; la conclusion est inverse pour Verger.

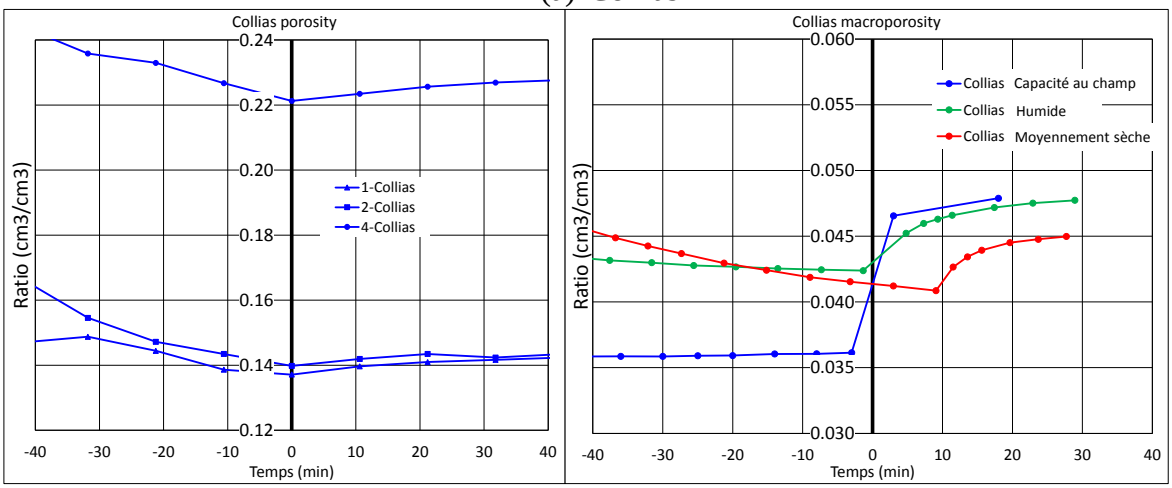
Ces mesures réalisées au rétractomètre montrent que le ressaut de macroporosité vue en tomographie RX après l'arrêt de la pluie n'est pas un artéfact d'observation ou de visualisation lié à l'outil utilisé ou à la méthode de segmentation mais bien une réalité du fonctionnement des échantillons de sols étudiés.

On peut aussi étudier les courbes de retrait « classique » et « en réhumectation » (évolution du volume spécifique de sol en fonction de la teneur en eau gravimétrique). La figure III – 15 montre toutes les courbes réalisées au rétractomètre, la courbe de saturation est ajoutée en noir (courbe linéaire oblique), les courbes classiques sont en bleu, gris et orange et les courbes « réhumectation » sont en noir, rouge et vert foncé. Les courbes présentent une anomalie autour de la zone très sèche (teneur en eau ~0,05 $g.g^{-1}$), c'est probablement lié à un problème non identifié dans l'appareil. Cependant, cette zone n'est pas prise en compte dans l'étude actuelle, car nous nous focalisons sur la première partie de la courbe (teneur en eau supérieure à 0,2 $g.g^{-1}$).

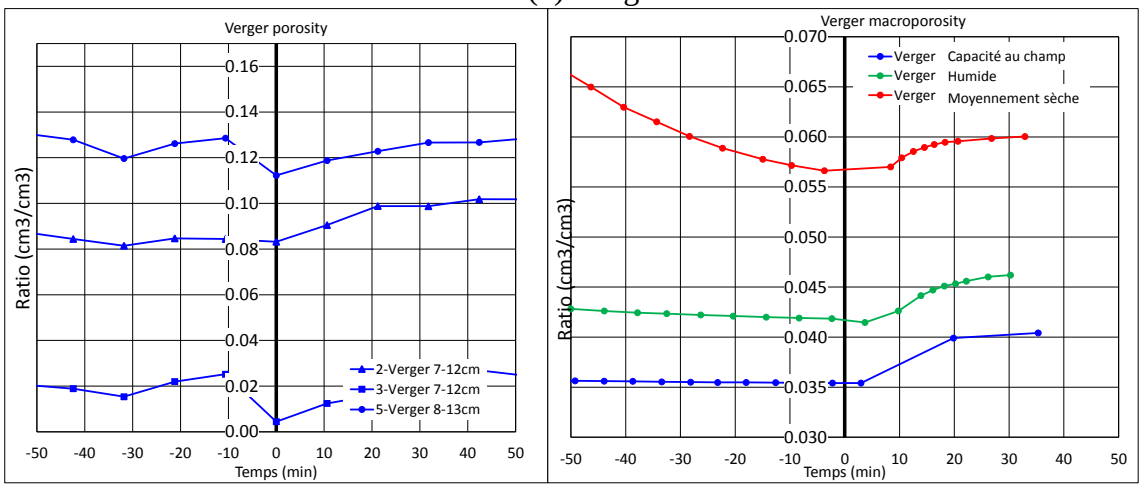
La saturation des échantillons est très inégale entre les réplicas. Les courbes « classiques » montrent que les sols présentent une partie de retrait structural très peu marqué, probablement dû à une saturation incomplète, cette phase est visible dans la partie supérieure de chaque courbe (teneur en eau maximale). La phase structurale est plus visible pour les courbes réalisées durant la réhumectation. Cela nous indique une part de retrait structural bien présent.

Figure III – 14 : (a-b-c) Evolution temporelle du ratio : volume spécifique d'air / volume spécifique de sol comparés au rapport : volume de macroporosité / volume de la colonne de sols pour les 3 réplicats passés au rétractomètre (teneur en eau initiale égale) **et pour les trois sols aux trois teneurs en eau initiales différentes.**
Temps négatif = phase d'humectation ; temps positif = phase de séchage.
(d) différence de volume de porosité (macroporosité) entre la fin du suivi (120min) et l'arrêt de la pluie rapporté au volume des échantillons.

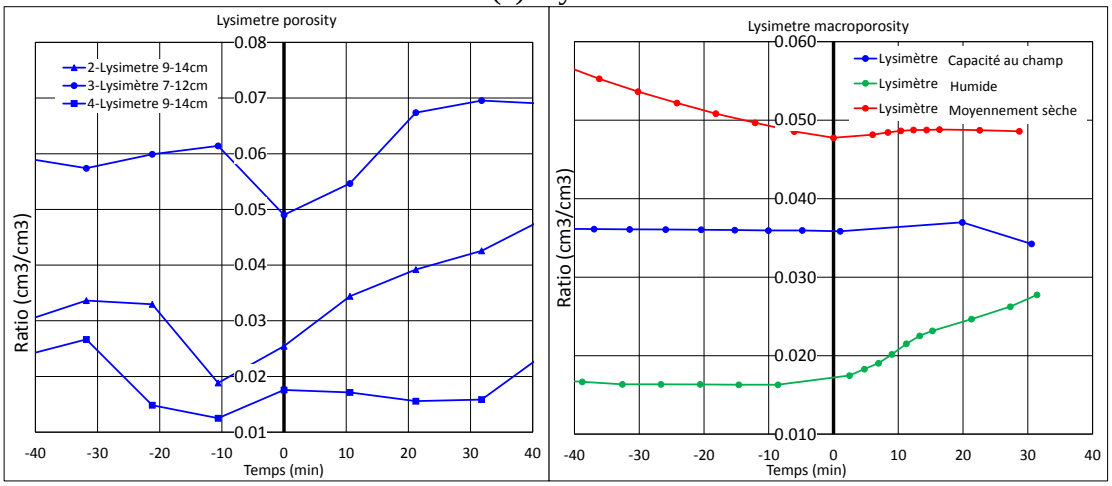
(a) Collias



(b) Verger



(c) Lysimètre



(d)

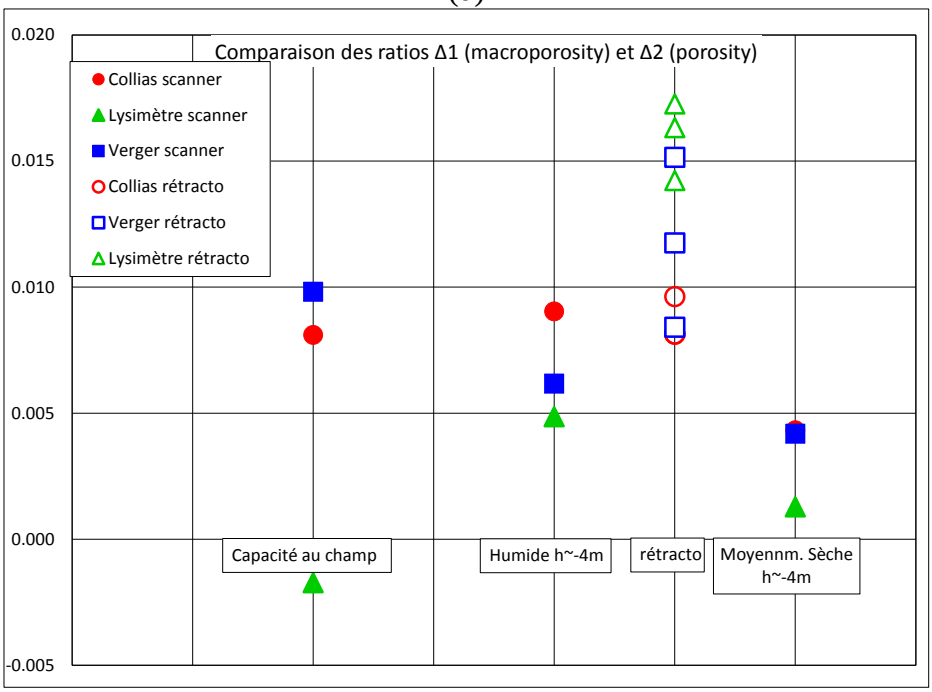
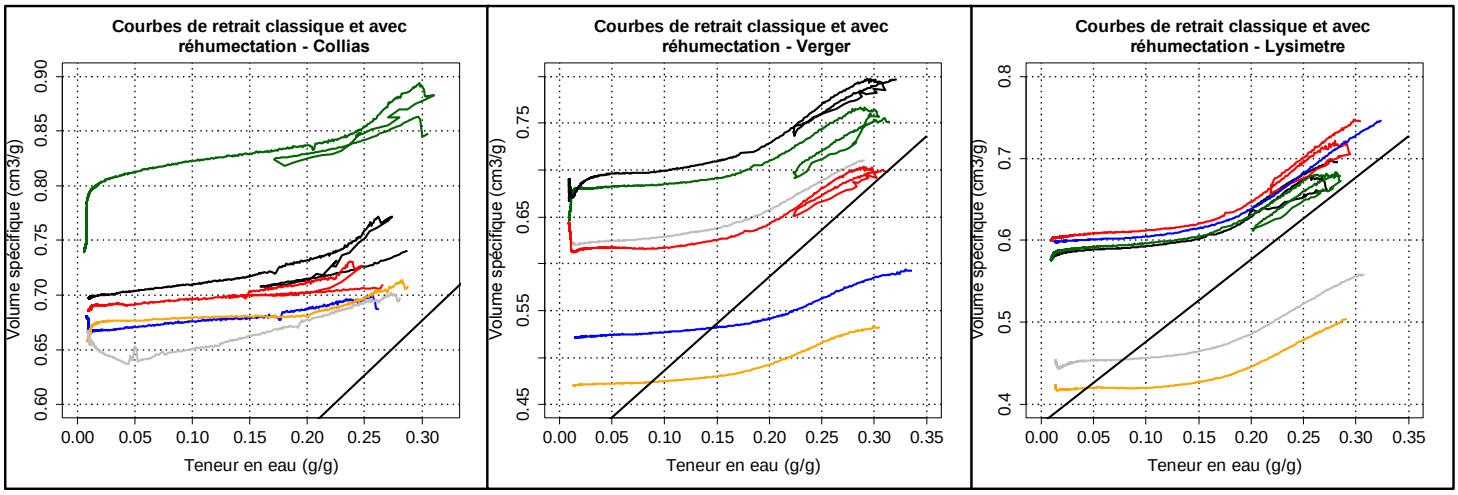


Figure III – 15 : Courbes de retrait « classique » (bleu, orange et gris) et « en réhumectation » (rouge, noir, vert foncé)



III.2.3. Mesure des paramètres images implémentés dans le terme d'échange du modèle d'écoulement couplé

Le terme empirique d'échange, qui relie le modèle d'écoulement rapide dans les macropores (KDW) et au fonctionnement hydrique de la matrice (Darcy-Richards), comprend plusieurs paramètres dont deux pouvant être déduits des images faites en tomographie.

Par exemple, la macroporosité ($\theta_{max-mac}$) qui intervient dans le taux de saturation des macropores, a été supposée comme pouvant être remplacée par le profil de la macroporosité percolante seuillée sur l'image acquise avant le début de l'infiltration (T_0), i.e. sur la structure initiale, et déjà discuté précédemment. Le terme d'échange comprend également un paramètre

dimensionnel (*d*) assimilé à une dimension caractéristique du milieu poreux, qui n'était initialement pas fixé mais servait de paramètre de calage.

Comme première approche, nous avons décidé de remplacer ce paramètre dimensionnel par la distance moyenne intermacropores. Si on considère une répartition homogène de la macroporosité, ce paramètre est inversement proportionnel à une densité de macropores, paramètre qui peut être estimée sur le terrain et qui reflète une dimension caractéristique du milieu poreux davantage en lien avec les écoulements préférentiels qu'une taille de grain ou d'agrégat. Cette distance peut être calculée grâce aux images de macroporosité selon une méthodologie mise en place dans ce travail de thèse (méthode de Voronoi voir § II.2.2.2.6). De plus, ce paramètre est en profil et implémenté tel quel dans le modèle afin de « remplacer » le paramètre global actuellement défini dans le terme d'échange du modèle Darcy-Richards – KDW couplé. Pour l'instant, il est calculé uniquement sur l'image de macroporosité percolante réalisée avant le début de l'infiltration (T_0) soit sur la structure initiale.

Les graphiques de la figure III – 16 (a, b et c) montrent l'évolution de la distance intermacropores (courbe lissée par une moyenne glissante sur 10 valeurs), sur la hauteur de l'échantillon, calculée pour chaque type de sol et à chaque teneur en eau initiale. Ce paramètre est aussi comparé selon la teneur en eau initiale et pour les trois sols (Figure III – 17 a, b et c).

D'un point de vue général, ce paramètre, qui est déterminé dans chaque coupe, est compris en 3 et 12 mm, quel que soit le sol et la teneur en eau, avec cependant deux zones de grande variabilité dans l'échantillon Lysimètre, entre 3 et 4 cm et 14 et 15 cm. Les trois échantillons montrent également une distance intermacropores plus faible proche de la surface ce qui est ce qui reflète une densité de macropores supérieure. Les profils pour les trois sols sont ensuite différents.

Dans le cas de Collias, les profils sont rectilignes sur pratiquement toute la hauteur de l'échantillon (de 2 à 12 cm) et ils sont quasi identiques quelle que soit la teneur en eau initiale, sauf exception pour l'état hydrique à capacité au champ, en bas de la colonne entre 10 et 14 cm de profondeur.

Dans le cas de Verger, les profils ont une évolution en « S », alternant des zones dans lesquelles la distance intermacropores est de l'ordre de 5 mm et d'autres dans lesquelles la distance intermacropores est deux plus grande : supérieure à 10 mm. En fonction de la teneur en eau, les courbes sont quasi confondues sauf entre 4 et 6 cm de profondeur pour la teneur en eau la plus basse.

Dans le cas de Lysimètre, les profils montrent des zones de similitude, en particulier pour les états hydriques humide et à capacité au champ. Le profil dans l'état hydrique moyennement sec est différent, en particulier les fluctuations entre 3 et 4 cm ne sont pas visibles. Les profils présentent des oscillations de quelques mm, et des écarts en bas de colonne d, et à une zone de macroporosité qui semble particulière entre 3 et 4 cm. Les profils en dehors de ces grandes fluctuations, sont assez constants sur la hauteur de la colonne Lysimètre avec une valeur centrée autour 1 cm.

Figure III – 16 : Profils de distance intermacropores selon les sols et en fonction des teneurs en eau initiales.

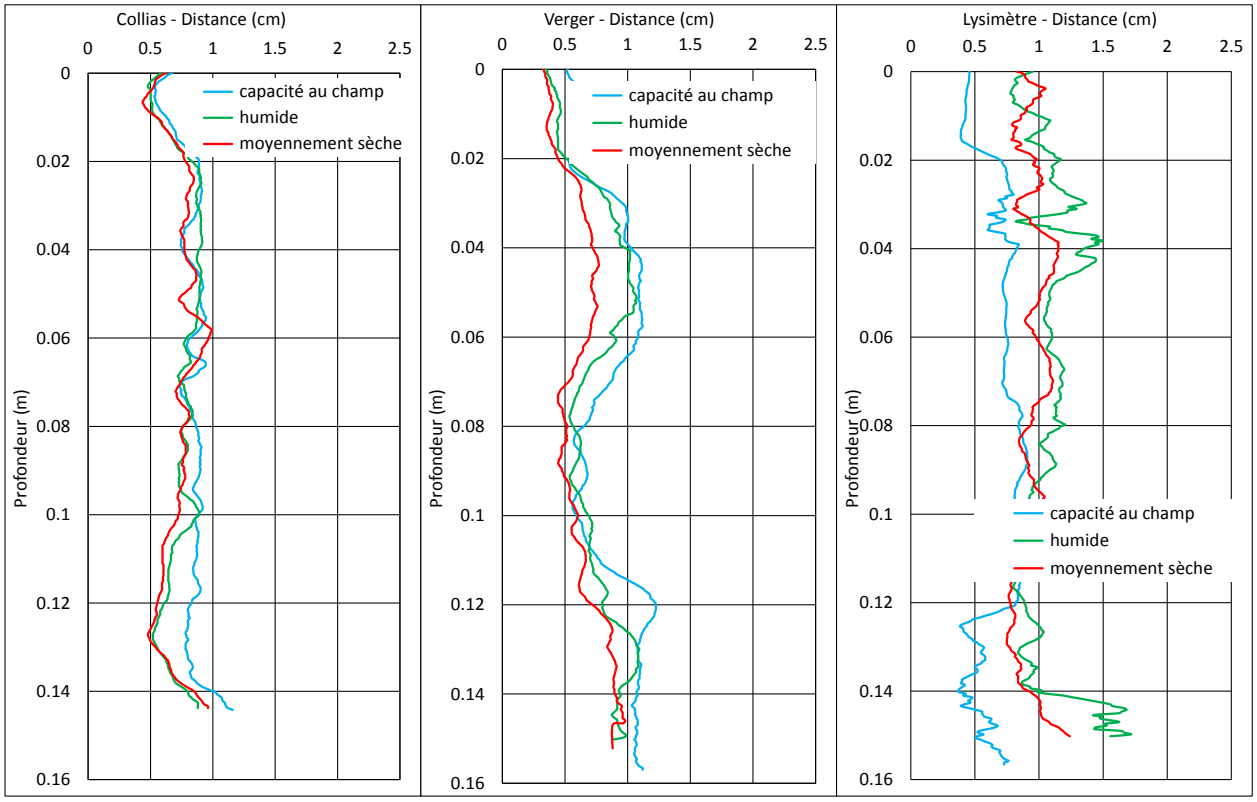
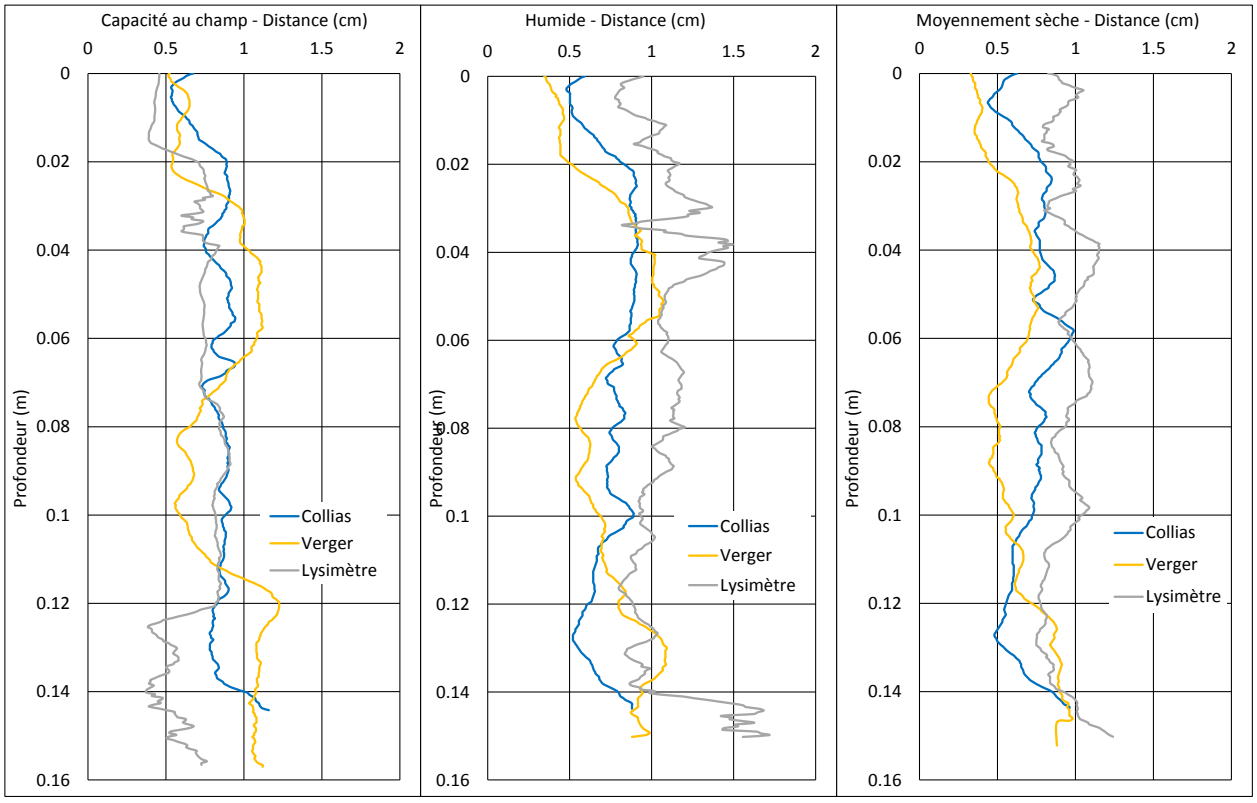


Figure III – 17 : Profils de distance intermacropores selon les teneurs en eau initiales et en fonction des sols.



III.2.4. Profils de marqueurs eau dans les macropores

Une partie de l'eau qui s'écoule dans les macropores du sol est détectable au scanner sur l'ensemble des images faites durant les expériences d'infiltrations – drainages. Ces marqueurs de l'écoulement appelés « voxels eau » ont été seuillés sur la base d'une loi de mélange et d'hypothèses de remplissage du voxel. Cette approche heuristique est basée sur une vision en analyse d'images de ce problème de partitionnement de voxels : si le voxel contient un volume d'eau d'au moins 50 %, il est affecté à la phase eau. Comme pour la macroporosité détectée sur ces images et la distance intermacropores calculée, les marqueurs eau sont présentés sous forme de profils. Les figures III – 18 a à i montrent l'ensemble des profils d'eaux détectées au scanner pour chaque acquisition durant la phase d'infiltration (0 à 90 min), et les figures III – 18 j à r présentent les profils d'eaux détectées sur chaque acquisition durant le drainage libre (91 à 120 min).

Le profil de macroporosité « percolante » (présenté précédemment) est également reporté avec les profils de voxels eau. L'abscisse en bas du graphique représente les marqueurs eau détectés, celle du haut en rouge correspond à l'abscisse de la macroporosité (**attention ces deux abscisses sont différentes).**

Les figures III – 18 a, d et g (la première colonne), montrent les profils de voxels eau pour Collias pour les teneurs en eau décroissantes ; les figures III – 18 b, e et h montrent ceux de Verger et les figures III – 18 c, f, i ceux de Lysimètre.

Pour chaque sol, les profils de macroporosité à des teneurs en eau initiales différentes ont des formes très similaires, comme il a déjà été montré auparavant. Par contre, les profils de répartition de l'eau d'infiltration, imagés par les voxels eau montrent des formes très variées, entre les sols ce qui était attendu. Mais ils sont également très différents pour le même sol pris à des teneurs en eau initiales différentes. Par exemple, Collias à capacité au champ montre un réservoir à la profondeur 7-10 cm qui n'apparait plus aux teneurs en eau plus basses. La quantité détectée de voxels eau est alors la plus importante, 6 % environ, idem pour Lysimètre à l'état hydrique initial humide. Les quantités de voxels eau détectées sont également plus importantes, quand la teneur en eau initiale baisse ce qui peut indiquer des processus d'écoulement, plus lents, contrôlés par les échanges avec la matrice de sol et de fait plus facilement capturés par le système d'imagerie.

A la teneur en eau à capacité au champ, les profils d'eau détectés atteignent rapidement un maximum « de détection » (profil maximum détecté fig. III – 18 a, b et c) ce qui est cohérent avec des échanges nuls ou très faibles avec la matrice de sol. Les quantités détectées sont également les plus faibles, mise à part dans le réservoir de Collias. Ces deux remarques nous orientent vers un écoulement avec des processus rapides, plutôt sous la forme de films par opposition à des macropores saturés. Par ailleurs, un drainage rapide est mis en évidence avec des profils eau détectés à 120 min. presque nuls (fig. III – 18 j, k et l).

Pour les deux autres conditions hydriques initiales, les profils eau détectés durant l'infiltration montrent un étagement progressif jusqu'à la courbe maximale atteinte à 90 min. (environ), l'étagement est d'autant « plus marqué » que la teneur en eau initiale est basse (graphiques fig. III – 18 d à i) ce qui est cohérent avec une dynamique d'échange avec la matrice de sol. Durant la phase de drainage pur, pour ces deux conditions plus sèches, la « vidange » progressive des macropores est très partielle depuis le maximum atteint à 90 min jusqu'au

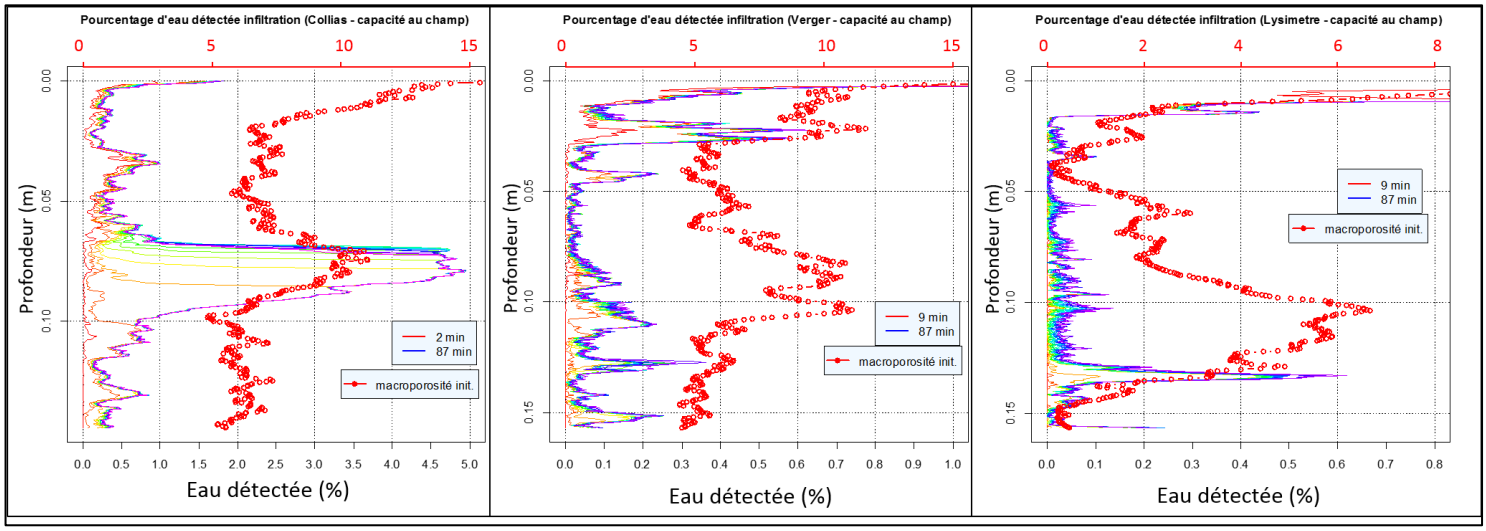
minimum mesurée à 120 min (l'arrêt de l'acquisition). Il reste encore des voxels eau détectés dans les colonnes, les quantités détectées sont proches de celles mesurées à 90 min.

En comparant les profils de macroporosité percolante aux profils de voxels eau détectés, on peut remarquer qu'ils sont relativement différents, en particulier en haut de colonne, et bien que certains pics de détection des voxels eau soient en correspondance avec des pics de macroporosité. On remarque cependant, la similarité des profils eau et macroporosité pour Verger en condition hydrique humide, ce qui indique un remplissage important de la macroporosité percolante durant l'évènement pluvieux.

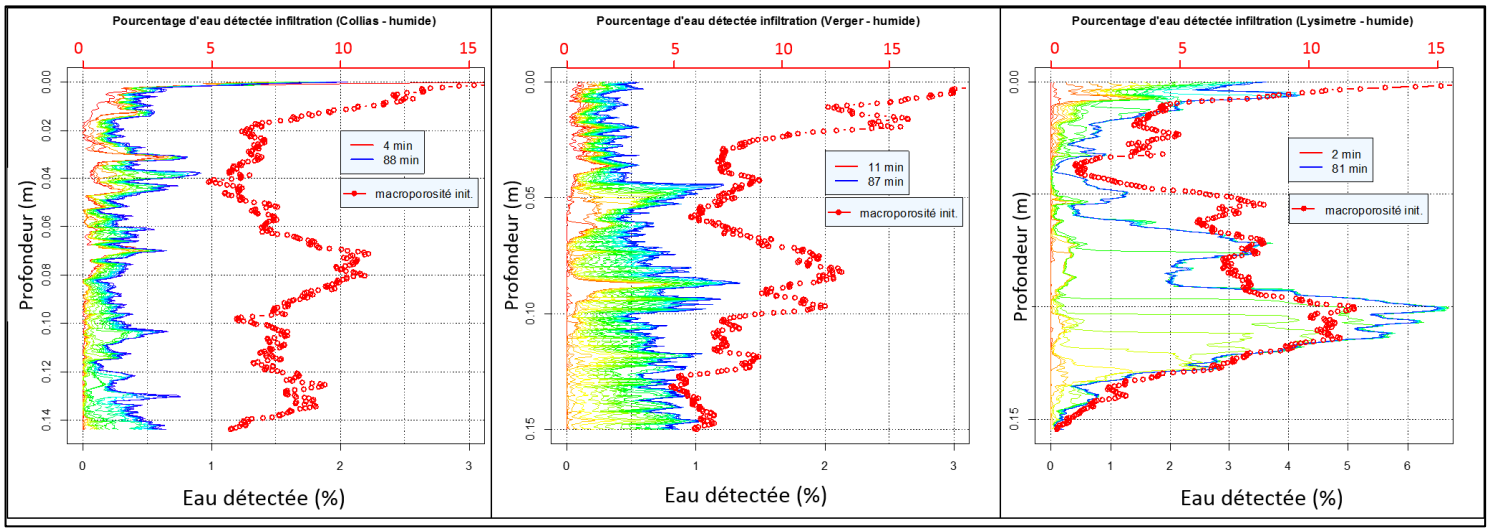
Il est à noter dans le cas des expériences faites en conditions à capacité au champ que peu d'images ont été réalisées durant la phase de drainage, entre 1 à 3 images ont été faites, ce qui peut expliquer la différence de graphiques entre cette condition et les deux autres plus sèches.

Figure III – 18 : Profils de pourcentage d'eau détectée dans les colonnes de sol pendant l'infiltration, selon les trois teneurs en eau initiales (capacité au champ : a, b et c ; humide : d, e et f ; moy. sec : g, h et i**).** L'ordonnée horizontale haute est le pourcentage de macroporosité (en rouge)

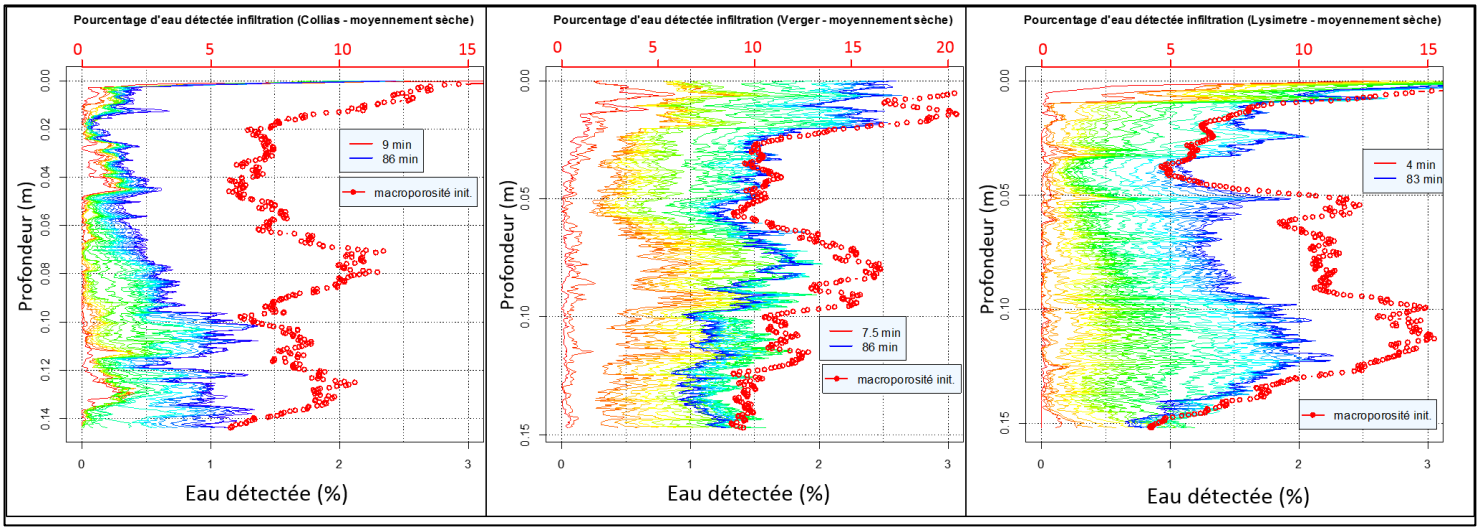
(a) (b) (c)



(d) (e) (f)

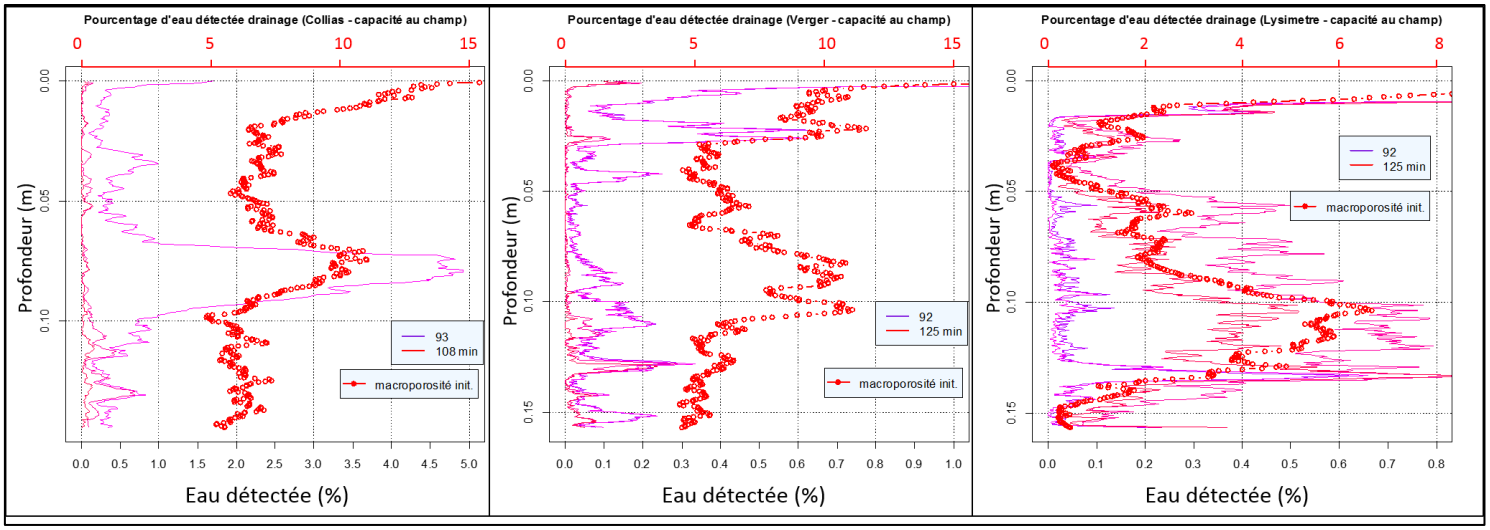


(g) (h) (i)

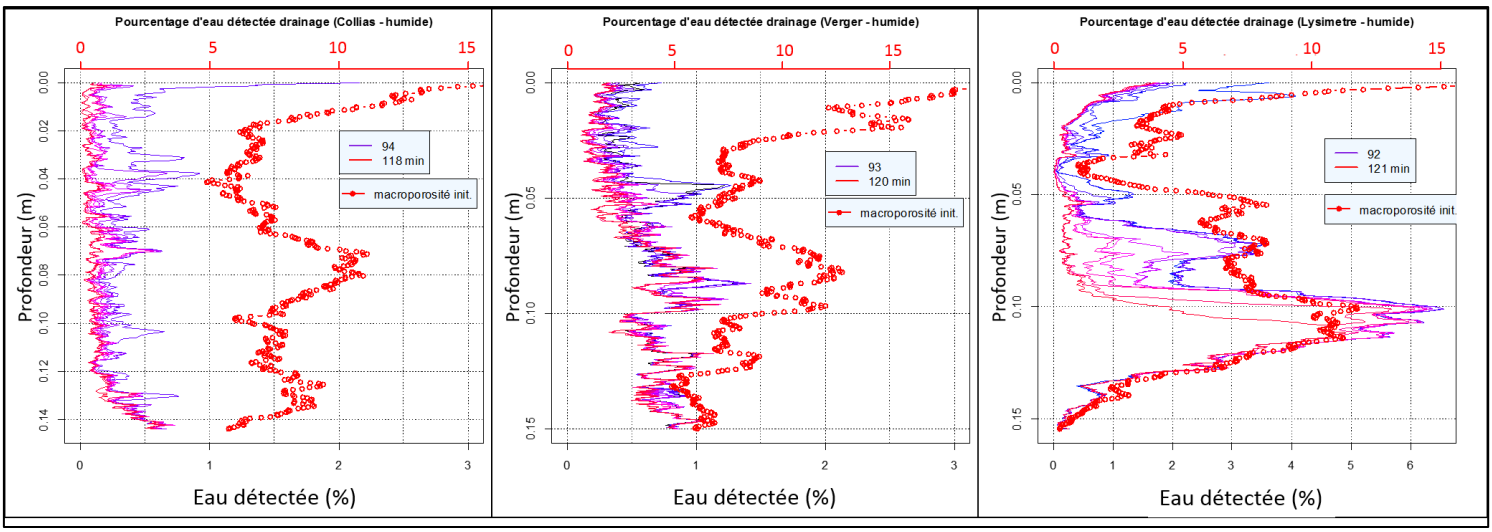


Profils de pourcentage d'eau détectée dans les colonnes de sol pendant le drainage et selon les trois teneurs en eau initiales (capacité au champ : j, k et l ; humide : m, n et o ; moy. sec : p, q et r)**.**

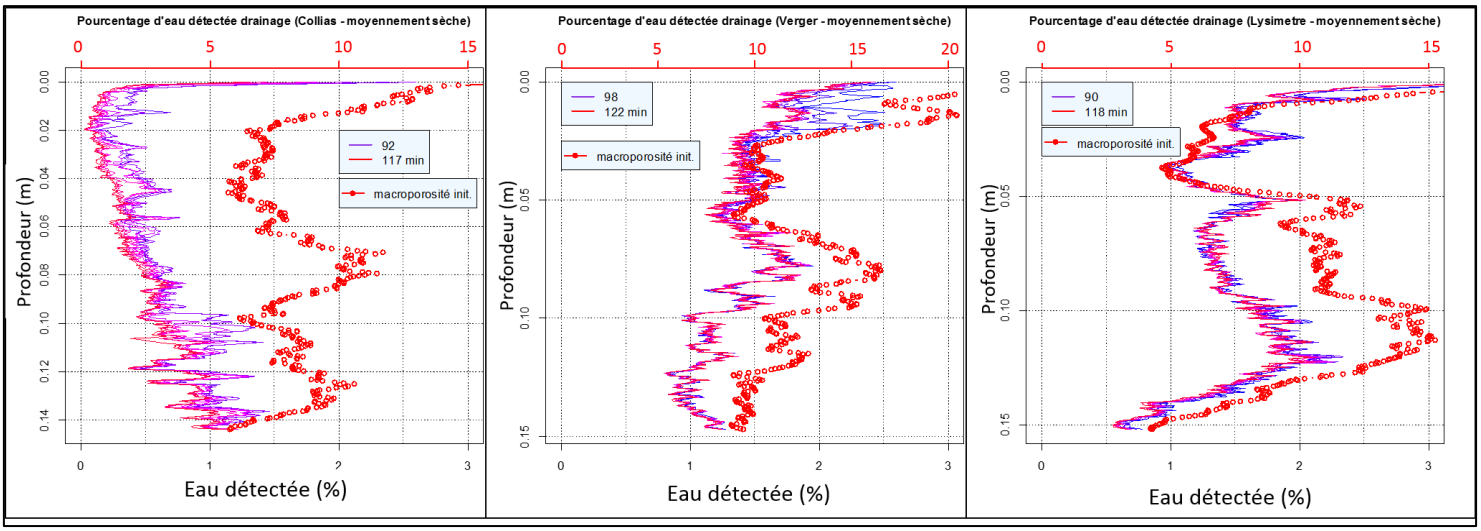
(j) (k) (l)



(m) (n) (o)



(p) (q) (r)



En résumé, ces résultats ont permis l'étude globale et selon la profondeur de la macroporosité aussi bien (a) la macroporosité initiale à trois teneurs en eau différentes sur trois sols différents, que (b) que l'évolution de la macroporosité pour ces mêmes sols et mêmes conditions initiales.

Tout d'abord, l'étude globale de la macroporosité initiale totale et percolante avec ou sans la bordure PVC considérée, a permis de mettre en évidence que :

- les volumes de sol échantillonnés sont au-dessus du seuil de percolation, i.e. les macroporosités imagées forment des réseaux macroporeux percolants incluant des macropores en bordure de l'échantillon ; avec dans le cas de Lysimètre la nécessité de passage le long de cette bordure ;
- la texture, la teneur en eau initiale et le travail du sol influencent le volume macroporeux qui augmente avec le séchage de la matrice. Le sol sableux a la macroporosité la plus importante et le sol argileux travaillé a la macroporosité la plus faible ;
- la texture influence l'évolution du volume macroporeux, les échantillons argileux présentent les évolutions les plus importantes quand la teneur en eau diminue alors que l'échantillon sableux est le plus stable dans les conditions investiguées ;
- la connectivité est une propriété complexe à caractériser et à analyser. Sa caractérisation via l'indice d'Euler oppose le nombre de macropores isolés au nombre de connexions redondantes entre ces macropores. Avec cet indice, la connectivité des sols est très dépendante de la présence de macropores structuraux, qui peuvent être présents en grand nombre par opposition aux biopores. Ainsi, nous montrons que Collias (texture sableuse) est l'échantillon dont la macroporosité est la moins connectée et Lysimètre (texture argileuse et sol travaillé) présente la macroporosité la plus connectée. Cet indice semble donc plus adapté à la caractérisation de la phase percolante ;
- les propriétés de connectivité des structures sont aussi influencées par la teneur en eau initiale. Ainsi Collias et Verger voient leurs structures percolantes plus connectées avec la chute de la teneur en eau initiale. Les sols structurés (non travaillés), Collias et Verger présentent les réseaux percolants les plus connexes.
- L'étude comparative des structures totales, percolantes avec ou sans prise en compte de la bordure PVC montre que seules les quantifications des paramètres globaux varient, ceci est aussi vrai pour la prise ne compte de la partie percolante ou totale de la macroporosité. Une exception concerne Lysimètre pour qui il est nécessaire de tenir compte de la bordure PVC afin de déterminer une macroporosité.

Ensuite, l'étude en profil de la macroporosité initiale montre que la teneur en eau initiale influence surtout les structures des sols argileux, ainsi les profils montrent qu'en séchant la macroporosité augmente avec un séchage modéré du sol. Mais ces profils montrent également la limite d'utiliser une valeur unique et globale de macroporosité d'un sol tant les variations sur la profondeur sont marquées.

Dans un second temps, nous avons caractérisés les variations des structures pendant l'infiltration – drainage, d'un point de vue global et profilé comme précédemment.

Les données temporelles globales montrent que :

- l'arrivée de l'eau dans les colonnes de sol a un impact sur la macroporosité en la réduisant quel que soit le type de sol ou la teneur en eau initiale.
- la variation de macroporosité est plus faible en condition à capacité au champ pour Collias et Lysimètre durant l'infiltration. Au contraire du ressaut de macroporosité constaté durant le drainage libre dans le cas des essais à la teneur en eau les plus sèches.
- la macroporosité percolante est celle présentant les variations les plus importantes indiquant que les processus locaux liés au passage de l'eau s'y déroulent principalement.
- En considérant la structure totale, les propriétés de connectivité diminuent pendant l'infiltration (perte de connectivité ou augmentation du nombre de macropores isolés) mais durant le drainage la connexion de la structure ré-augmente.

Une troisième observation est à faire concernant l'évolution conjointe de deux indicateurs de la structure : l'évolution du volume de macroporosité en fonction de la densité de macropores présents. Celle-ci parvient à discriminer simplement les structures échantillonnées quelle que soit la teneur en eau initiale. Ainsi les sols argileux montrent une évolution commune et se distinguent par la densité de macropores entre le sol travaillé et non travaillé. Le sol limono-sableux se distingue des deux autres échantillons par le nombre de macropores et surtout la dynamique d'évolution durant l'infiltration – drainage.

L'étude globale et en profils montre des phénomènes de variation rapide des structures macroporeuses qui n'ont pas pu être expliquées par des artéfacts du traitement d'image. La réalisation de courbes de retrait classique nous renseigne sur l'évolution générale des structures, et la courbe réalisée avec une phase de réhumectation permet de mieux comparer avec les données tomographiques et nous indique que les variations rapides observées au scanner médicales ne sont artéfactuelles mais représentent une réalité.

III.3. Résultat de la modélisation des expériences d'infiltrations – drainages

Cette partie présente les résultats obtenus pour l'analyse de sensibilité du modèle ainsi que pour les deux étapes d'estimation de paramètres pour simuler les expériences d'infiltration – drainage réalisées au scanner médical.

III.3.1. Analyse de sensibilité du modèle

Les analyses de sensibilité, quelle que soit la version du modèle : classique sans les données tomographiques (version 1) ou avec ces données (version 2), n'ont pu être réalisées pour la colonne Lysimètre à capacité au champ, car les calculs ont systématiquement été stoppés par des erreurs (voir IV.1). Les analyses de sensibilité réalisées pour l'ensemble des teneurs en eau initiales et des sols présentent les mêmes remarques quelques soit les valeurs de a testées dans son intervalle, c'est pourquoi il n'est présenté qu'un graphique par sol et par teneur en eau initiale dans la figure III – 19 a et c (voir annexe 4a, b et 5a, b pour d'autres valeurs de a).

Les résultats de l'analyse de sensibilité (FAST) sont les indices de contribution principaux (effets liés aux paramètres seuls) et totaux (effets liés aux paramètres comprenant les interactions avec les autres paramètres).

Les graphiques (fig. III – 19 a et c) montrent l'évolution des indices de contributions des paramètres au cours de la simulation (axe y gauche), ainsi que les courbes enveloppes du drainage calculé pour l'ensemble des tirages dans l'espace des paramètres (axe y droite en mm). La figure III – 19a est l'ensemble des graphiques pour les trois sols et les trois teneurs en eau initiales dans la version 1 du modèle, et la figure III – 19 c correspond aux graphiques pour la version 2 du modèle. Pour un paramètre donné, les courbes en traits pleins continus correspondent à l'indice total, les courbes avec un symbole circulaire et des traits pointillés correspondent à l'indice principal, la distance entre ces 2 courbes correspond à l'effet des interactions entre le paramètre considéré et l'ensemble des autres paramètres. Pour les deux versions du modèle, les graphiques de contributions montrent la même organisation en deux phases : (1) avant l'amorce du drainage, (2) pendant l'infiltration – drainage et pendant le drainage seul.

Dans la version 1 du modèle (fig. III – 19a), les paramètres contributeurs varient selon la phase de la simulation et selon la condition initiale d'humidité :

- *Phase 1* : les paramètres b et $\theta_{max-mac}$ sont les principaux paramètres contributeurs à capacité au champ des sols Collias et Verger auquel il faut ajouter le paramètre de distance intermacropores. Dans les conditions humide et moyennement sèche, le paramètre *b* est le plus contributeur.
- *Phase 2* : le paramètre de distance intermacropores est le principal contributeur à la variance de la variable, avec une contribution décroissante du paramètre *b* en tout début de la phase 2. La contribution de la distance est de l'ordre de 70 à 90% à la variance totale.

Les interactions sont assez marquées mais tendent à diminuer durant la simulation.

Dans la version 2 du modèle (fig. III – 19c) les paramètres contributeurs sont différents selon la phase :

- *Phase 1* : les paramètres dominants sont *b* puis ν pour les deux sols Collias et Verger pour les trois conditions initiales. Le paramètre K_{sat-1} contribue également mais pour les conditions sèche et moyennement sèche seulement. La faible valeur des indices principaux de ces 3 paramètres que l'on peut observer sur les courbes montrent que ces paramètres interviennent au travers de leurs interactions mais peu de façon directe.
- *Phase 2* : la contribution totale des trois paramètres *b*, K_{sat-1} et ν diminue (la contribution du paramètre ν devient très vite proche de 0) et la nature de leur contribution varie : pour chaque paramètre, on observe que la valeur de l'indice principal se rapproche de la valeur de l'indice total, ce qui traduit la disparition des interactions entre paramètres. Dans le même temps, l'influence du paramètre K_{sat-2} augmente, là aussi essentiellement au travers d'effets directs et non d'interactions : en fin de simulation il devient le principal contributeur pour Verger (quelle que soit l'humidité initiale du sol) et pour Collias à condition initiale « humide ».

Pour le sol Lysimètre, les paramètres contributeurs sont différents, avec durant toute la simulation une variance influencée uniquement par le paramètre K_{sat-1}. De façon systématique

on remarque que les interactions entre paramètres sont plus faibles pour cette version 2 que dans la version 1 du modèle.

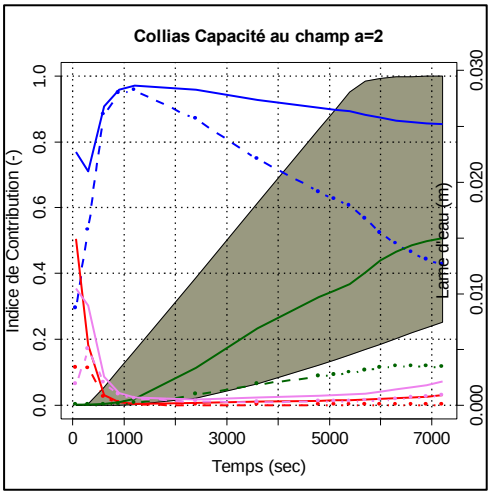
Dans les deux versions du modèle, certains paramètres testés n'ont pas d'influence sur la variance de la variable de sortie : le paramètre ν dans les deux versions du modèle (excepté dans la phase 1 mais qui correspond à une phase où la variance du drainage est très faible), $\theta_{max-mac}$ (version 1) ces paramètres ne contribuent pas à la variance du drainage. La variabilité de la variance du drainage cumulé selon les sols et humidités initiales peut être résumée dans le tableau suivant (tableau III – 8) et les graphiques (fig. III – 19 b et d) montrent l'évolution de la variance de la quantité d'eau drainée au cours de la simulation.

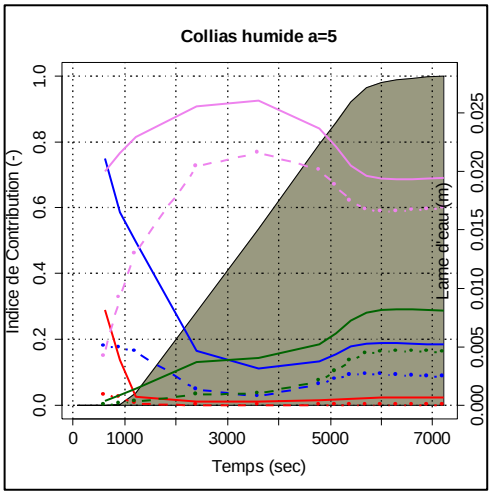
La variance est nulle au début (500 s ou 1100 s selon l'humidité initiale), puis augmente soit à un maximum avant de redescendre (Collias et Verger à capacité au champ et Lysimètre humide) soit atteint un plateau jusqu'à la fin (Collias et Verger en conditions humide et moyennement sèche et Lysimètre en condition moyennement sèche). Les premiers instants (jusqu'à 500 s pour la capacité au champ, jusqu'à 1000 s environ pour humide et moyennement sèche) correspondent au temps de percée du drainage : la valeur des paramètres joue peu sur le temps de percée et sur le début du drainage. Mais son impact augmente ensuite au cours du drainage (phases d'augmentation du drainage, de régime quasi permanent et de ressuyage). Pour la capacité au champ, la variance maximale est, en général, inférieure à la variance maximale pour les autres humidités initiales. A capacité au champ, la valeur des paramètres n'influence que le processus d'écoulement dans les macropores et peu les transferts dans la matrice : elle ne joue donc que sur un seul processus. Pour les autres humidités initiales, la valeur des paramètres peut également influencer les transferts dans la matrice en impactant le terme d'échange : les paramètres influencent deux processus ce qui génère une variabilité plus grande sur le flux de drainage que lorsqu'ils influencent un seul processus. Ces résultats se confirment pour la version 2 du modèle.

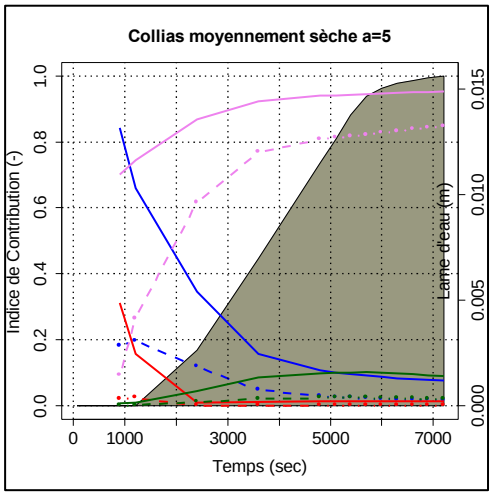
Figure III – 19a : Evolution temporelle des indices de contribution en fonction du sol et de la teneur en eau, avec la lame d'eau drainée (gris – ordonnée droite). Modèle version 1

Bleu : b ; rouge : ν ; vert : $\theta_{max-mac}$; rose : d ; trait plein = indice total ; trait pointillé = indice principal

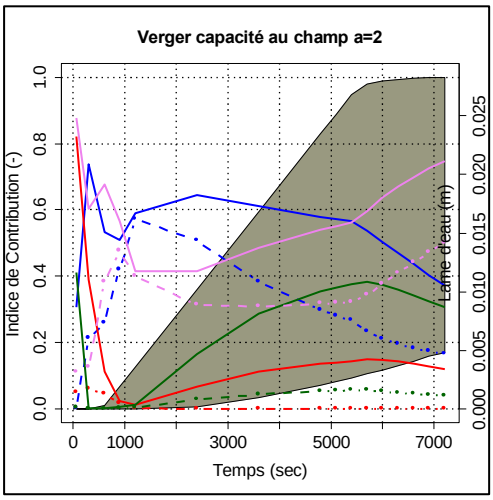
Collias

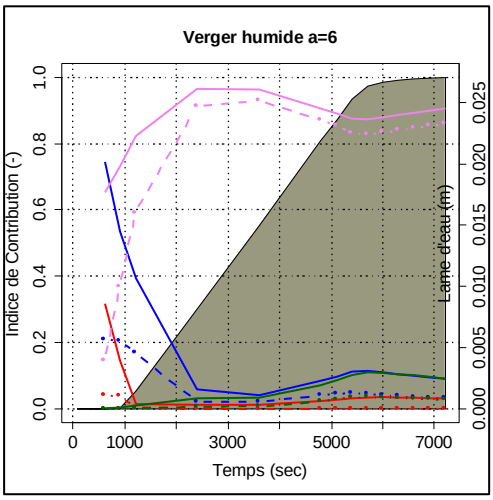


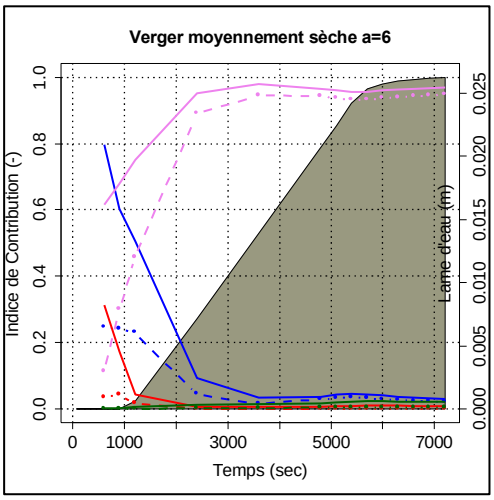




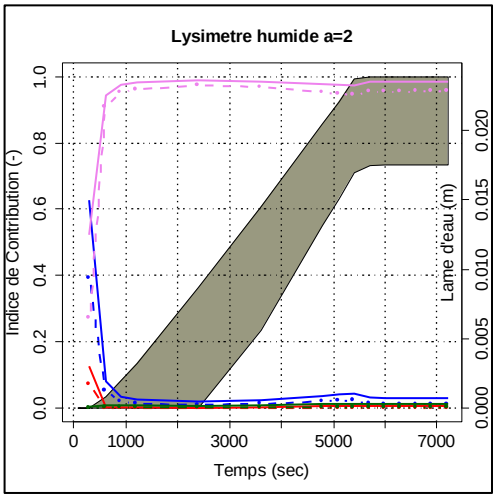
Verger







Lysimètre



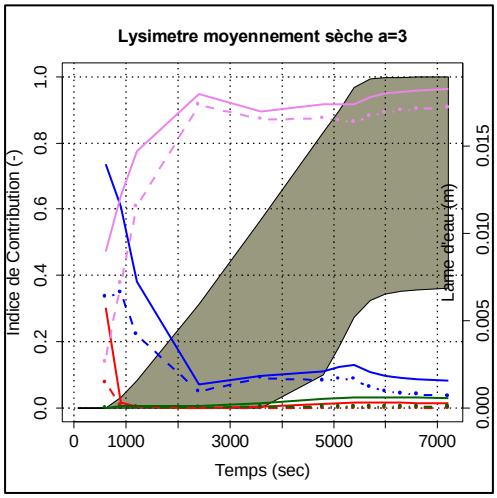
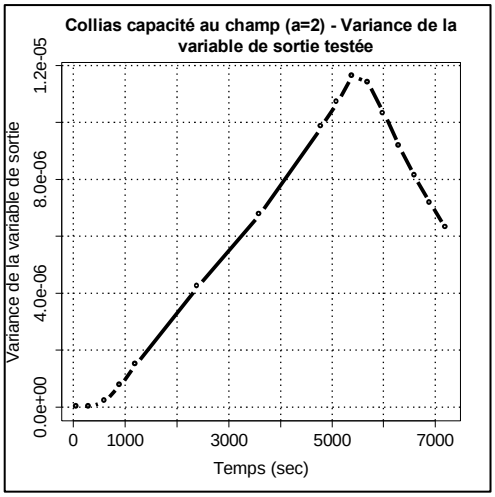
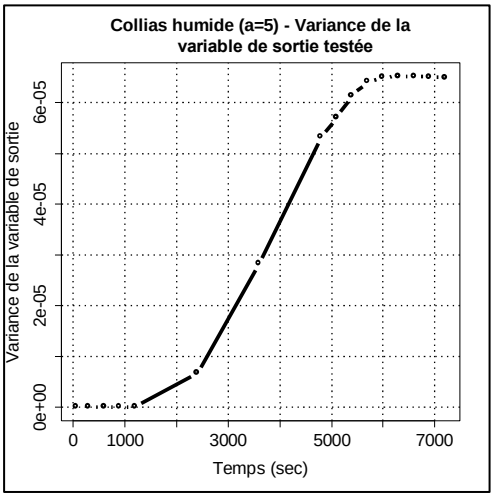
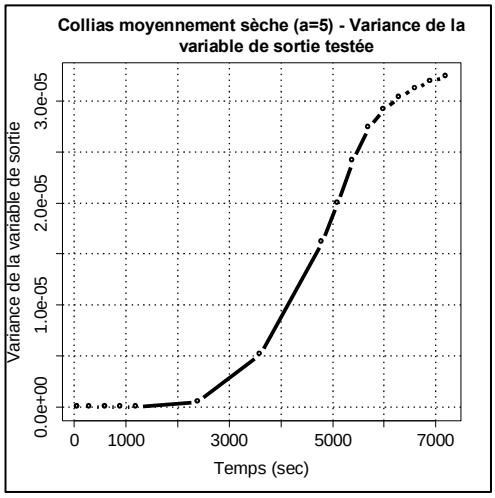


Figure III – 19b : Graphique évolution temporelle de la variance de la variable de sortie – Estimation paramètres KDW & terme échange modèle version 1.

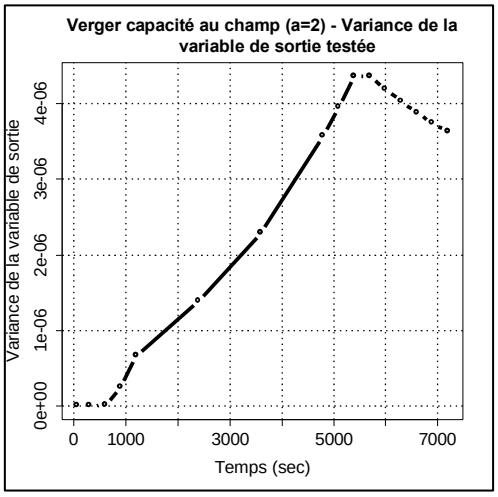
Collias

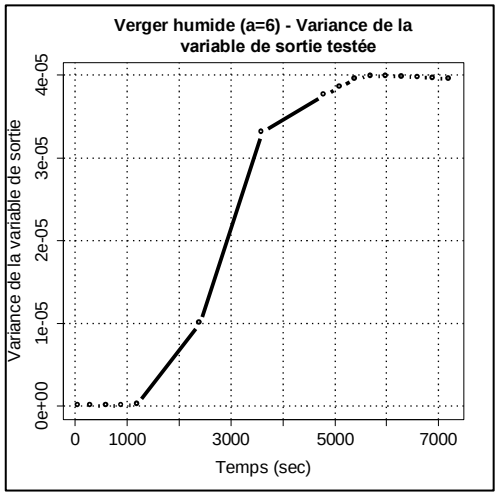


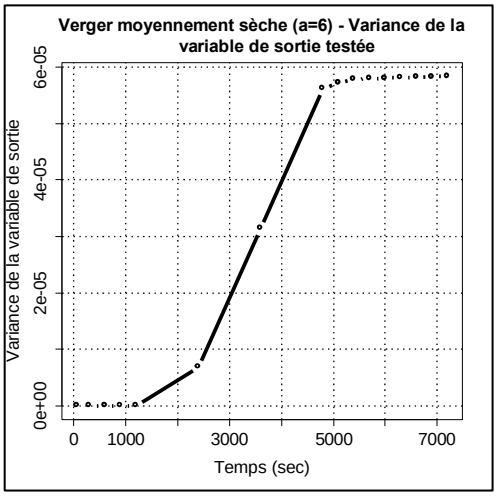




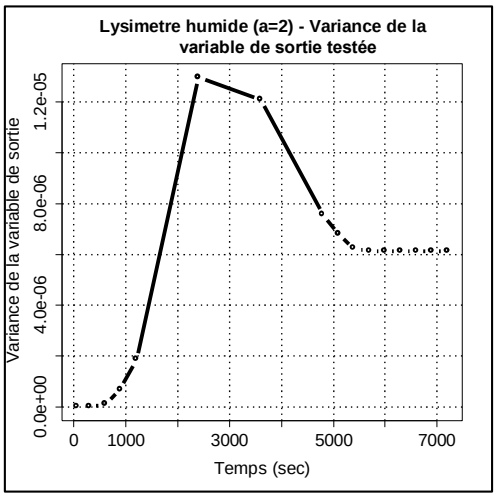
Verger







Lysimètre



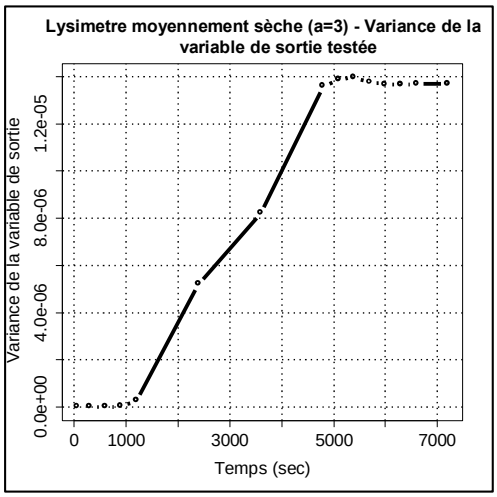
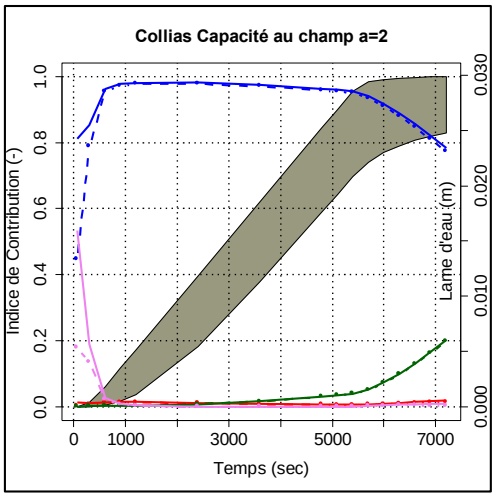
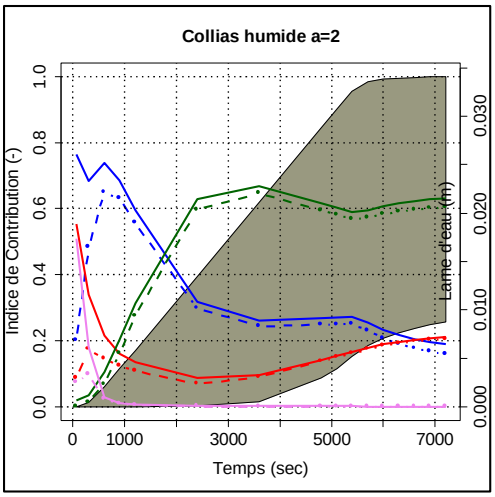
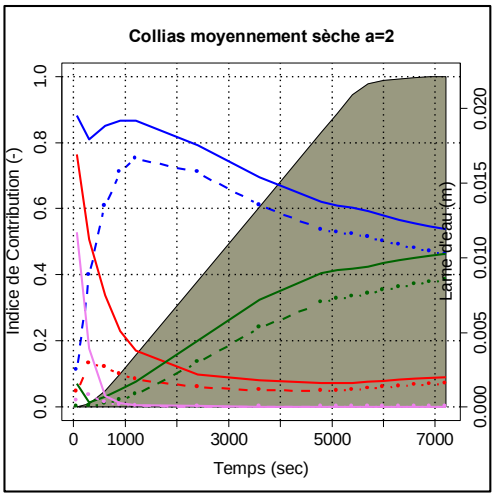


Figure III – 19c : Evolution temporelle des indices de contribution en fonction du sol et de la teneur en eau, avec la lame d'eau drainée (gris – ordonnée droite). Modèle version 2 Bleu : b ; rouge : K_{sat-1} ; vert : K_{sat-2} ; rose : ν trait plein = indice total ; trait pointillé = indice principal

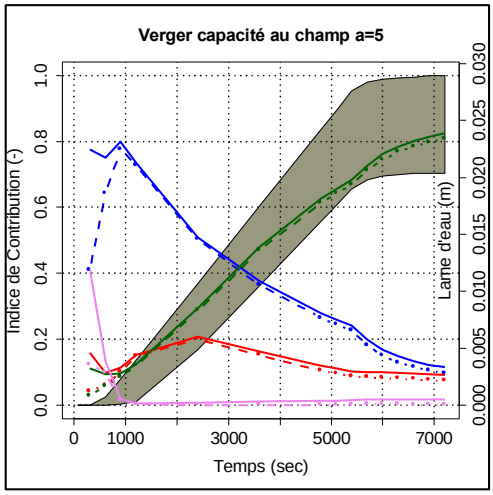
Collias

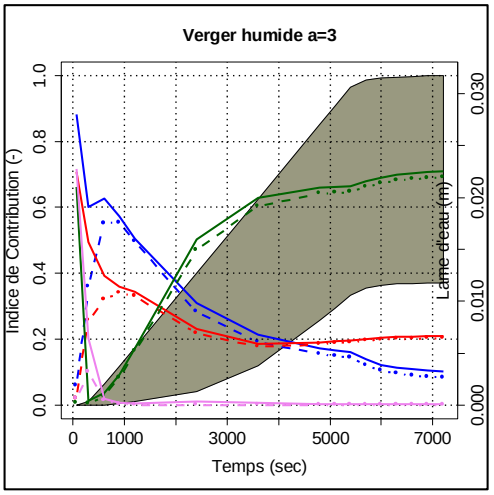


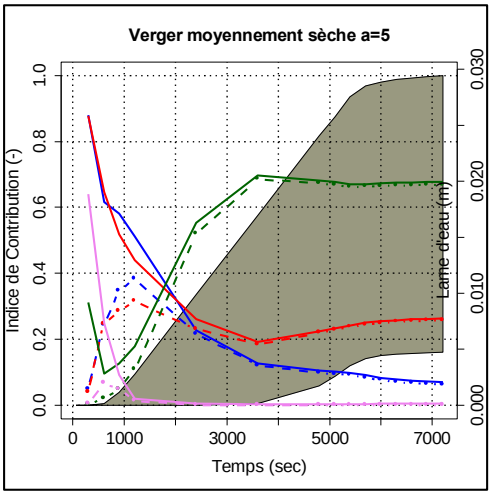




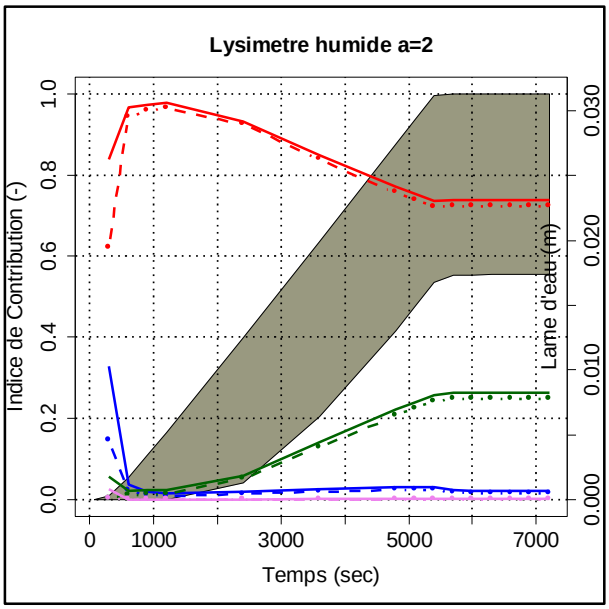
Verger







Lysimètre



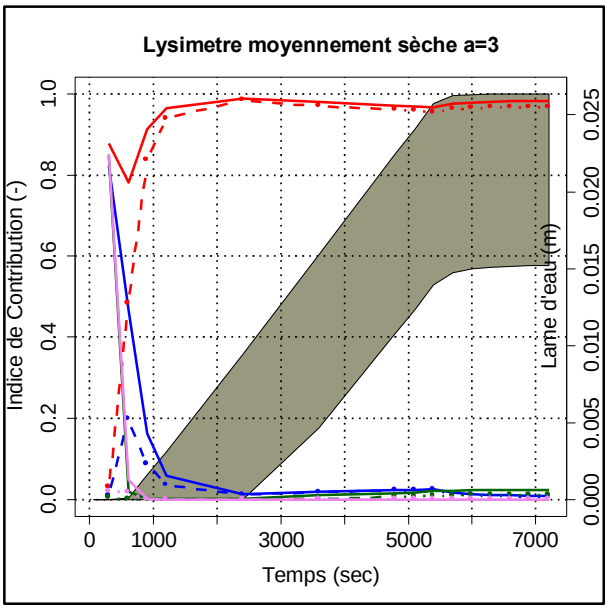
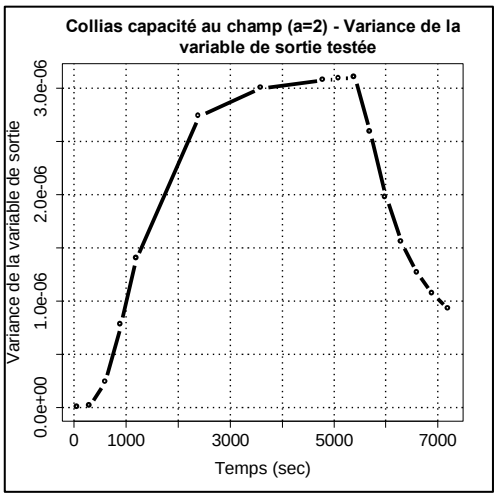
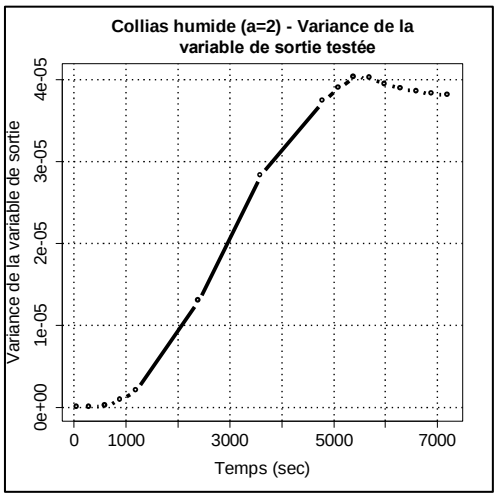
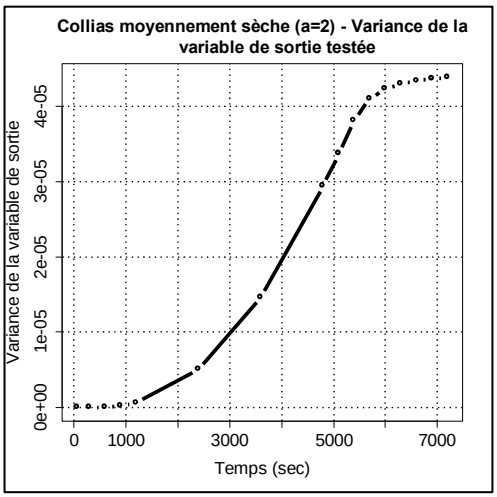


Figure III – 19d : Graphique évolution temporelle de la variance de la variable de sortie – Estimation paramètres KDW avec imagerie. Modèle version 2

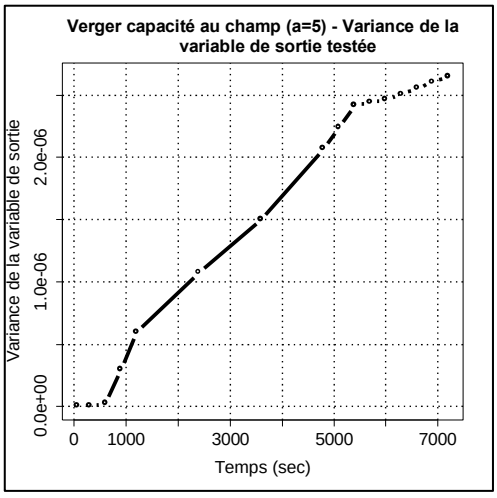
Collias

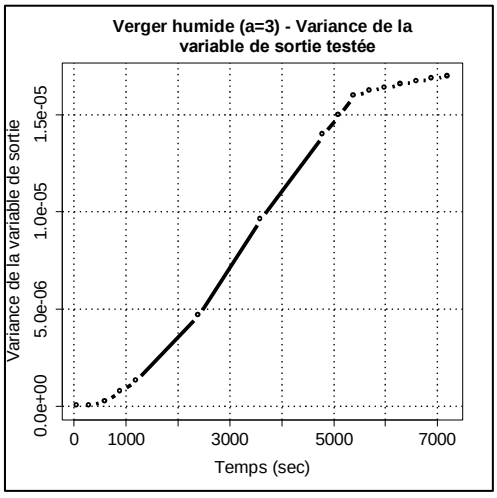


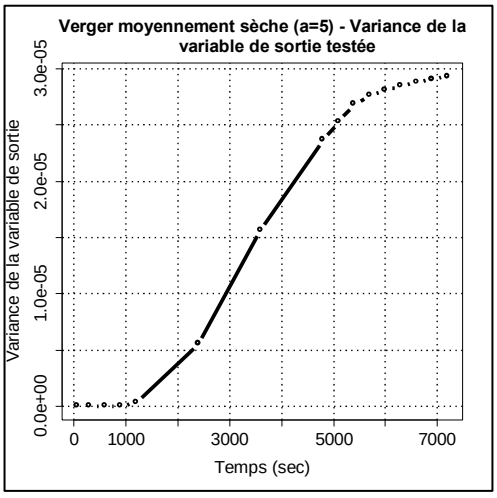




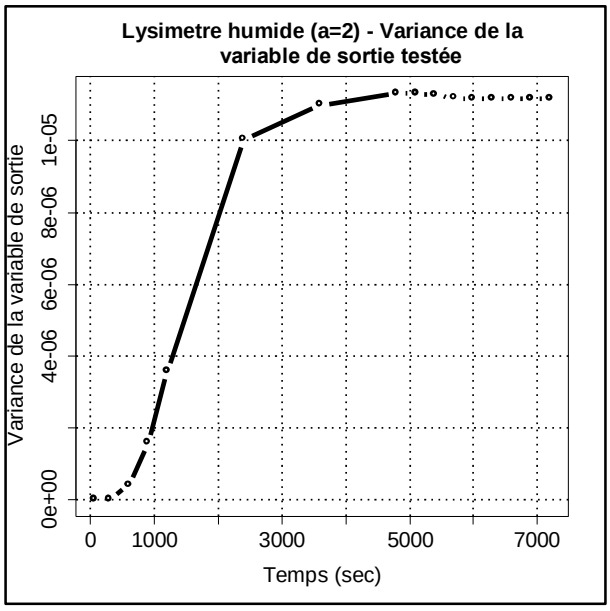
Verger







Lysimètre



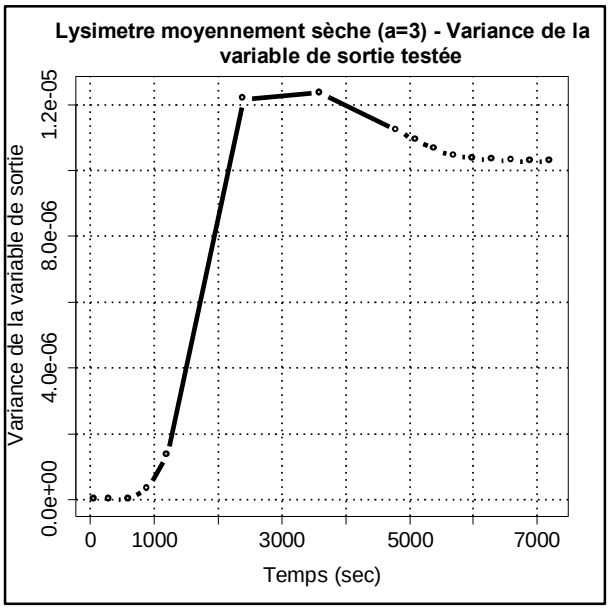


Tableau III – 8 : Forme de la courbe variance en fonction du temps pour les trois sols et trois teneurs en eau initiales.			
Sol	Capacité au champ	Humide	Moyennement sec
Collias	Avec un pic	En « S »	En « S »
	Variance max : $1{,}2.10^{-5}$	Variance max : 6.10^{-5}	Variance max : 3.10^{-5}
	Temps (Var max) : 5500 s	Temps (Var max) : 6000 s	Temps (Var max) : 7000 s (la fin)
	Temps début augmentation Var : 500 s	Temps début augmentation Var : 1100 s	Temps début augmentation Var : 2500s
	Temps début stabilisation Var : -	Temps début stabilisation Var : 5500 s	Temps début stabilisation Var : 6000 s
Verger	Avec un pic	En S	En S
	Variance max : $4{,}2.10^{-6}$	Variance max : 4.10^{-5}	Variance max : 6.10^{-5}
	Temps (Var max) : 5500s	Temps (Var max) : 5500s	Temps (Var max) : 5500s
	Temps début augmentation Var : 500s	Temps début augmentation Var : 1100s	Temps début augmentation Var : 2000s
	Temps début stabilisation Var : -	Temps début stabilisation Var : 4000s	Temps début stabilisation Var : 5000s
Lysimètre	*Non réalisé*	Avec un pic	En S
	Variance max : -	Variance max : $1{,}2.10^{-5}$	Variance max : $1{,}2.10^{-5}$
	Temps (Var max) : -	Temps (Var max) : 2000s	Temps (Var max) : 5500s
	Temps début augmentation Var : -	Temps début augmentation Var : 800s	Temps début augmentation Var : 1500s
	Temps début stabilisation Var : -	Temps début stabilisation Var : -	Temps début stabilisation Var : 5000s

Une autre façon de visualiser ces indices est en utilisant une représentation de type « bar plot » pour chaque indice, pour chaque temps de sortie demandé, pour chaque teneur en eau et pour les deux configurations du modèle. La zone noire indique la contribution totale et la zone grise indique la contribution de premier ordre (propre au paramètre sans interaction). Les graphiques « bar plot » montrent les mêmes remarques que les graphiques présentés précédemment, ils sont en annexes (annexe 6 a à f).

Les graphiques, figures III – 19 a à d, permettent de construire les tableaux III – 9a et III – 9b suivants qui synthétisent le ou paramètre(s) le ou les plus contributeur(s) pour chaque colonne, chaque condition initiale et les différentes « zones temporelles » de la simulation (avant la percée, régime transitoire, drainage seul). Pour chaque phase, un ou plusieurs paramètres peuvent être contributeurs ; ils sont donnés par ordre d'influence décroissante. Pour les deux versions du modèle à capacité au champ et pour tous les sols, le paramètre principal est b, ensuite les conductivités hydrauliques dans la version 2 du modèle et la distance ou la macroporosité dans la version 1 du modèle. En condition humide et moyennement sèche les paramètres dominants sont *b*, $K_{sat\text{-}1}$ et $K_{sat\text{-}2}$ (dominant dans Lysimètre) pour la version 2 du

modèle, et les paramètres *d* et *b* dans la version 1 du modèle. Et donc on doit pouvoir estimer *b* et *d* pour des valeurs de *a* fixées, en utilisant comme variable d'ajustement le drainage et en réalisant des expériences à teneur en eau initiale inférieure à la capacité au champ.

Tableau III – 9a : Paramètres contributeurs en fonction du temps à la variance de la variable de sortie – Modèle version 2

Sols	Phases de la simulation	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias	Avant percée	$b - \nu$	$b - \nu - K_{sat\text{-}1}$ & $K_{sat\text{-}2}$	$b - \nu - K_{sat\text{-}1}$ & $K_{sat\text{-}2}$
	Régime pseudo-stationnaire	b	$b - K_{sat\text{-}2} - K_{sat\text{-}1}$	$b - K_{sat\text{-}2} - K_{sat\text{-}1}$
	Drainage	$b - K_{sat\text{-}2}$	$K_{sat\text{-}2} - b = K_{sat\text{-}1}$	$b - K_{sat\text{-}2} - K_{sat\text{-}1}$
Verger	Avant percée	$b > \nu$	$b > \nu$	$b > \nu$
	Régime pseudo-stationnaire	$b - K_{sat\text{-}2}$ et $K_{sat\text{-}1}$	$b - K_{sat\text{-}2}$ et $K_{sat\text{-}1}$	$b - K_{sat\text{-}2} - K_{sat\text{-}1}$
	Drainage	$K_{sat\text{-}2} > b > K_{sat\text{-}1}$	$K_{sat\text{-}2} > b > K_{sat\text{-}1}$	$K_{sat\text{-}2} > b > K_{sat\text{-}1}$
Lysimètre	Avant percée	ND	$K_{sat\text{-}1} - b$	$K_{sat\text{-}1} - b$
	Régime pseudo-stationnaire		$K_{sat\text{-}1} > K_{sat\text{-}2}$	$K_{sat\text{-}1}$
	Drainage		$K_{sat\text{-}1} > K_{sat\text{-}2}$	$K_{sat\text{-}1}$

Tableau III – 9b : Paramètres contributeurs en fonction du temps à la variance de la variable de sortie – Modèle version 1.

Sols	Phases de la simulation	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias	Avant percée	b	$d - b$	$b - d$
	Régime pseudo-stationnaire	b	$d - b$	$d - b$
	Drainage	$b - \theta_{max-mac}$	d	d
Verger	Avant percée	$b - d$	$b - d$	$b - d$
	Régime pseudo-stationnaire	$b - d - \theta_{max-mac}$	d	d
	Drainage	$d - b - \theta_{max-mac}$	d	d
Lysimètre	Avant percée	ND	$b - d$	$d - b$
	Régime pseudo-stationnaire		d	$d - b$
	Drainage		d	d

En résumé, le but de l'analyse de sensibilité était de mieux comprendre le modèle dans son fonctionnement selon les paramètres testés, vis-à-vis d'une variable de sortie mesurée expérimentalement.

Pour cela nous avons étudié deux versions du modèle, qui prennent ou non en compte les données tomographiques en remplacement des paramètres globaux du terme d'échange. Nous avons vu que durant la simulation d'expérience, les paramètres influençant le drainage cumulé en bas de colonne était le paramètre b (deux versions du modèle), le paramètre d (version 1) et K_{sat-1} et K_{sat-2} (version 2). Les paramètres sont influents de façon variable dans le temps. Le paramètre b influence la variable de sortie, du début de l'infiltration jusqu'à la percée en bas de colonne. Dès que le drainage a débuté, ce sont les paramètres d et K_{sat-1} et/ou K_{sat-2} qui influencent le drainage en bas de colonne.

Les paramètres de la dispersion (v) et de la macroporosité ($\theta_{mac-max}$) ne montrent pas d'influence nette sur la variable testée durant l'intégralité des simulations. On note que les interactions entre paramètres sont beaucoup plus marquées lorsque les données tomographiques ne sont pas utilisées (version 1). Nous avons réalisé l'analyse de sensibilité à différentes valeurs de a fixées, les résultats ne montrent pas d'influence notable de a. Pour autant, l'analyse de sensibilité doit être réalisée aussi en faisant varier ce paramètre en même temps que tous les autres. Mais pour l'heure, au vu de la relation très forte entre a et b il n'était pas possible de réaliser correctement cette analyse dans de bonnes conditions.

III.3.2. Estimation des paramètres

Cette partie présente les résultats obtenus pour l'optimisation des paramètres dans les deux versions du modèle. Le but est de répondre aux deux questions suivantes :

- (1) Le modèle de transfert couplé est-il fonctionnel sur différents sols et à différentes teneur en eau initiales, et quelles sont ses limites (s'il y en a) ? ;
- (2) Les paramètres du terme d'échange (la distance caractéristique du milieu poreux, et la macroporosité) mesurables sur les images tomographiques et peuvent-ils être implémentés dans le modèle sous forme de profils de la distance moyenne intermacropores et du pourcentage de macropores actifs ?

L'algorithme d'estimation n'a pas convergé pour le Lysimètre à capacité au champ (voir IV.1).

III.3.2.1. Etape 1 : estimation à valeurs « a » fixes

Les graphiques des figures suivantes présentent l'évolution temporelle du drainage simulé à partir des estimations de paramètres pour chaque valeur de a (fig. III – 21), l'évolution temporelle du RMSE (fig. III – 22) et l'évolution du critère de Nash-Sutcliffe en fonction de la valeur de a (fig. III – 23). Ces graphiques ont été fait pour chaque sol et à chaque teneur en eau (figures III – 21 à III – 23), et pour les 2 versions du modèle (version 1 : figures III – 21a, III – 22a, III – 23a ; version 2 : figures III – 21b, III – 22b, III – 23b)

Les graphiques de la figure III – 21a et b montrent la reconstitution au cours du temps du drainage total simulé pour différentes valeurs de a. Les données simulées sont comparées à la courbe de drainage observé (courbe pleine bleu cyan) après l'ajustement des autres paramètres.

III.3.2.1.1. Version 1 du modèle (sans les données « images »)

***Reconstitution des données** (fig. III – 21a)* : On peut voir en général une très bonne reconstitution, en particulier pour les conditions à « capacité au champ » et « humide ». L'accord entre simulations et observations devient moins bon en condition « moyennement sèche ». Pour le Lysimètre c'est moins bon, surtout en conditions « humide » avec une forte sous-estimation du temps de percée et l'arrêt brutal du drainage après la pluie alors que les données expérimentales montrent une dynamique moins marquée. Pour le Lysimètre en condition « moyennement sèche » il y a sous-estimation systématique du drainage. En général on obtient une bonne reconstitution quelle que soit la valeur de a sauf pour Collias « moyennement sèche » où la qualité des ajustements dépend fortement de a.

***Valeur des erreurs** (fig. III – 22a)* : ces graphiques permettent de visualiser l'erreur de reconstitution du drainage au cours du temps. Cette évolution dépend plus de la colonne et de l'état initial que de la valeur de a : pour une expérience donnée, on a des évolutions similaires du RMSE en fonction du temps, quelle que soit la valeur de a, mais la forme de cette évolution dépend du sol et de l'état initial.

Si l'on compare « l'effet sol » à un état initial comparable (Verger et Collias à capacité au champ) on voit au début une forte augmentation de RMSE autour du temps de percée, puis une stabilisation (Collias) ou une augmentation (Verger) durant la phase principale de drainage, puis une augmentation (Collias) ou une forte diminution (Verger) après la fin de la pluie. A l'état hydrique initial « humide », on voit que le RMSE augmente jusqu'à la percée pour les trois sols, diminue durant la phase de drainage principal et augmente à nouveau durant la phase finale du drainage. A un état hydrique « moyennement sec », les trois sols montrent une augmentation du RMSE durant toute la durée de l'infiltration puis une faible diminution à l'arrêt d'apport d'eau. Et durant le drainage final, on voit à nouveau une augmentation.

Si l'on étudie « l'effet humidité initiale » pour un même sol aux trois teneurs en eau initiales, on voit, par exemple pour Verger, que le RMSE augmente jusqu'au temps de percée, reste constant, jusqu'à l'arrêt de l'apport d'eau à « capacité au champ », diminue en condition « « humide » et augmente en condition « moyennement sèche ». L'arrêt d'apport d'eau marque aussi une chute du RMSE et ensuite durant le drainage pur, le RMSE ré-augmente légèrement. Ces remarques sont aussi valables dans l'ensemble pour Collias, et Lysimètre (à l'exception de la condition « capacité au champ »).

Discussions sur les valeurs de RMSE en lien avec le drainage cumulé : En divisant les valeurs minimales et maximales finales (fin de simulation) du RMSE obtenue par la valeur du drainage observé final cumulé, il est possible d'exprimer les valeurs de RMSE en %. Dans les cas de Collias à « capacité au champ », la variation est entre 0-7%. Dans ce cas, les valeurs finales sont fortement dépendantes de la valeur de *a*, et on observe clairement une estimation optimale pour la valeur de *a* : *a=2*. En utilisant le même raisonnement pour les cas où l'intervalle $RMSE_{min}$ et $RMSE_{max}$ est très différent, une valeur de *a* se dégage pour fournir une estimation optimale. C'est ainsi que pour les sols et conditions initiales suivantes : Collias « moyennement sèche », Verger « humide », Verger « moyennement sèche », et Lysimètre « humide », nous avons les valeurs de *a* optimales suivantes : *a = 4*, *a = 5*, *a = 5*, *a = 2*. Dans le cas où les pourcentages $RMSE_{min}$ et $RMSE_{max}$ sont peu différents : 1 à 2% (cas de Collias « humide », Verger « capacité au champ » et Lysimètre « moyennement sèche »), les reconstitutions du drainage sont quasi identiques, les valeurs de *a* optimales sont déterminées visuellement sur les graphiques RMSE, et sont respectivement : *a = 4*, *a = 6*, *a = 2*.

Le critère de Nash *(fig. III – 23a) :* il confirme les résultats obtenus avec le RMSE. Pour Collias « capacité au champ » un optimum « significatif » pour *a = 2*, pour Collias « humide » de très bonnes reconstitutions (>0,999) et un optimum pour *a = 4*. Ainsi, ces deux critères permettent de définir les valeurs fixes de *a* optimales pour la reconstitution du drainage cumulé (résumé dans le tableau III – 10 ci-dessous), et de définir également l'intervalle resserré des valeurs de *a* pour la seconde étape d'estimation.

Tableau III – 10 : Résumé des valeurs fixes optimales du paramètre a, avec l'intervalle de recherche associé pour la 2nde étape d'estimation. (Version 1)			
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias	*a = 2 ; a = [2 ; 3]*	*a = 4 ; a = [3.5 ; 4.5]*	*a = 4 ; a = [3 ; 5]*
Verger	*a = 6 ; a = [5 ; 6]*	*a = 6 ; a = [5 ; 6]*	*a = 5 ; a = [5 ; 6]*
Lysimètre	*ND*	*a = 2 ; a = [1.5 ; 2]*	*a = 3 ; a = [2 ; 3]*

En résumé, globalement les estimations, sans les données des images, montrent une meilleure concordance visuelle avec le drainage observé dans les conditions initiales à capacité au champ et humide. Pour la teneur en eau initiale moyennement sèche, les concordances sont moins bonnes mais restent proches. En comparant les valeurs maximales du RMSE et du critère de Nash-Sutcliffe, les mêmes constatations sont faites, le RMSE maximum est entre 5.10^{-4} m et $1{,}5.10^{-3}$ m pour les colonnes Collias et Verger dans les deux conditions les plus humides. Dans la condition la plus sèche, les RMSE maxima sont entre 2 4.10^{-3} m, tout comme ce qui a été calculé pour la colonne Lysimètre dans les conditions « humide » et « moyennement sèche ». Le critère de Nash est aussi moins proche de 1 dans les conditions « moyennement sèche » (Collias – Verger – Lysimètre) et « humide » (Lysimètre). Les graphiques ci-dessous (fig. III – 24a) montrent l'évolution du critère de Nash-Sutcliffe en fonction des valeurs fixes de *a* et pour les trois teneurs en eau initiales. En dehors des valeurs très éloignées de 0,9 qui correspondent à des reconstitutions très éloignées de la courbe observée du drainage cumulé, on observe globalement que pour les trois le critère de Nash est plus éloigné de 1 lorsque la teneur en eau initiale est la plus éloignée de la capacité au champ.

Figure III – 21 a : Evolution temporelle du drainage cumulé simulés et observé (3 sols et 3 θ_{init}). Version 1

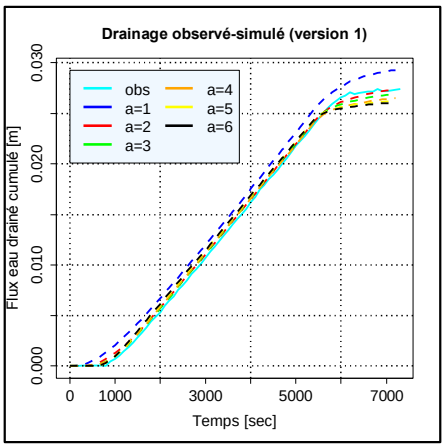
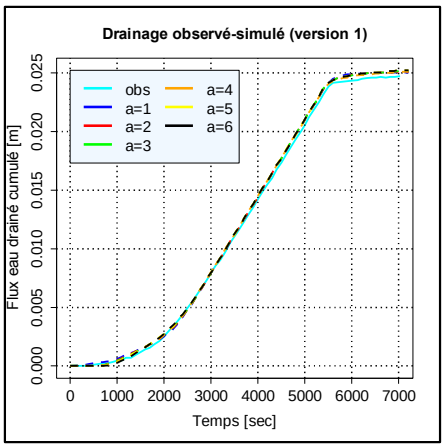
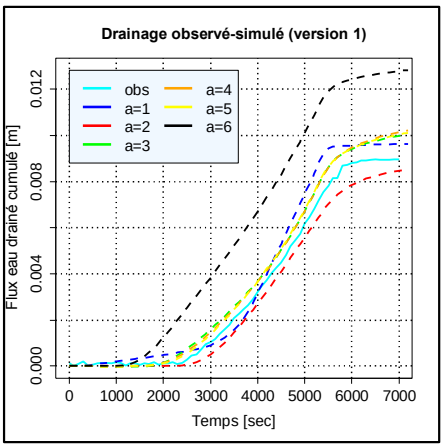
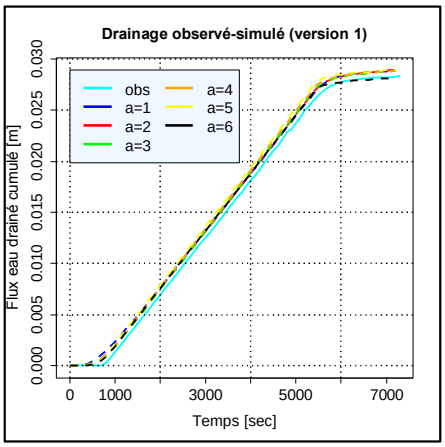
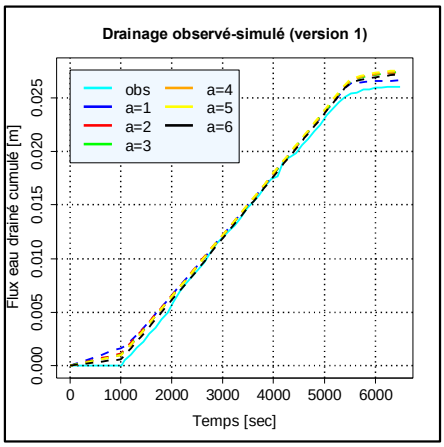
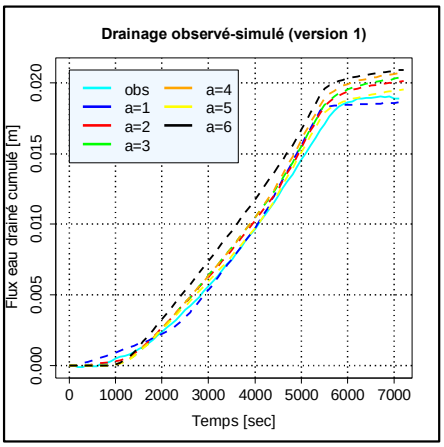
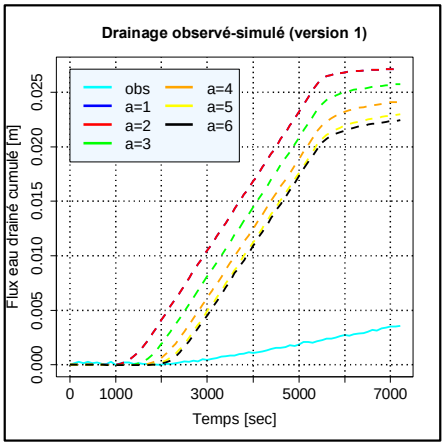
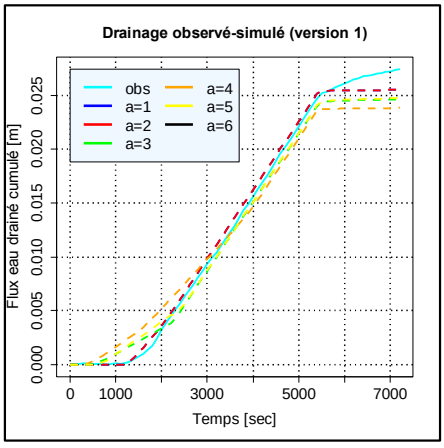
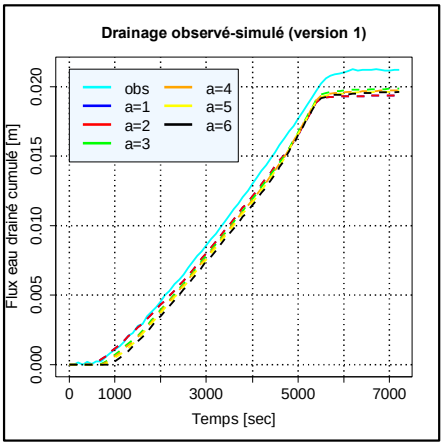
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre			

Figure III – 21 b: Evolution temporelle du drainage cumulé simulés et observé (3 sols et 3 θ_{init}). Version 2

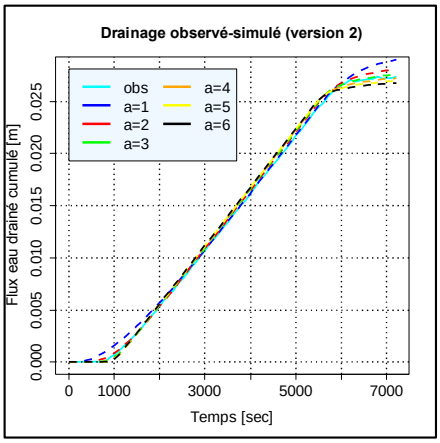
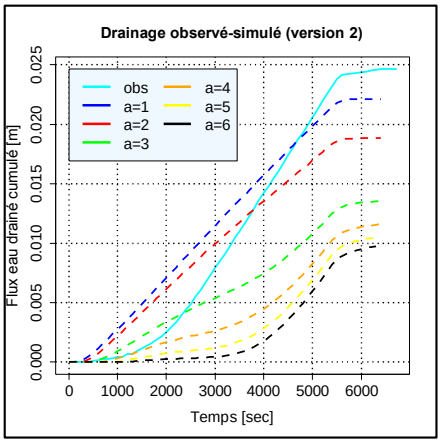
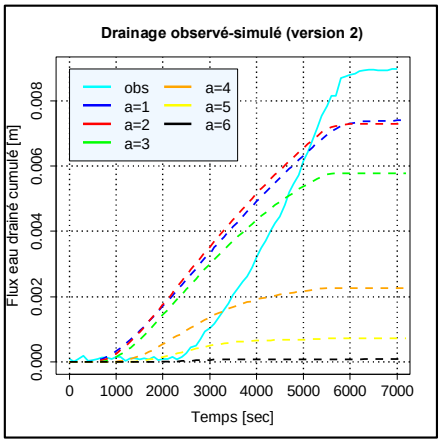
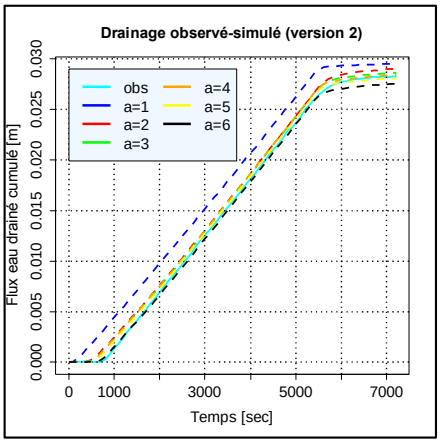
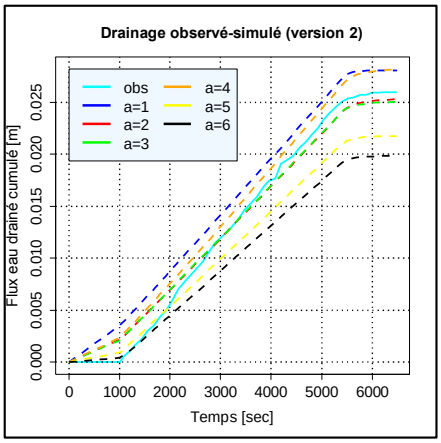
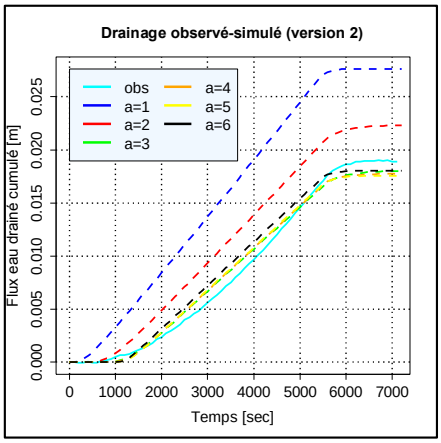
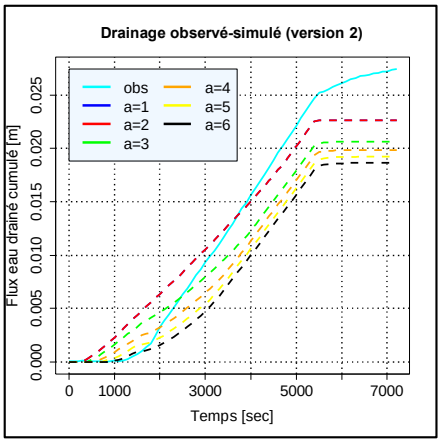
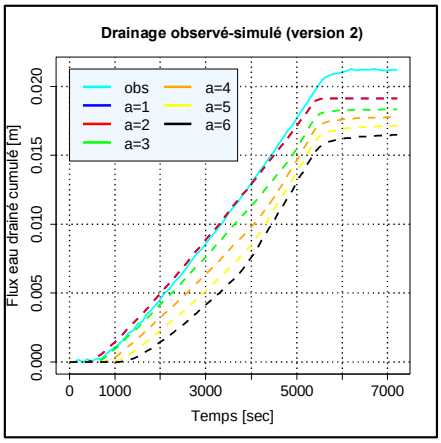
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		

Figure III – 22 a : Evolution temporelle du RMSE (3 sols et 3 θ_{init}). Version 1

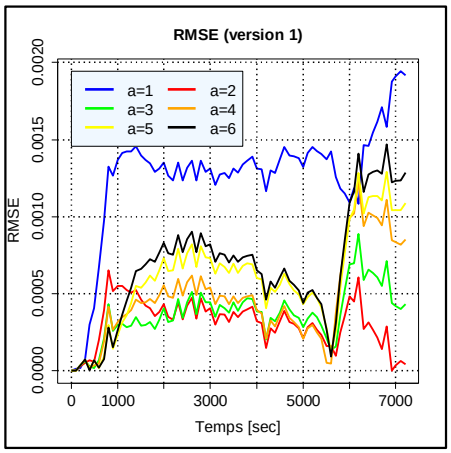
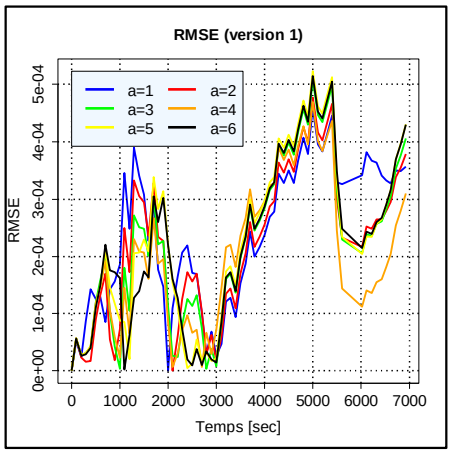
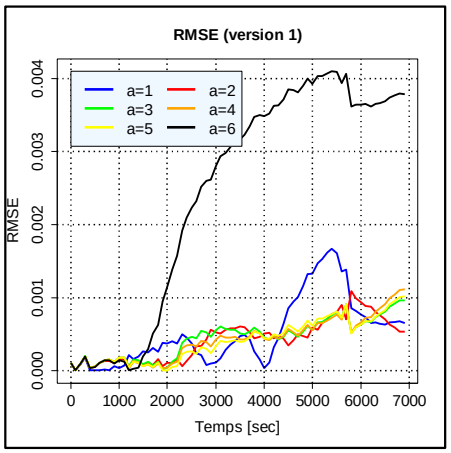
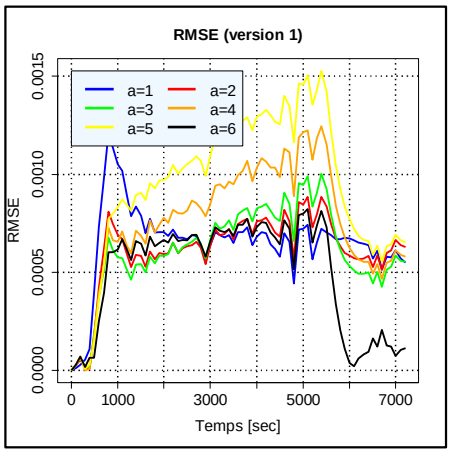
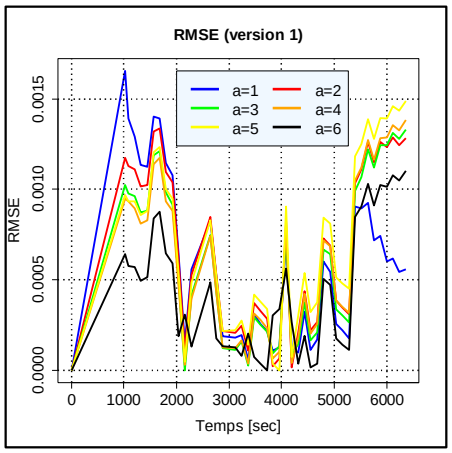
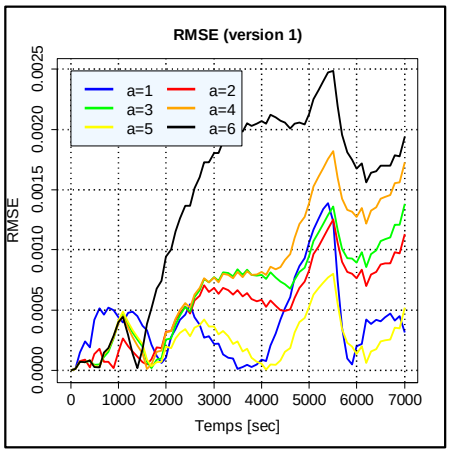
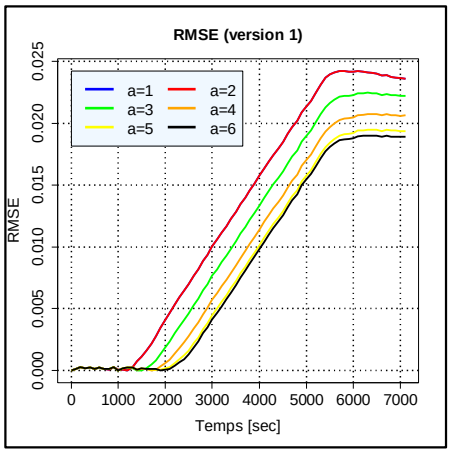
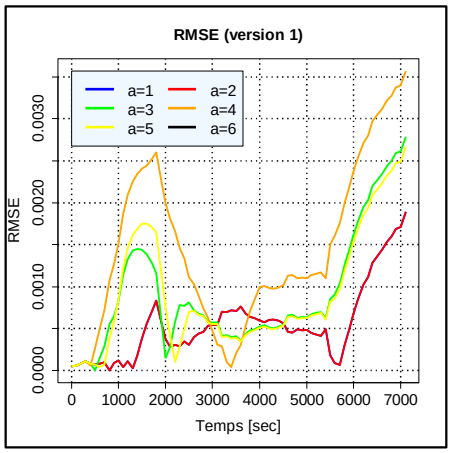
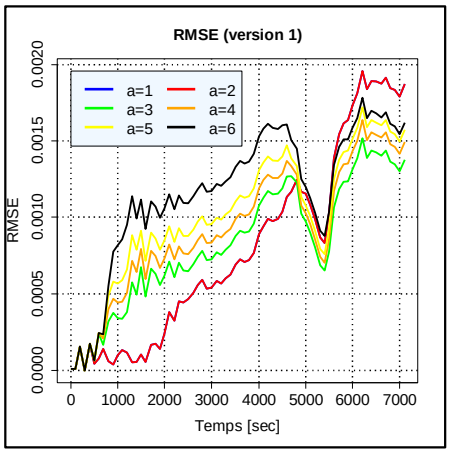
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre			

Figure III – 22 b : Evolution temporelle du RMSE (3 sols et 3 θ_{init}). Version 2

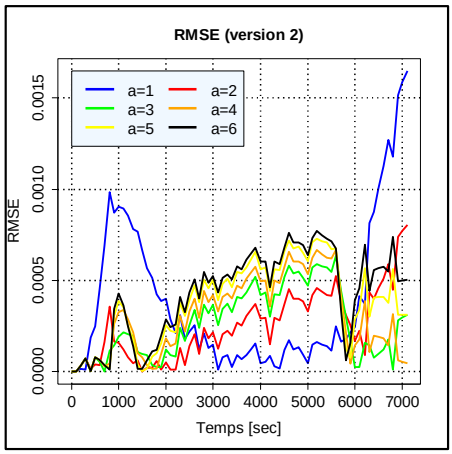
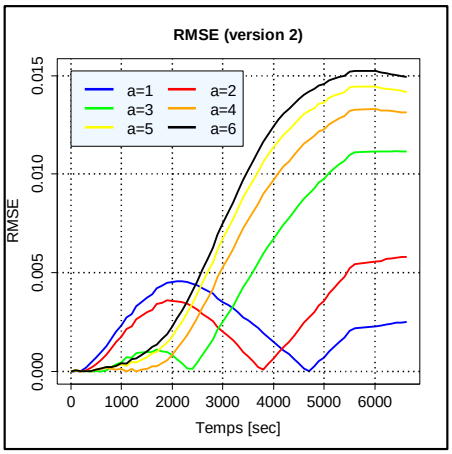
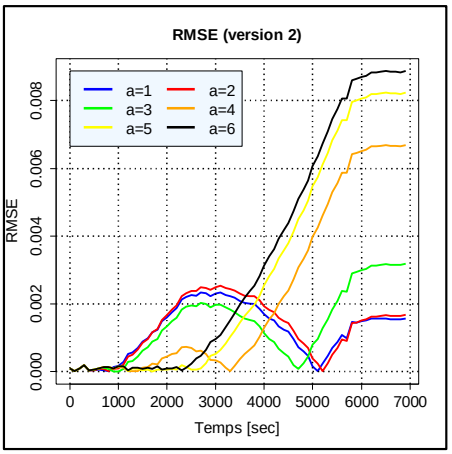
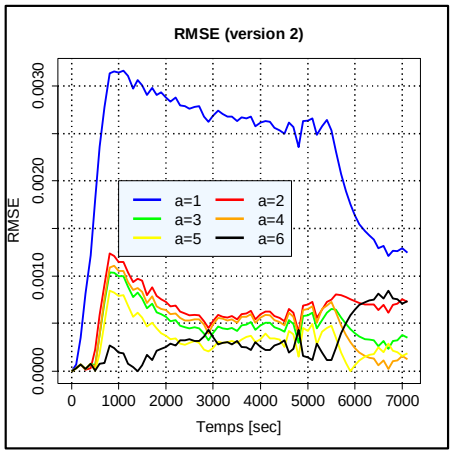
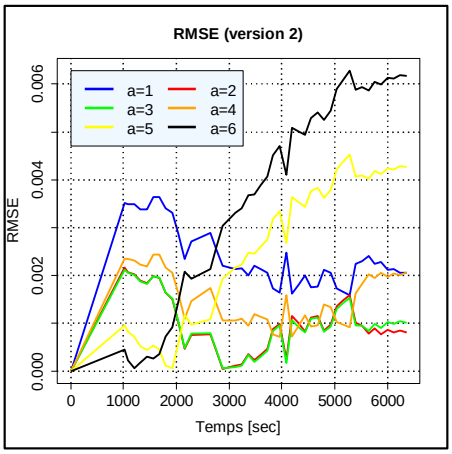
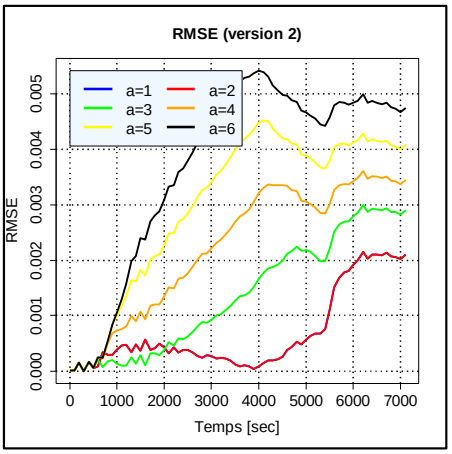
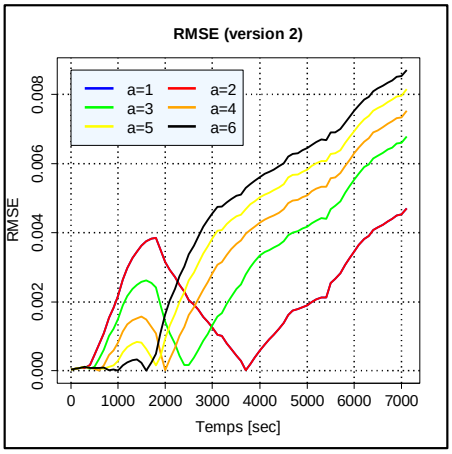
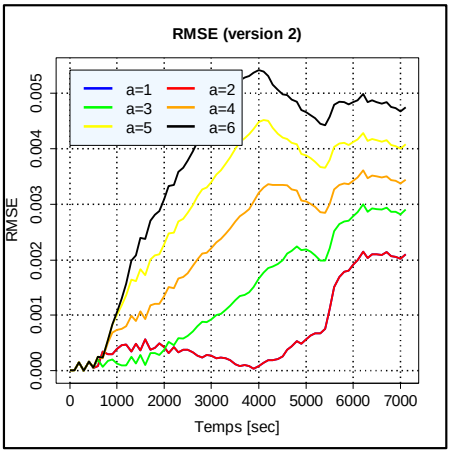
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		

Figure III – 23 a : Evolution temporelle du critère de Nash–Sutcliffe (3 sols et 3 θ_{init}). Version 1

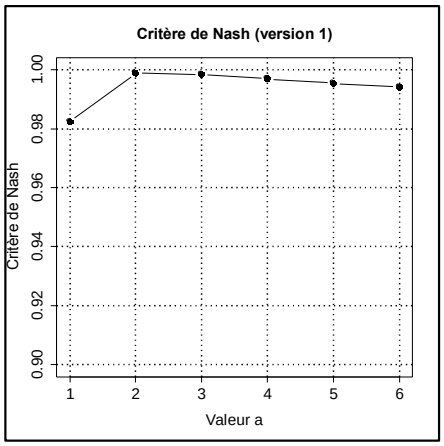
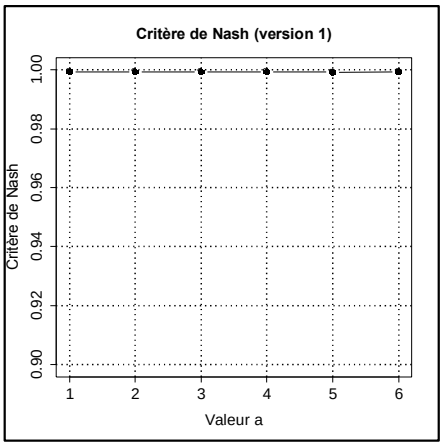
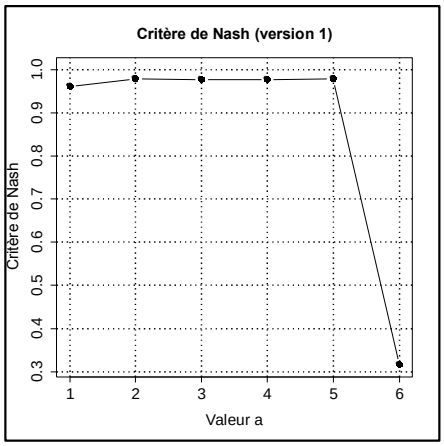
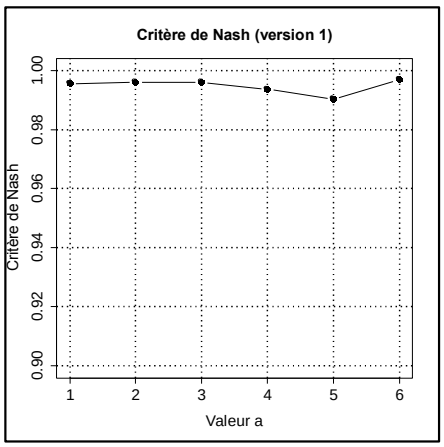
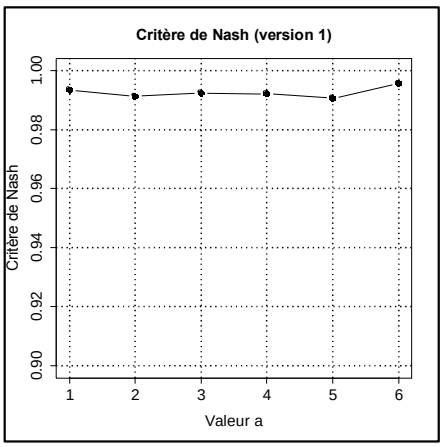
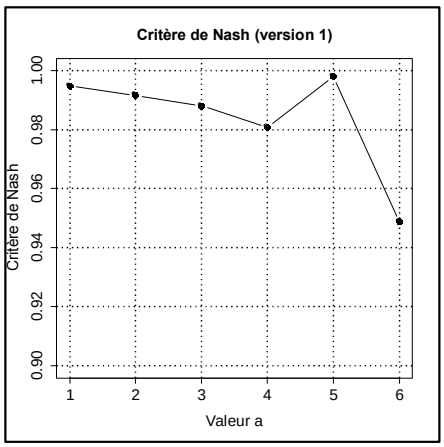
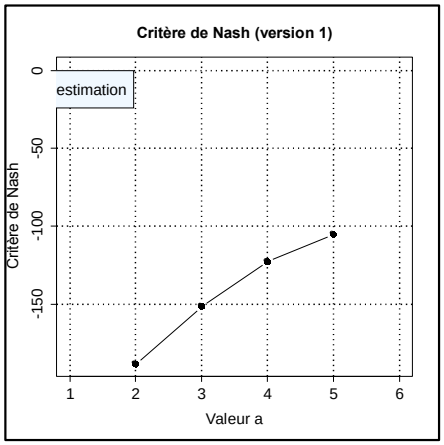
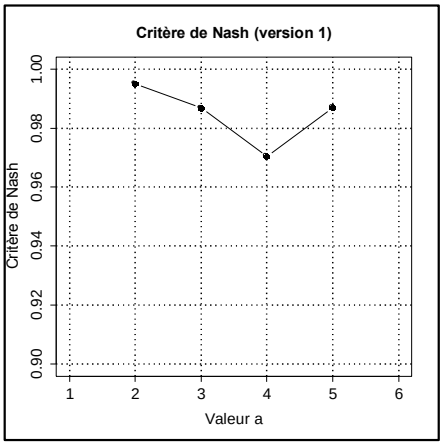
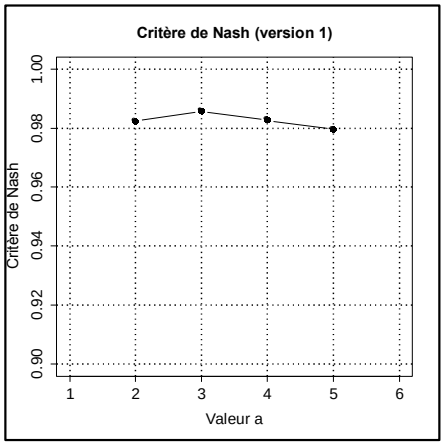
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre			

Figure III – 23 b : Evolution temporelle du critère de Nash–Sutcliffe (3 sols et 3 θ_{init}). Version 2

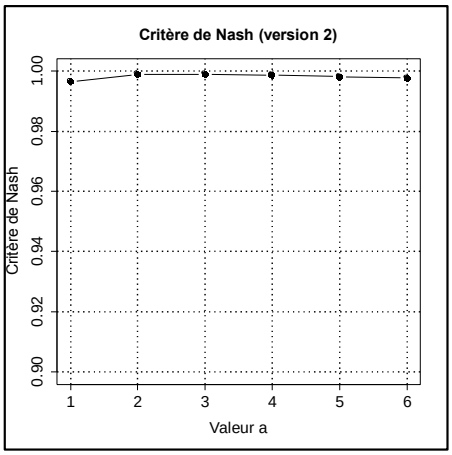
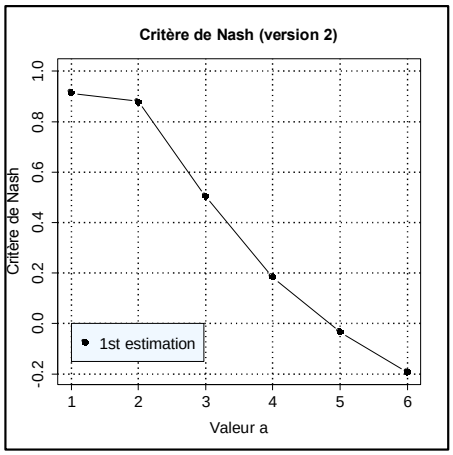
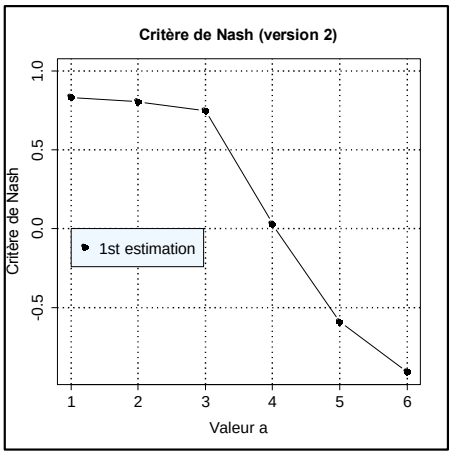
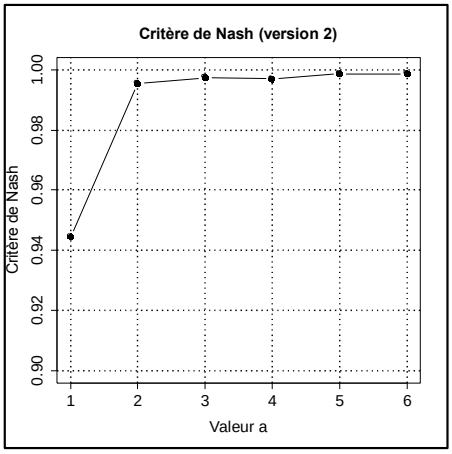
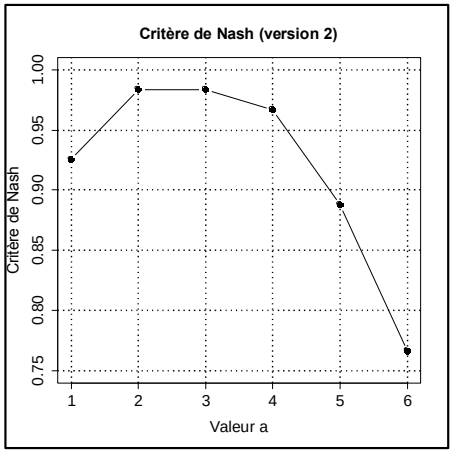
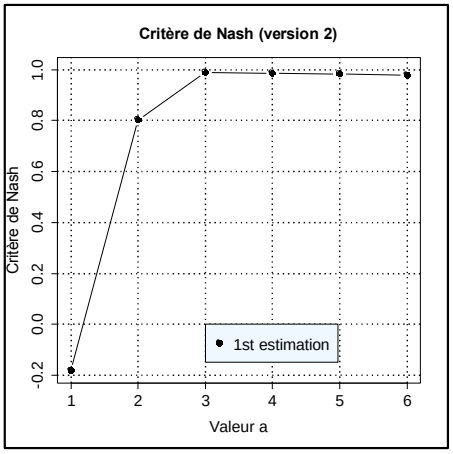
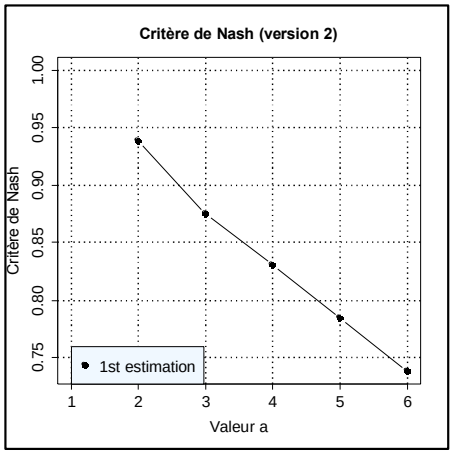
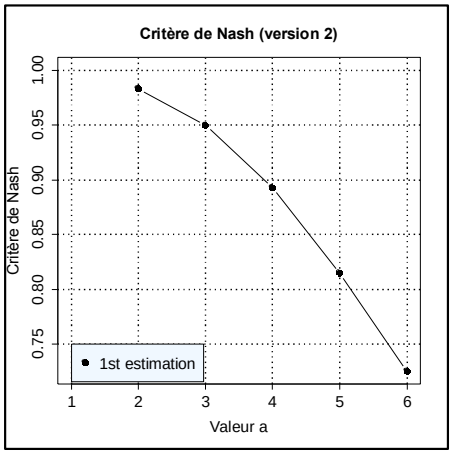
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		

Figure III – 24 a : Evolution du critère de Nash en fonction des valeurs fixes de a et selon la teneur en eau initiale pour les 3 sols. Version 1

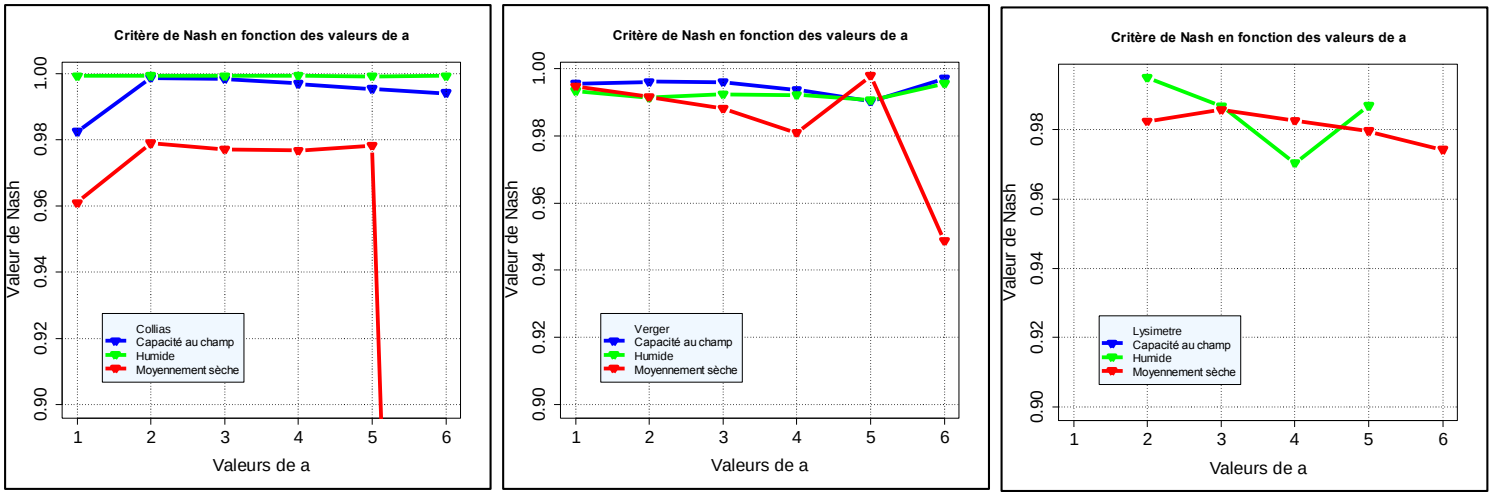
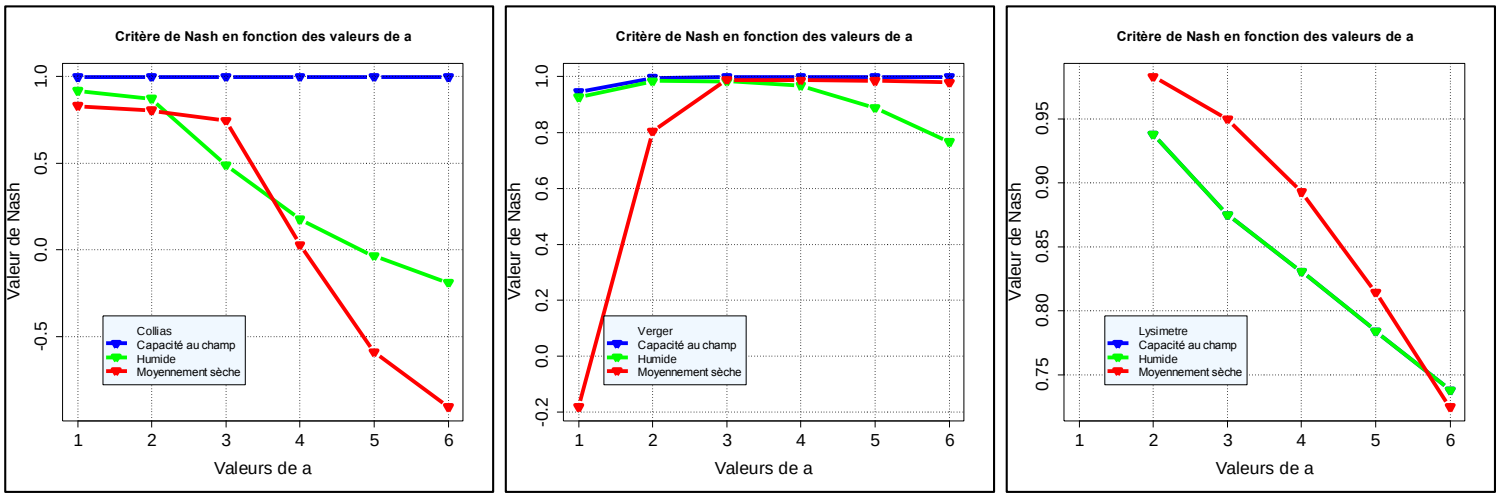


Figure III – 24 b : Evolution du critère de Nash en fonction des valeurs fixes de a et selon la teneur en eau initiale pour les 3 sols. Version 2



III.3.2.1.2. Version 2 du modèle (avec les données « images »)

***Reconstitution des données** (fig. III – 21b)* : La qualité des reconstitutions du drainage avec cette version du modèle est variable. Ainsi Collias à « capacité au champ » et Verger aux trois conditions sont assez bien reconstitués pour au moins une valeur de a fixée. Dans tous les autres cas (Collias « humide » et « moyennement sèche », et Lysimètre « humide » et « moyennement sèche ») ont des reconstitutions éloignées du drainage cumulé observé pour toutes les valeurs de *a*.

***Valeur des erreurs** (fig. III – 22b)* : On peut voir les mêmes remarques que dans la version 1 du modèle sur « l'effet sol » à un état initial comparable pour Verger et Collias à capacité au champ. A l'état hydrique initial « humide », on voit que le RMSE augmente jusqu'à la percée pour les trois sols, diminue pour Verger mais augmente pour Collias et Lysimètre durant la phase de drainage principal, et augmente pour les trois sols dans la phase finale de drainage pur. A un état hydrique « moyennement sec », les trois sols montrent une augmentation du RMSE durant toute la durée de l'infiltration puis une faible diminution à l'arrêt d'apport d'eau. Et durant le drainage final, on voit à nouveau une augmentation.

Si l'on étudie « l'effet humidité initiale » pour un même sol aux trois teneurs en eau initiales, on voit, par exemple pour Verger, que le RMSE augmente jusqu'au temps de percée, reste constant, jusqu'à l'arrêt de l'apport d'eau à « capacité au champ », augmente en conditions « humide » et « moyennement sèche ». L'arrêt d'apport d'eau marque aussi une chute du RMSE et ensuite durant le drainage pur, le RMSE ré-augmente légèrement. Ces remarques sont aussi valables dans l'ensemble pour Collias, et Lysimètre (à l'exception de la condition « capacité au champ »).

Discussions sur les valeurs de RMSE en lien avec le drainage cumulé : En exprimant dans cette version 2 du modèle les valeurs de RMSE en %, on voit que dans les cas de Collias « moyennement sèche », Verger et Lysimètre « humide » et « moyennement sèche » nous avons des pourcentages RMSE très différents entre le minimum et le maximum. Cela est dû à de très mauvaises reconstitutions du drainage observé, et nous amène à choisir des valeurs de a la plus optimales de : $a = 1$ pour Collias moyennement sèche, et $a = 2$ pour les autres cas. Dans les cas de Collias « capacité au champ » et « humide » et Verger « capacité au champ », les pourcentages de RMSE sont très proches et permettent de déterminer des valeurs de *a* fixées optimales de : $a = 3$ (Collias capacité au champ), $a = 2$ (Collias humide) et $a = 6$ (Verger capacité au champ).

***Le critère de Nash** (fig. III – 23b) :* Il confirme les résultats obtenus avec le RMSE. Ainsi, ces deux critères permettent de définir les valeurs fixes de *a* optimales pour la reconstitution du drainage cumulé (résumé dans le tableau III – 12 ci-dessous), et de définir également l'intervalle resserré des valeurs de *a* pour la seconde étape d'estimation.

Tableau III – 12 : Résumé des valeurs fixes optimales du paramètre a, avec l'intervalle de recherche associé pour la 2nde étape d'estimation. (Version 2)			
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias	*a = 2 ; a = [2 ; 3]*	*a = 1 ; a = [1 ; 2]*	*a = 1 ; a = [1 ; 2]*
Verger	*a = 6 ; a = [5 ; 6]*	*a = 2 ; a = [2 ; 3]*	*a = 3 ; a = [3 ; 5]*
Lysimètre	*ND*	*a =2 ; a = [1.5 ; 2]*	*a = 2 ; a = [1.5 ; 2]*

En résumé, le même travail de comparaison est fait dans le cas des simulations avec les données de la tomographie. Seules les simulations faites en condition à capacité au champ montrent une bonne concordance visuelle tout au long de l'infiltration – drainage. En conditions « sèche » et « moyennement sèche » les courbes (quelques soit la valeur de *a*) sont plus éloignées du drainage observé à l'exception des estimations faites pour le sol de Verger où une à deux valeurs fixes de *a* montrent une concordance avec le drainage observé. Là également les RMSE maxima, selon la condition initiale, corroborent cette constatation. En effet, à capacité au champ, les RMSE maxima sont autour de $1{,}5.10^{-3}$ – 3.10^{-3} m, alors qu'en condition sèche et moyennement sèche ils sont autour de 6.10^{-3} à 2.10^{-2} m. De même, les valeurs de Nash-Sutcliffe calculés sont plus faibles et inférieures à 0,99.

Les graphiques (fig. III – 24 b) montrent l'évolution du critère de Nash-Sutcliffe en fonction des valeurs fixes de *a* et pour les trois teneurs en eau initiales. En dehors des valeurs très éloignées de 0,9 qui correspondent à des reconstitutions très éloignées de la courbe observée du drainage cumulé, on n'observe pas de tendance se dégageant globalement selon la teneur en eau initiale et un Nash plus loin de 1,0.

L'information apportée par les profils d'images, n'améliorent pas forcément l'estimation de façon générale sauf en conditions à capacité au champ des sols de Collias et Verger. Cela peut s'expliquer par le fait que l'on diminue le nombre de paramètres ajustable et donc le nombre de degré de liberté du modèle. De plus en version 1, la distance intermacropores et la macroporosité sont des paramètres à valeur unique et constante sur la hauteur, contrairement aux profils mesurés en imagerie, où l'on dispose d'environ 400 valeurs de ces paramètres, ce qui contraint fortement le modèle.

III.3.2.1.3. Comparaison du modèle selon la version : version 1 VS version 2

Les deux versions de la modélisation montrent des reconstitutions simulées différentes. En effet, les courbes de drainage simulées avec l'ensemble des paramètres estimés se rapprochent mieux de la courbe observée (quelques soit la valeur de *a*) comparée aux courbes simulées prenant en compte les profils issus de l'imagerie.

Le tableau III – 13 résume l'intervalle du paramètre *a* sur lequel est fait la 2nde étape d'estimation et ce selon les deux modalités de modélisation avec ou sans les données tomographiques à partir de ces graphiques (fig. III – 21 – 22 – 23) selon le sol et la teneur en eau.

Tableau III – 13 : Résumé des intervalles choisis pour le paramètre a selon le sol, la teneur en eau initiale et la version du modèle, avec la valeur finale du RMSE et du Nash pour l'intervalle défini.

Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ		Humide		Moyennement sèche	
	Avec scanner – version 2	Sans scanner – version 1	Avec scanner – version 2	Sans scanner – version 1	Avec scanner – version 2	Sans scanner – version 1
Collias	$a = 2-3$ $RMSE < 1.10^{-3}$ $Nash > 0.99$	$a = 2-3$ $RMSE < 5.10^{-3}$ $Nash > 0.995$	$a = 1-2$ $RMSE < 5.10^{-3}$ $Nash > 0.9$	$a = 3.5-4.5$ $RMSE = 4.10^{-4}$ $Nash > 0.9994$	$a = 1-2$ $RMSE < 2.10^{-3}$ $Nash > 0.8$	$a = 3-5$ $RMSE < 1.10^{-3}$ $Nash > 0.95$
Verger	$a = 5-6$ $RMSE < 1.10^{-3}$ $Nash > 0.99$	$a = 5-6$ $RMSE < 5.10^{-3}$ $Nash > 0.99$	$a = 2-3$ $RMSE < 1.10^{-3}$ $Nash > 0.98$	$a = 5-6$ $RMSE < 1{,}5.10^{-3}$ $Nash > 0.991$	$a = 3-5$ $RMSE < 4.10^{-3}$ $Nash > 0.9$	$a = 5-6$ $RMSE < 2.10^{-3}$ $Nash \sim 0.999$
Lysimètre	ND	ND	$a = 1.5-2$ $RMSE < 5.10^{-3}$ $Nash > 0.94$	$a = 2-3$ $RMSE < 3.10^{-3}$ $Nash > 0.985$	$a = 1.5-2$ $RMSE < 2.10^{-3}$ $Nash > 0.95$	$a = 2-3$ $RMSE < 2.10^{-3}$ $Nash = 0.98$

III.3.2.2. Etape 2 : Estimation à valeurs a contraintes dans un intervalle

Les résultats de la 2nde étape d'estimation quelle que soit la version du modèle, sont présentés sur les figures suivantes, les mêmes types de graphiques que dans la 1ere estimation ont été fait. L'évolution temporelle du drainage cumulé simulé et observé est présenté sur la figure III – 25, l'évolution temporelle du RMSE sur la figure III – 26, et le critère de Nash-Sutcliffe sur la figure III – 27. Le drainage est tracé pour toutes les valeurs de *a* testées à la 1ere estimation en gris, la donnée observée est en bleu, et pour celle issue de la deuxième estimation (légendée : *« a=final value »* sur les graphiques). Le même code couleur est repris pour les courbes RMSE ; le gris représente l'étape 1 et le rouge est l'estimation finale, et les critères de Nash sont ordonnés selon l'axe des abscisses entre 1 et 6 avec la valeur finale estimée de *a* sur cet axe en figuré rouge.

La figure « a » (figures III – 25, 26 et 27) présente les résultats pour le modèle sans les données imagerie (version 1), la figure « b » présente les résultats pour le modèle avec les données imagerie (version 2).

Dans le cas du modèle sans les données de l'imagerie, les courbes de drainage (fig. III – 25a) sont, contenues dans les courbes obtenues dans la première phase. Dans la majorité des cas les courbes RMSE (fig. III – 26a) de la 2nde étape d'estimation sont parmi les plus basses, sauf pour deux colonnes (Collias et Lysimètre en condition initiale humide). La plupart des critères de Nash-Sutcliffe (fig. III – 27a) sont proches de 1, même s'ils ne sont pas toujours maxima. Dans le cas du modèle avec les données de l'imagerie, les mêmes constatations sont faites pour les courbes de drainage (fig. III – 25b), les courbes RMSE (fig. III – 26b) et le critère de Nash-Sutcliffe (fig. III – 27). Il est à noter que les bilans de masse sont conformes c'est-à-dire qu'ils ne présentent pas d'anomalie particulière (bilan de masse complet – voir annexes 3a – version 1 et 3b – version 2).

Figure III – 25 a : Evolution temporelle du drainage pour toutes les valeurs de a fixées (1ere estimation) et la valeur estimée (2nde étape d'estimation) pour les trois sols et trois conditions initiales. Version 1

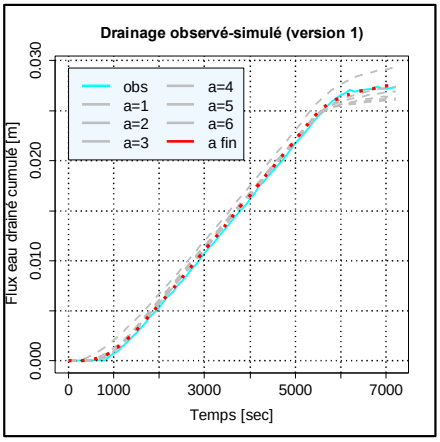
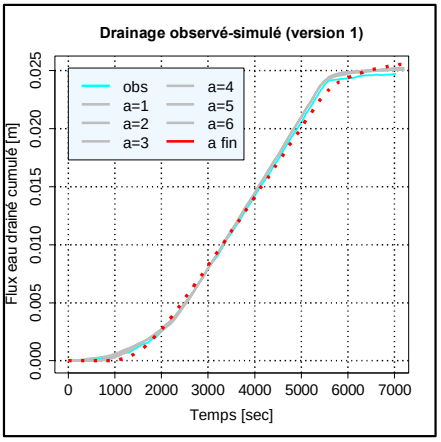
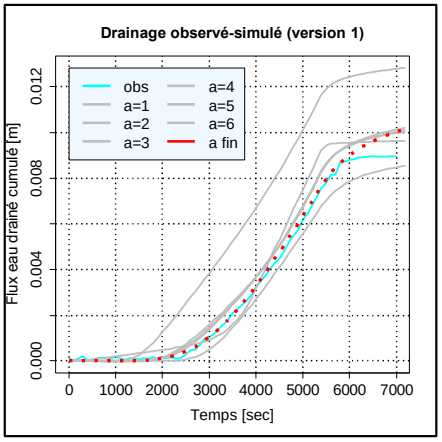
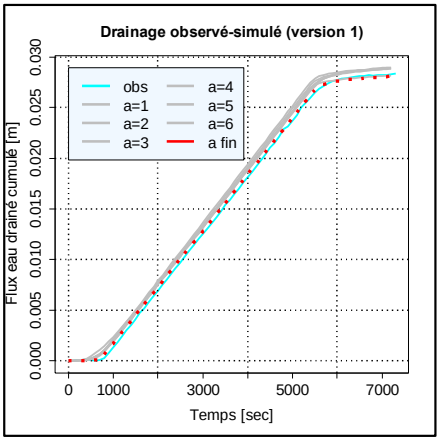
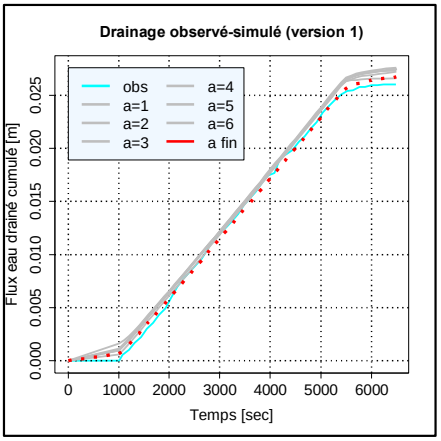
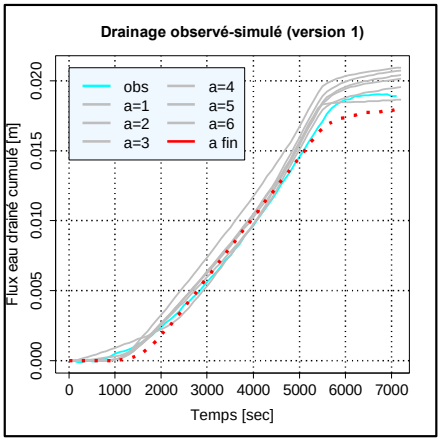
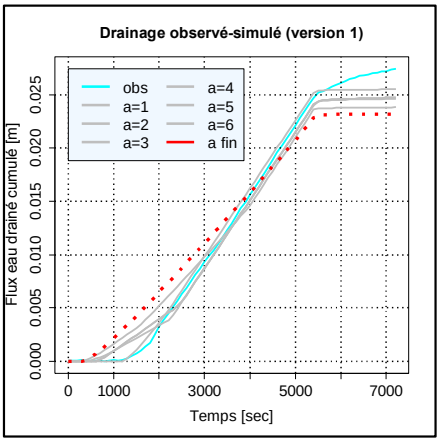
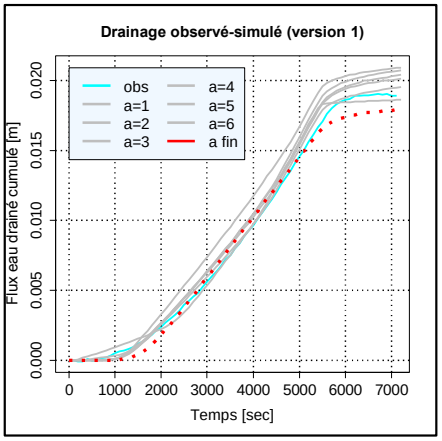
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		

Figure III – 25 b : Evolution temporelle du drainage pour toutes les valeurs de a fixées (1ere estimation) et la valeur estimée (2nde étape d'estimation) pour les trois sols et trois conditions initiales. Version 2

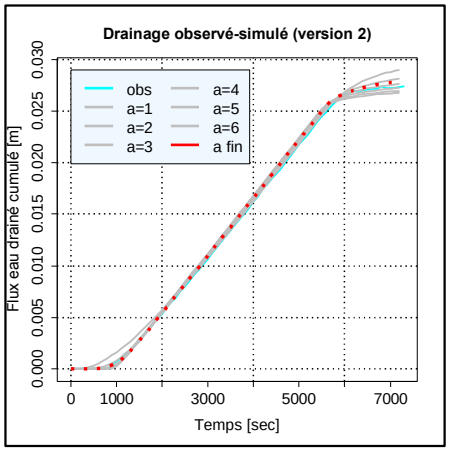
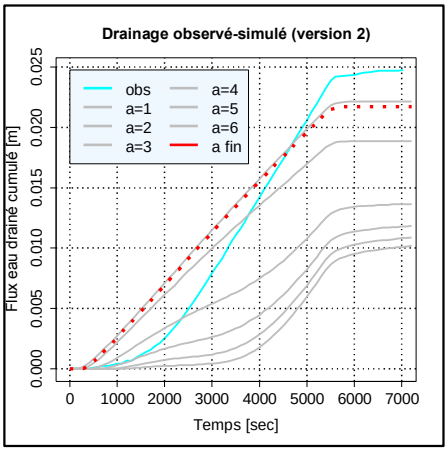
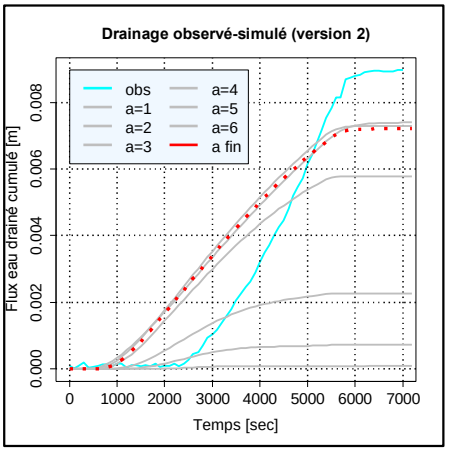
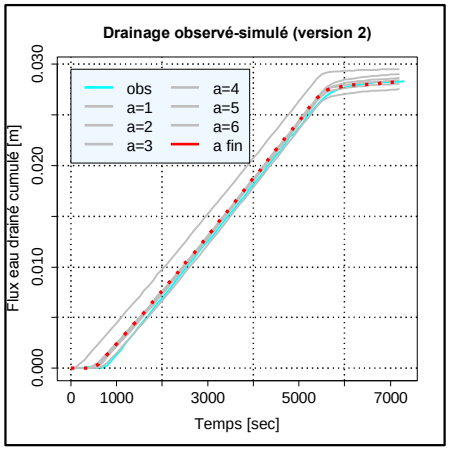
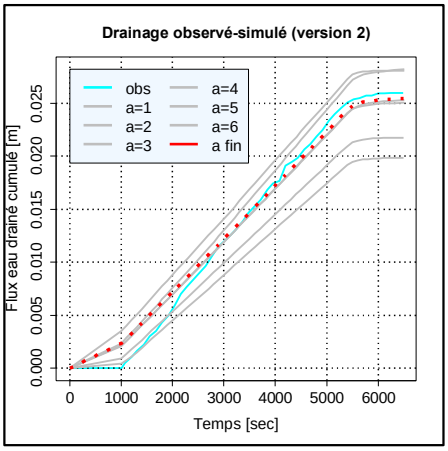
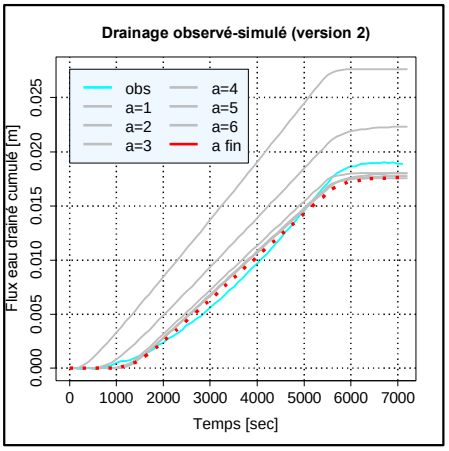
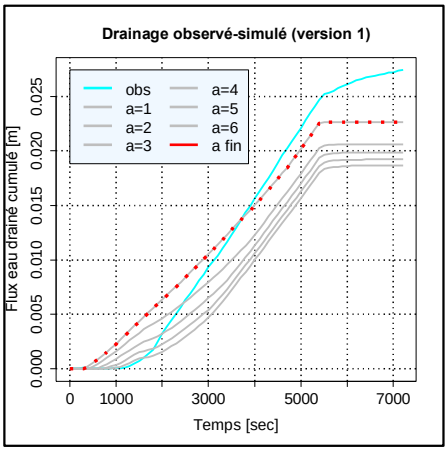
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 26 a : Evolution temporelle du RMSE pour toutes les valeurs de a fixées (1ere estimation) et la valeur estimée (2nde étape d'estimation) pour les trois sols et trois conditions initiales. Version 1

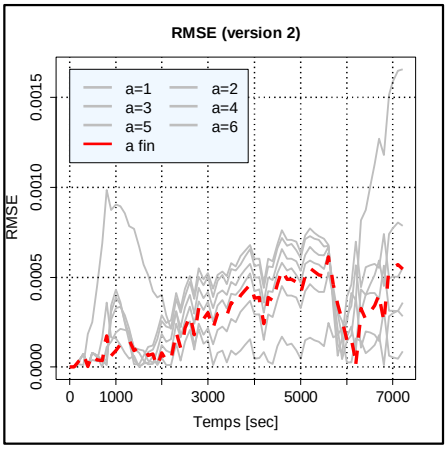
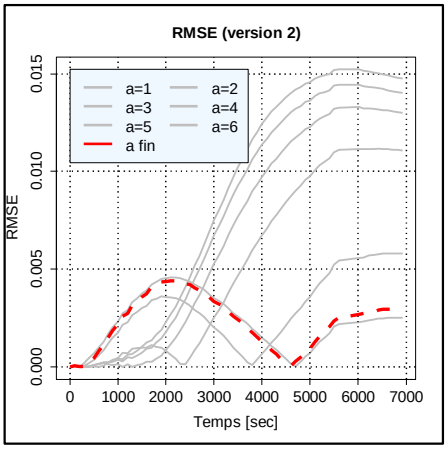
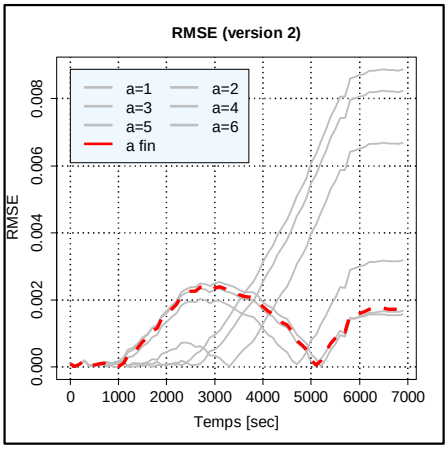
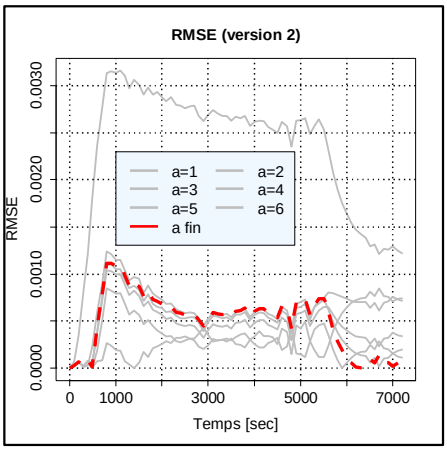
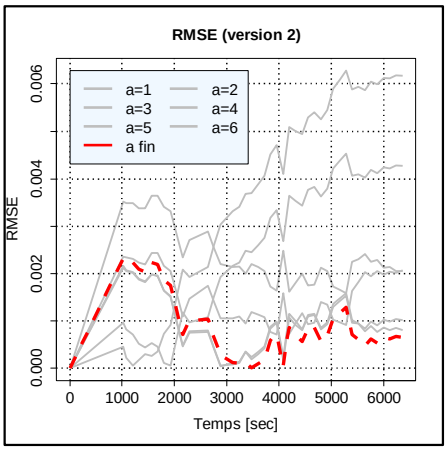
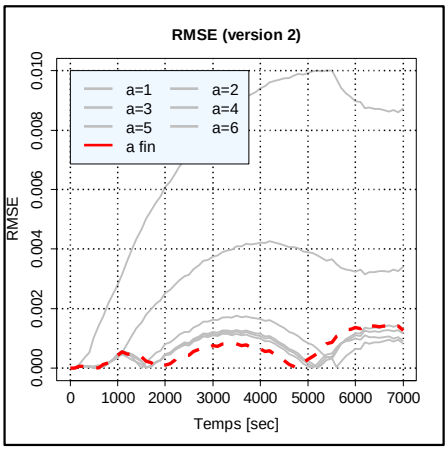
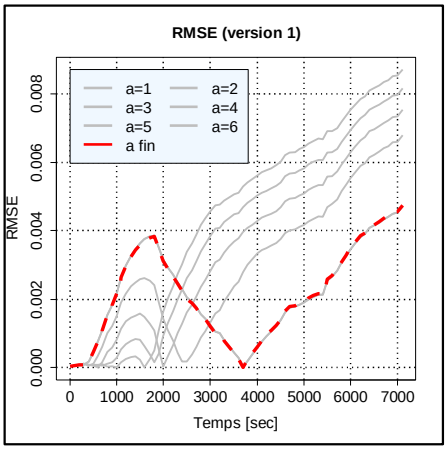
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 26 b : Evolution temporelle du RMSE pour toutes les valeurs de a fixées (1ere estimation) et la valeur estimée (2nde étape d'estimation) pour les trois sols et trois conditions initiales. Version 2

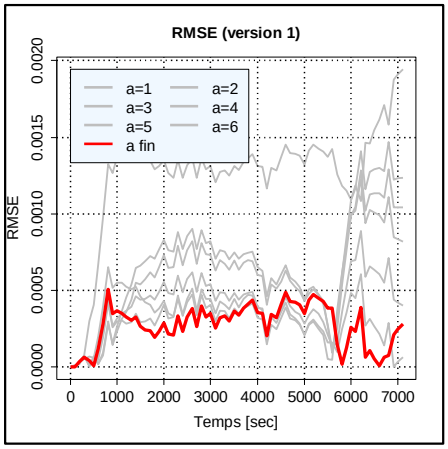
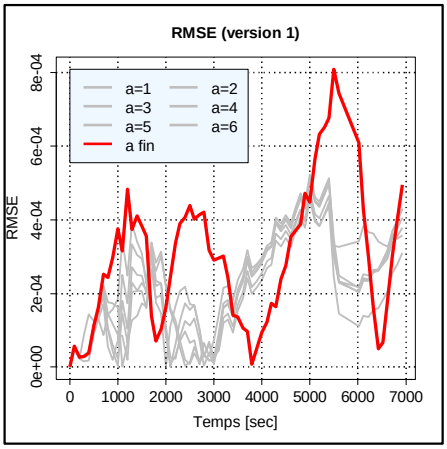
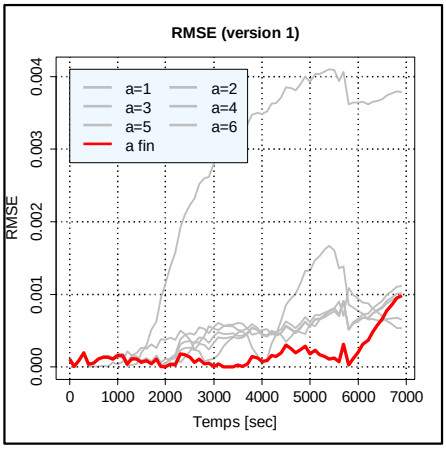
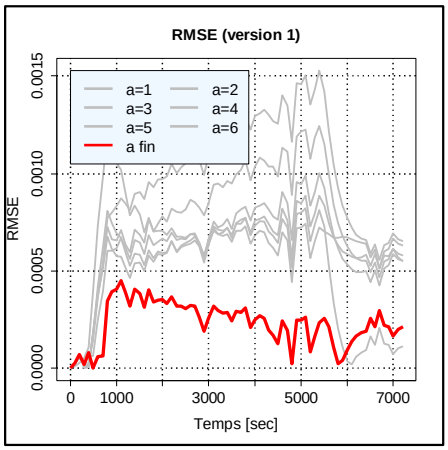
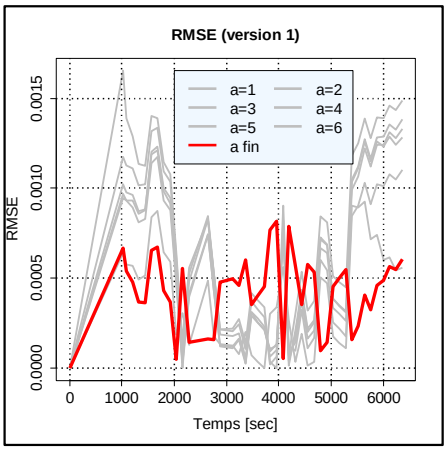
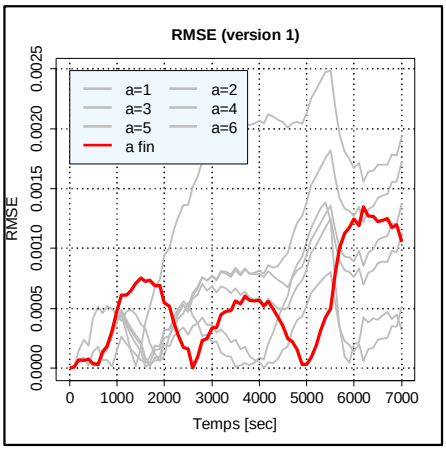
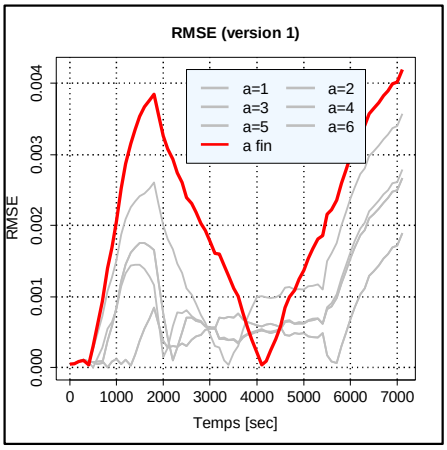
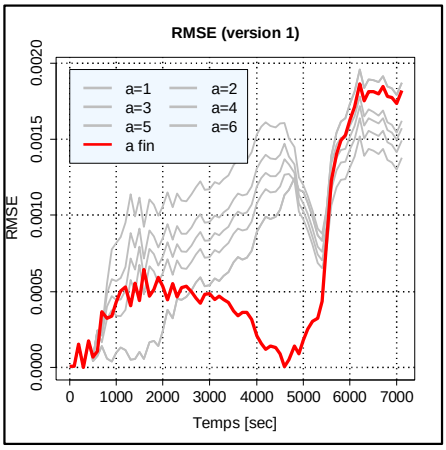
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		

Figure III – 27 a : Critère de Nash-Sutcliffe pour toutes les valeurs de a fixées (1ere estimation) et la valeur estimée (2nde étape d'estimation) pour les trois sols et trois conditions initiales. Version 1

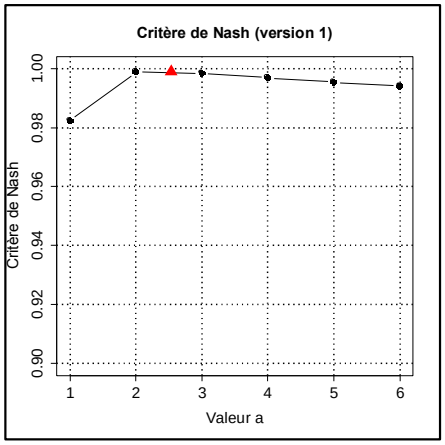
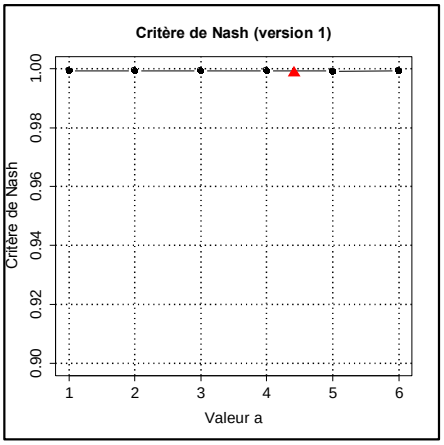
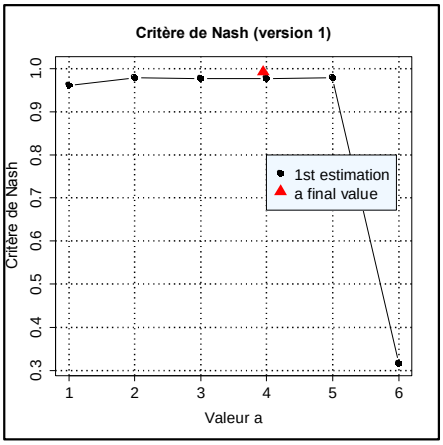
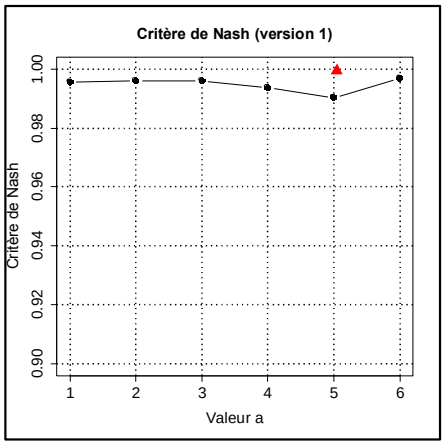
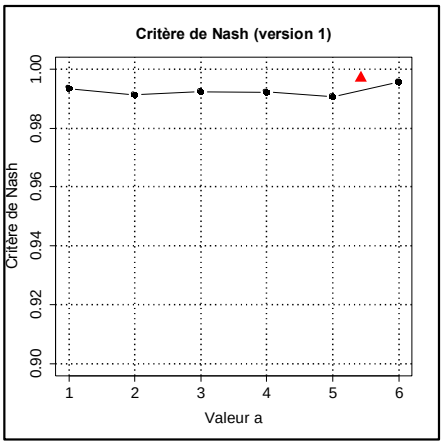
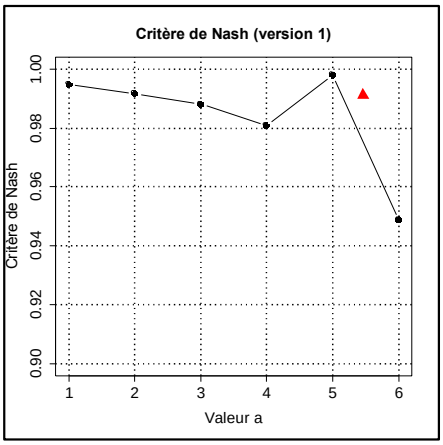
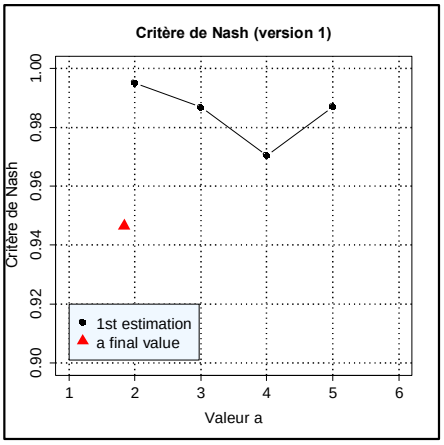
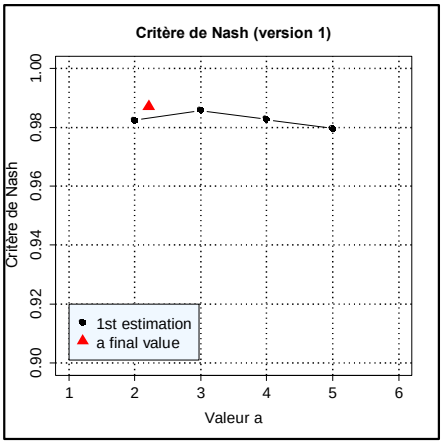
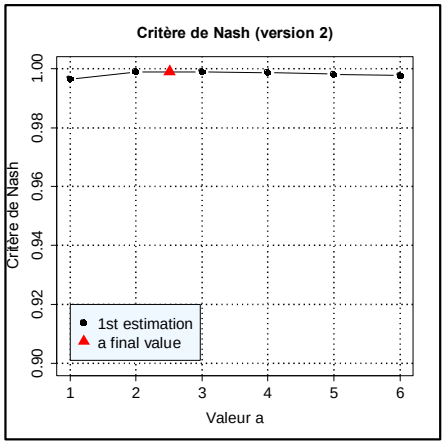
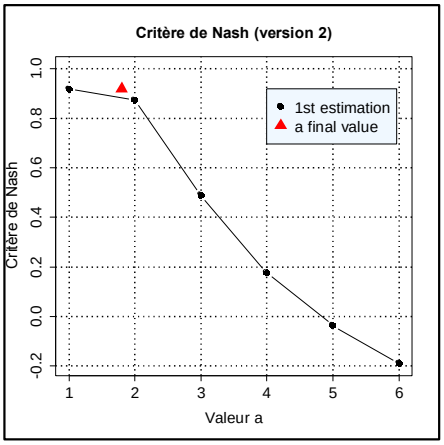
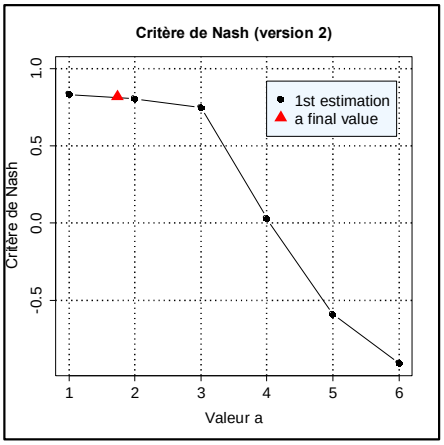
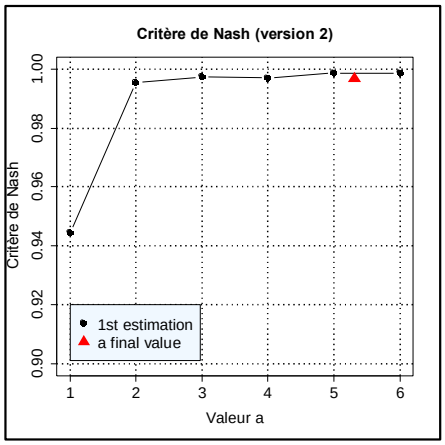
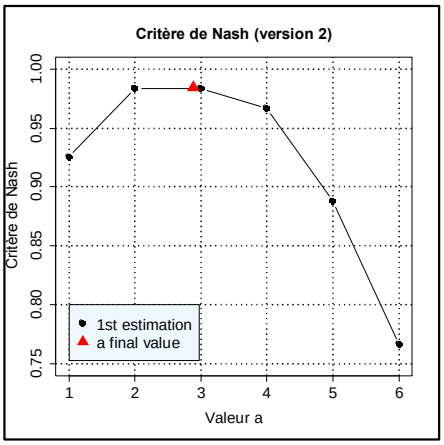
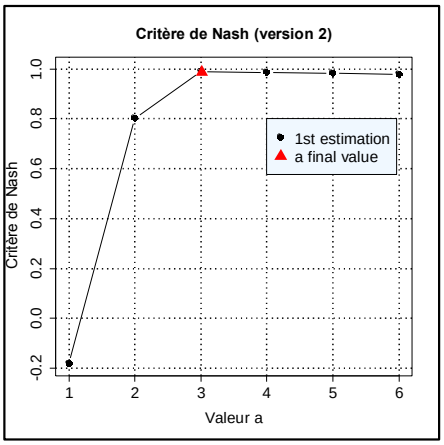
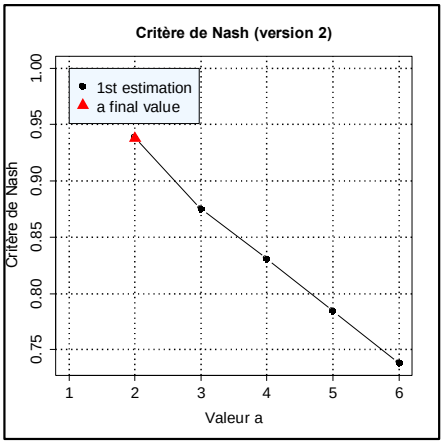
Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		

Figure III – 27 b : Critère de Nash-Sutcliffe pour toutes les valeurs de a fixées (1ere estimation) et la valeur estimée (2nde étape d'estimation) pour les trois sols et trois conditions initiales. Version 2

Sols \ Teneurs en eau initiales	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

III.3.2.2.1. Evaluation des critères statistiques fournis par DREAM

L'étude d'évaluation des critères de « diagnostic » des estimations faites par DREAM est faite sur la 2nde étape d'estimation et permet d'avoir un regard critique vis-à-vis des estimations finales des paramètres. Les critères ***R-stat*** et des graphiques d'acceptation sont résumés dans le tableau suivant (tableau III – 10). Pour rappel, le ***R-stat***, est un critère statistique calculé durant l'estimation par l'algorithme de DREAM et il est empiriquement admis qu'un ***R-stat*** inférieur à **1,2** est un critère indiquant une bonne estimation (Vrugt, 2016).

De même, le graphique d'acceptation signifie la quantité (en %) acceptée de nouvelles valeurs candidates. Dans ce tableau, **« *R-stat* = *ok*** » signifie que ce critère est inférieur à 1,2 pour tous les paramètres estimés. Si ce n'est pas le cas pour un des paramètres, celui-ci est indiqué ainsi que la valeur ***R-stat*** dans le tableau.

De même, le critère « acceptation » se rapporte à un critère interne à l'algorithme permettant de décrire la qualité du processus itératif (voir chapitre II.3.4.4).

Le tableau III – 14 indique que pour les ajustements des paramètres réalisés lors de la 2nde étape, les critères « diagnostics » sont dans l'ensemble de bonne qualités : dans ce cas, nous considérons que les paramètres ajustés sont « bien » définis. Le critère ***R-stat*** est toujours vérifié sauf pour un paramètre dans une seule situation (Collias « moyennement sèche » version 1). Dans ce cas le critère a une valeur de 1,22 juste au-dessus du seuil choisi de 1,2. Le choix de ce seuil de 1,2 étant empirique, nous considérons que dans ce cas le critère ***R–stat*** est quasiment vérifié. Le critère d'acceptation conduit à un « refus » (c'est-à-dire que l'algorithme à trop refusé de points candidats durant ses itérations) dans 3 situations, et en particulier pour les conditions « moyennement sèche » et à une trop grande acceptation des points candidats (cas de Collias moyennement sèche avec les données imagerie – version 2). Dans ces cas, les estimations sont à prendre avec plus de prudence, c'est le cas de Collias à capacité au champ et moyennement sèche sans les données de l'imagerie (version 1), et avec les données imagerie (version 2) et de Verger moyennement sèche sans les données de l'imagerie (version 1). Ce regard vis-à-vis des diagnostics de l'estimation peut nous indiquer que les paramètres ajustés peuvent être mal définis / non uniques, car on peut manquer de données observées afin de mieux contraindre l'estimation.

Tableau III – 14 : Résumé des critères de diagnostic des estimations DREAM.

Sols \ Teneur en eau	Capacité au champ		Humide		Moyennement sèche	
	Sans imagerie	Avec imagerie	Sans imagerie	Avec imagerie	Sans imagerie	Avec imagerie
Collias	$\hat{R} - stat = ok$ Acceptation = refus	$\hat{R} - stat = ok$ Acceptation = ok	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation=ok	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation=ok	$\hat{R} - stat = ok$ sauf d (1,22) acceptation= refus	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation= ok++*
Verger	$\hat{R} - stat = ok$ Acceptation = ok	$\hat{R} - stat = ok$ Acceptation = ok	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation=ok	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation=ok	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation= refus	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation=ok
Lysimètre	ND	ND	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation=ok	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation=ok	$\hat{R} - stat = ok$ acceptation=ok	$\hat{R} - stat$ acceptation

III.3.2.2.2. Comparaison des deux versions du modèle

Le but ici est de comparer la modélisation des expériences d'infiltration – drainage réalisée sous tomographie médicale en réalisant deux types de modélisation (version 1 et 2).

III.3.2.2.3. Comparaison du drainage cumulé

La figure III – 28 permet de comparer l'évolution du drainage observé avec le drainage simulé après ajustement des paramètres pour les deux versions du modèle (avec et sans prise en compte des données image). Les figures III – 29 et III – 30 représentent respectivement un zoom de la figure III – 28 au début de l'expérience (temps de percée) et à la fin de l'expérience (fin du ressuyage après l'arrêt de la pluie). La figure III – 31 représente l'évolution du critère RMSE pour les deux versions de l'ajustement, et la figure III – 32 présente le critère de Nash pour toutes les valeurs de a fixes et la valeur optimale de a.

En conditions proches de la capacité au champ (1ère colonne des fig. III – 28 ; III – 29 et III – 30), les courbes simulées par chacune des deux versions de modèle sont proches l'une de l'autre et très similaire à la donnée observée : le temps de percée est bien reconstitué. On observe une très bonne reconstitution de la phase principale de drainage et la dynamique de ressuyage à l'arrêt de la pluie est très bien reconstituée pour les 2 versions de l'ajustement. Ce qui se traduit par des valeurs finales de RMSE ou du critère de Nash très similaires. Les différences entre les 2 versions sont visibles autour du temps de percée, sans que l'on puisse identifier une règle générale : pour le sol Collias (respec. Verger), la meilleur reconstitution du temps de percée est obtenu avec la 2nde version (respec. 1ère version) de l'ajustement. Ceci est bien mis en évidence en regardant l'évolution temporelle du RMSE : le RMSE autour du temps de percée est plus important avec la 1ère version (respec. 2nde version) pour Collias (respec. Verger). Pendant la phase de drainage principale, les évolutions du RMSE sont très similaires d'une version de l'ajustement à l'autre. Après l'arrêt de la pluie, les courbes RMSE obtenues avec les deux versions du modèle s'inversent mais au final aboutissent à des valeurs très faibles ($RMSE_{max} = 8.10^{-4}$ m). Les valeurs des critères de Nash-Sutcliffe sont très proches entre elles, et supérieure à 0,99. La valeur calculée pour la simulation sans les données tomographiques est meilleure mais reste très proche de la valeur obtenue avec les données de la tomographie.

Dans le cas des simulations à teneur en eau initiale « humide », pour les trois sols, les courbes simulées sans les données de l'imagerie présentent une plus grande proximité avec la donnée observée. Pour la colonne Lysimètre, les deux courbes simulées sont très proches l'une de l'autre et très éloignées de la donnée observée. La colonne Collias a une courbe simulée sans les données images très proche de la donnée observée, alors que la courbe simulée avec les données de l'imagerie est plus éloignée. La courbe simulée avec l'imagerie (courbe verte) a une percée plus précoce et surtout beaucoup plus brutale comparée à la courbe simulée sans les données imagerie (rouge) qui a un temps de percée légèrement tardif mais plus proche de la courbe observée. La quantité d'eau drainée totale est là aussi plus éloignée dans le cas de la simulation avec les données imagerie (~21,7 mm) que dans le cas de la simulation sans les données images (~26,5 mm) comparée à la donnée observée (~248 mm). Le critère d'erreur final RMSE calculé avec la donnée d'imagerie (4.10^{-3} m) est beaucoup plus important que celui calculé avec les simulations qui n'ont pas utilisées les images. Enfin le critère de Nash-Sutcliffe est très proche de 1 dans le cas sans les données imagerie, alors qu'il est inférieur à 0,92 dans

l'autre cas. Dans le cas du sol de Verger à condition « humide », les courbes de drainage sont très proches (i) entre elles et aussi (ii) de la donnée observée. Cependant, comme dans le cas des simulations réalisées à capacité au champ, la reconstitution de la dynamique du drainage obtenue avec la version 2 du modèle est légèrement moins bonne que celle obtenue avec la version 1 du modèle, en particulier autour du point de percée et de la phase de ressuyage. La pente entre l'arrêt de la pluie et la fin de la simulation semblent être plus proche de l'observation dans le cas de la simulation avec les images. Le zoom sur la fin des courbes montrent une différence inférieure à 1 mm pour les deux courbes simulées. Les courbes RMSE montrent une plus grande différence pour la zone de percée mais il se situe autour de 1.10^{-3} m. Les critères de Nash-Sutcliffe sont tous les deux supérieurs à 0,98 ce qui indique une plutôt bonne reconstitution de la courbe observée.

Dans cette condition initiale d'humidité, les reconstitutions du drainage pour la colonne Lysimètre dans les deux versions du modèle et pour la version 2 (avec données imagerie) du sol de Collias peuvent s'expliquer par des « problèmes » statistiques trop complexes ou à multi solutions que DREAM n'a pas pu résoudre ou est passé à côté.

Dans le cas de simulation en condition « moyennement sèche », les résultats montrent des courbes simulées proches l'une de l'autre, mais aussi relativement proche de la donnée observée, sans que l'accord soit aussi bon qu'à capacité au champ ou en condition « humide ». Dans le détail, le temps de percée est légèrement retardé, autour de 600 s sur la courbe « observation », et ~1000 – 1200 s sur les courbes simulées. La dynamique est mal reconstituée autour de ce point de percée : les simulations montrent une dynamique du flux de drainage plus « abrupte » que les données expérimentales qui montrent un flux de drainage qui augmente lentement après la percée. Les courbes simulées zoomées sur la fin de la simulation sont très proches, et montrent une différence d'environ 1 mm. Les courbes RMSE montrent des écarts similaires pour les deux simulations, l'écart augmente à l'arrêt de la pluie. Et les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe sont supérieures à 0,988. Le critère de Nash le plus élevé est obtenu pour la simulation sans les données de la tomographie. Dans le cas de la colonne Collias, la courbe simulée sans les données image montre une très bonne reconstitution de la dynamique jusqu'à l'arrêt de la pluie avec un temps de percée correct, dans cette phase la différence entre le drainage observé et simulé est de 1 mm et le drainage observé semble s'arrêter alors que le drainage simulé se poursuit ce qui induit cette différence. La version 2 du modèle dans ce cas ne parvient pas à reconstituer ni la dynamique ni la quantité du flux drainé. La courbe RMSE de la version 1 du modèle est autour de $2{,}5.10^{-4}$ m et augmente à la fin de la simulation de par l'écart entre les valeurs finales du drainage observé et simulé. La courbe RMSE de la version 2 du modèle montre des écarts plus importants et avec pour maximum $2{,}5.10^{-3}$ m. Les critères de Nash-Sutcliffe confirment ces observations, la version 1 du modèle a une valeur située autour de 0,99, tandis que la version 2 est à une valeur autour de 0,81.

Figure III – 28 : Evolution temporelle des courbes de drainage avec les deux versions du modèle et l'observation (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

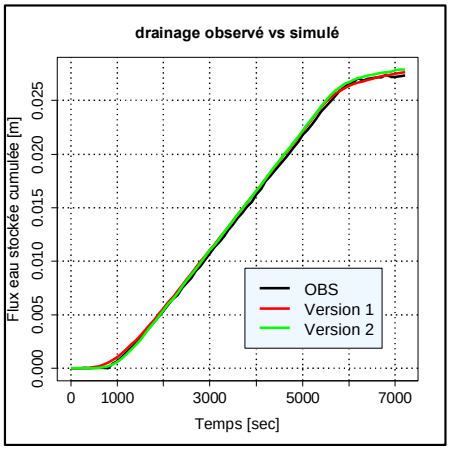
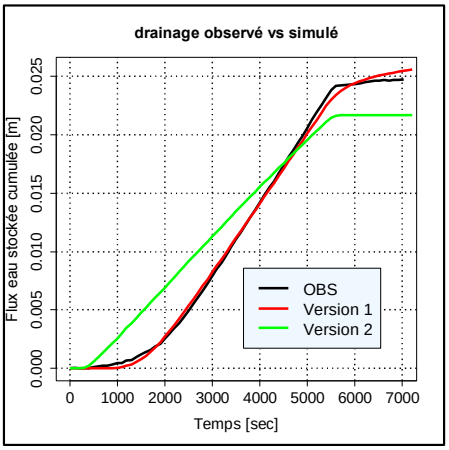
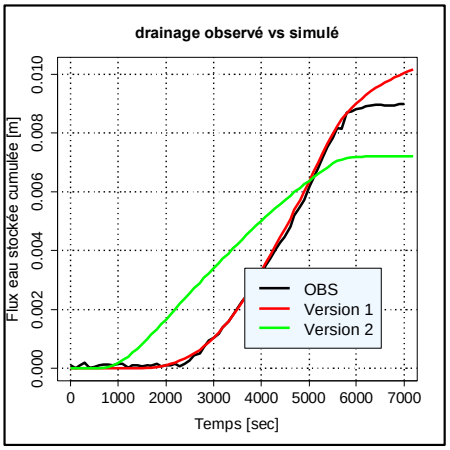
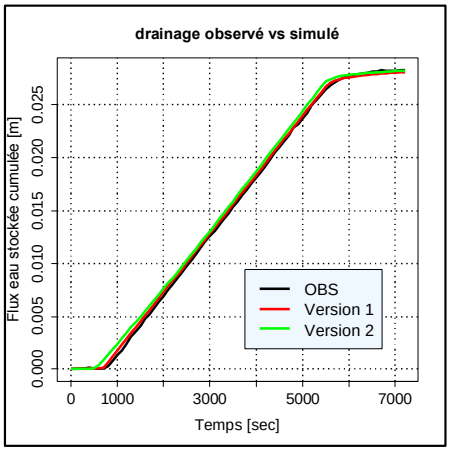
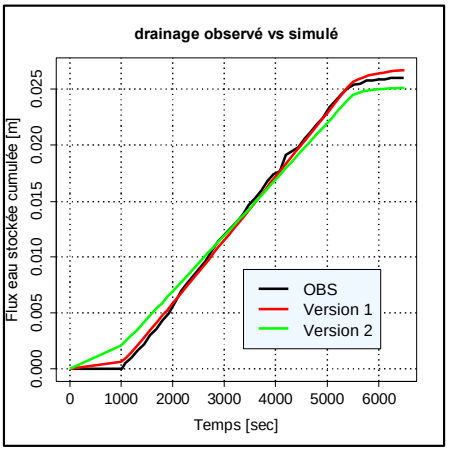
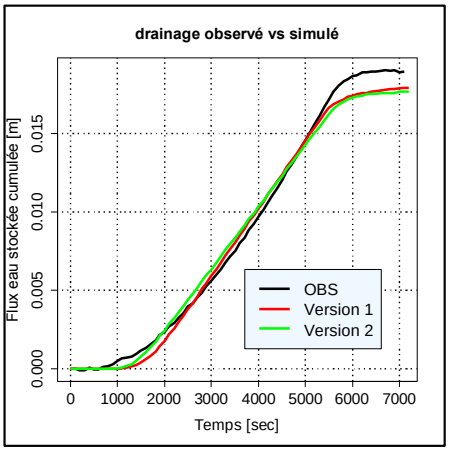
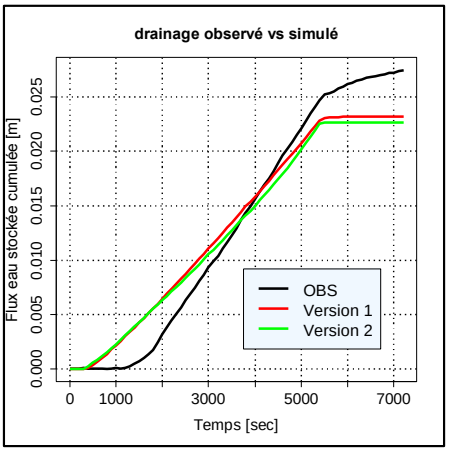
Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 29 : Evolution temporelle zoomée sur la percée du drainage avec les deux versions du modèle et l'observation (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

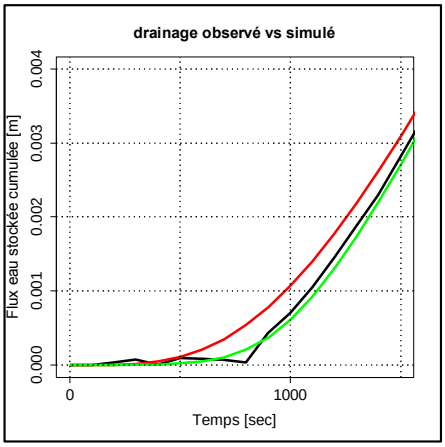
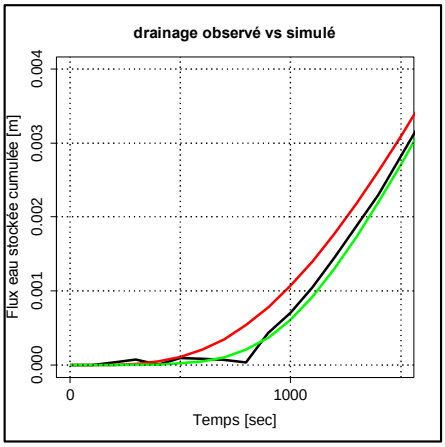
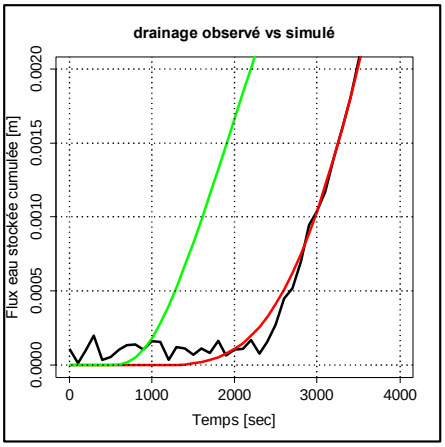
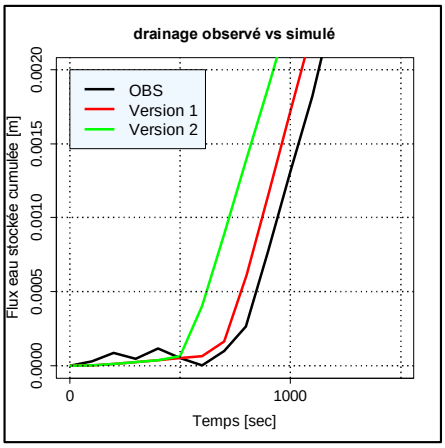
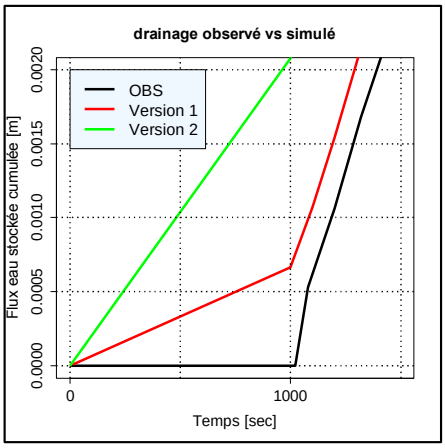
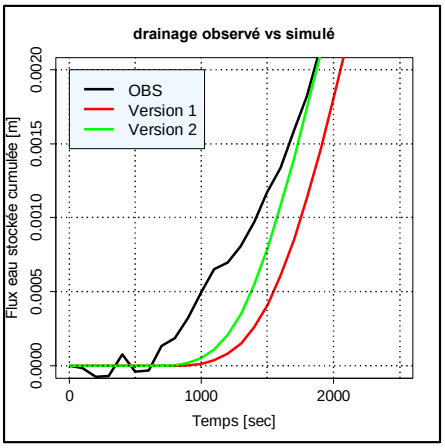
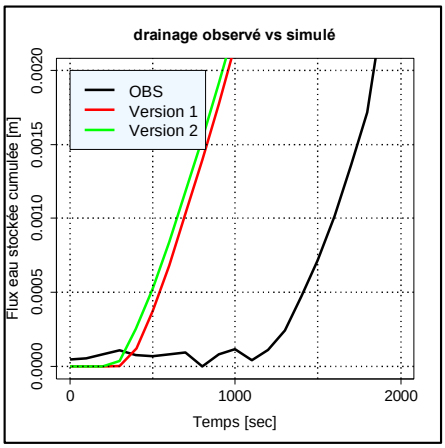
Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 30 : Evolution temporelle du drainage zoomée sur l'arrêt de l'apport d'eau avec les deux versions du modèle et l'observation (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

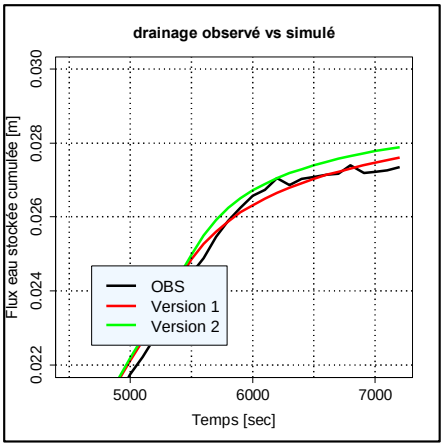
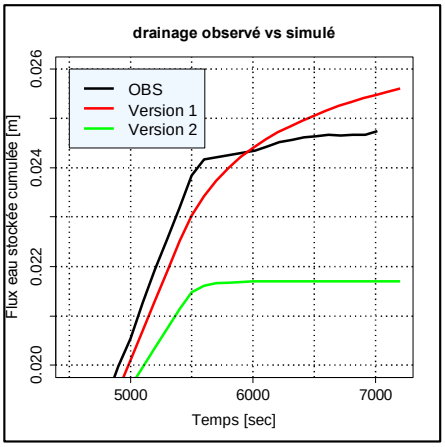
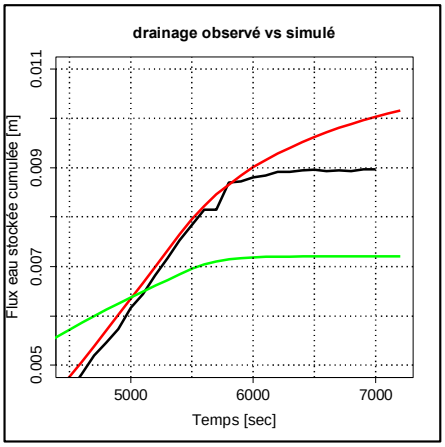
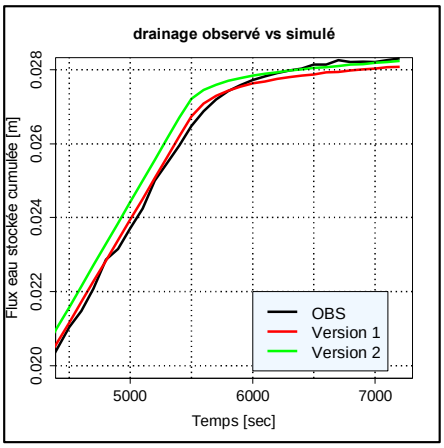
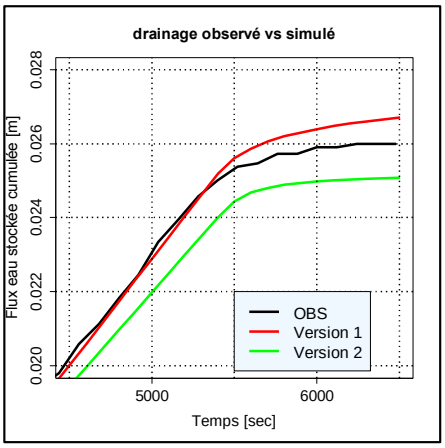
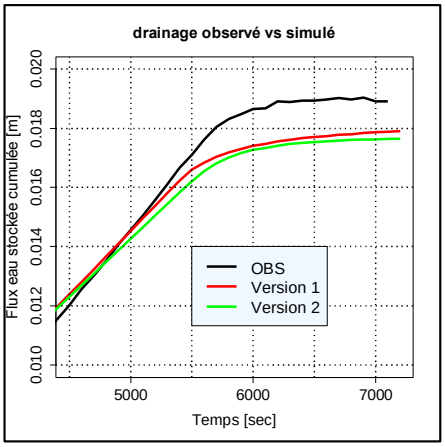
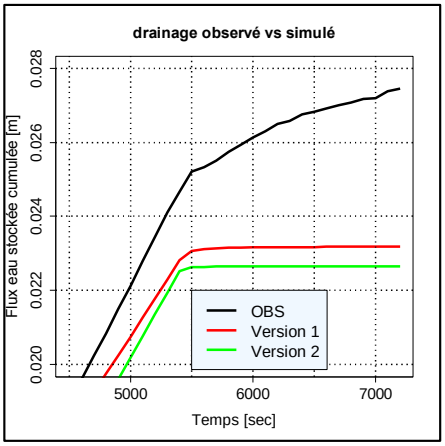
Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 31 : Evolution temporelle du RMSE du drainage avec les deux versions du modèle et l'observation (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

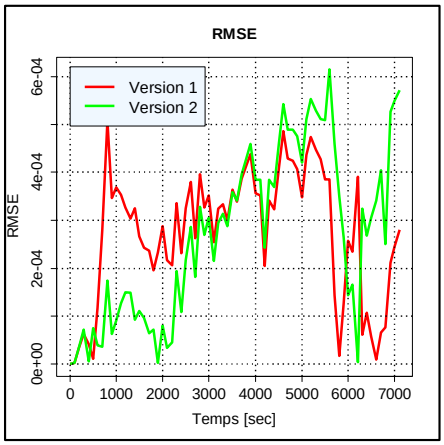
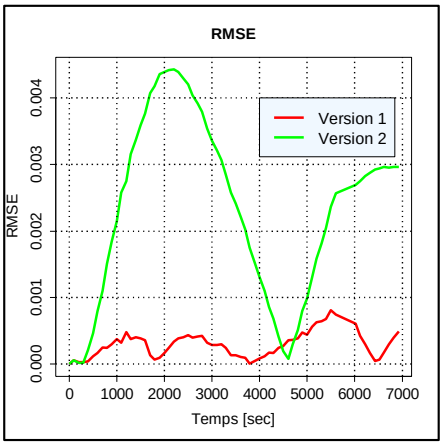
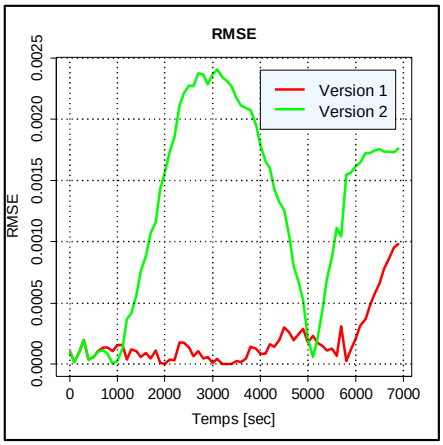
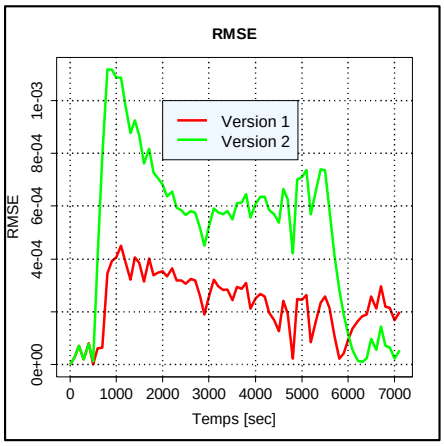
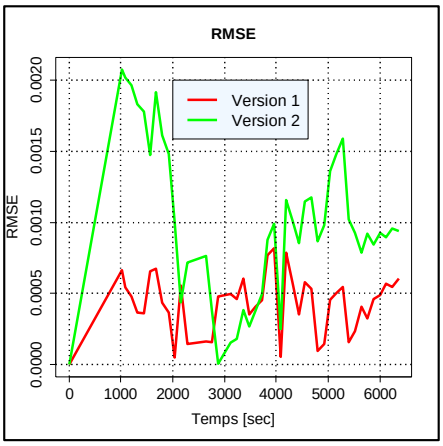
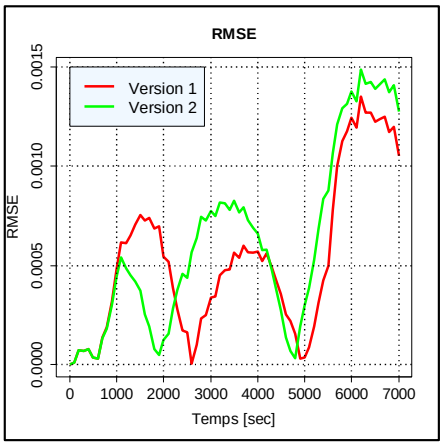
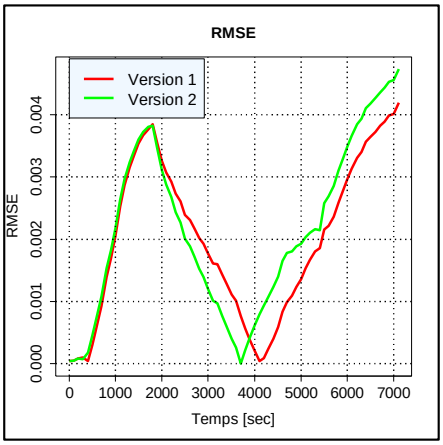
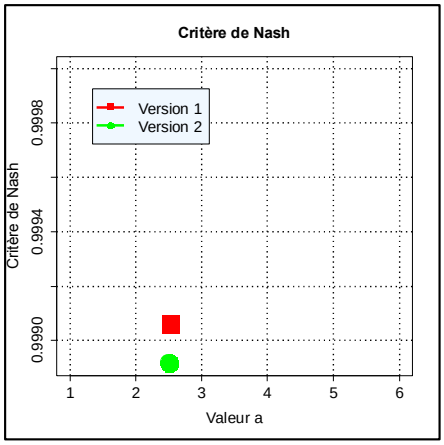
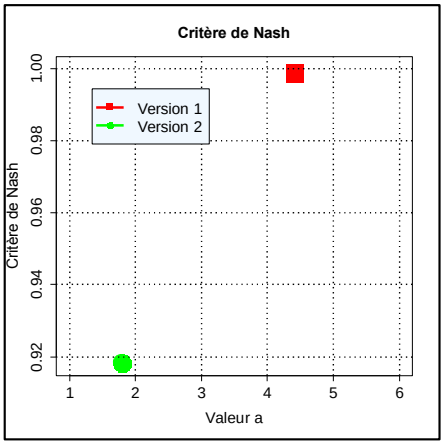
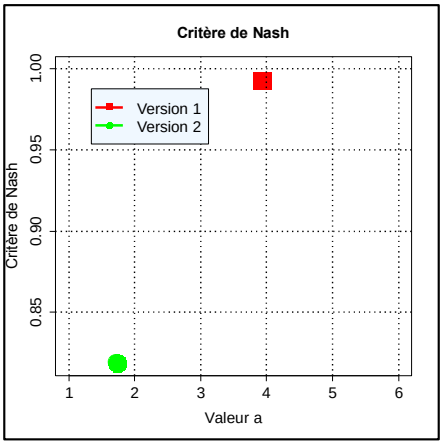
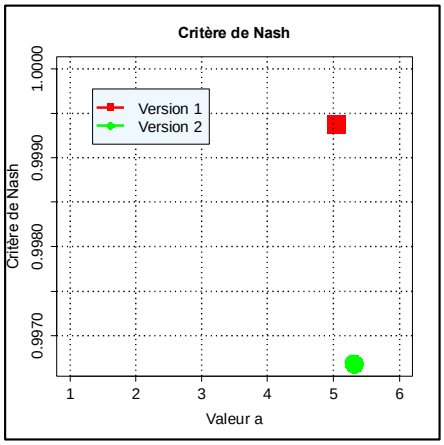
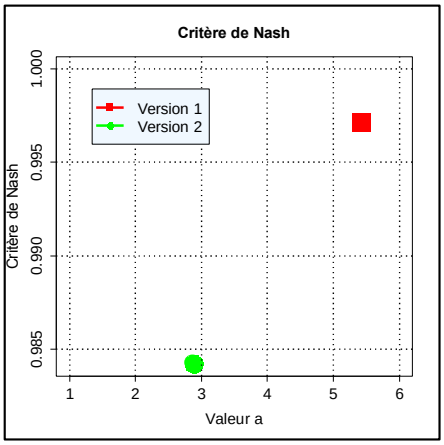
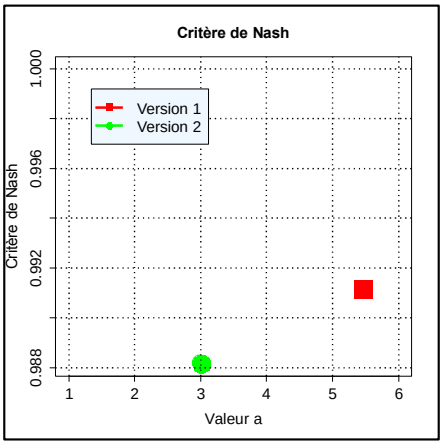
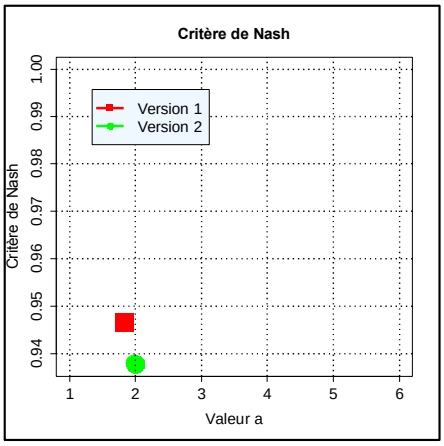
Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 32 : Critère de Nash - Sutcliffe du drainage pour les deux versions du modèle (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

III.3.2.2.4. Comparaison du stockage

Le même type d'analyse a été conduit sur une autre variable : la quantité d'eau stockée dans la colonne. Cette variable bien que complémentaire et liée au drainage, permet de vérifier si les estimations reproduisent l'ensemble des variables mesurables expérimentalement de façon absolue. Les graphiques des figures III – 33 à III – 37 présentent les mêmes types de graphiques que les figures III – 28 à 32 mais sur la variable de stockage dans la colonne.

Les courbes de stockage en condition à **capacité au champ** montrent des écarts minimes de l'ordre de 1 mm, mais les pentes lors de la phase de drainage principal entre la percée et la fin de pluie (~1000 – 5400 s) sont très similaires, avec seulement une légère différence pour Verger entre 1000 et 2000 s de la courbe simulée avec les données de l'imagerie. Les zooms montrent bien ceci. Les courbes RMSE montrent une différence plus grande (Verger) ou quasi égale (Collias) entre la donnée observée et celle simulée avec les images, ils sont de 1 à 2.10^{-3} m. Par contre les valeurs du Nash-Sutcliffe sont largement inférieures à 0,99 et entre 0,6 – 0,9 (Verger) et autour de – 2,5 pour Collias. Le stockage final (à la fin de la simulation) est très proche avec une variation d'environ 0,5 mm.

En condition humide, les courbes simulées sans les données de l'imagerie sont plus proches de la donnée observée que les courbes simulées avec l'imagerie, à l'exception de la colonne Lysimètre où les deux courbes sont plus proches l'une de l'autre que de la donnée observée. La courbe simulée présente le même pattern pour les trois sols : durant les 500 premières secondes, les données simulées sont quasi identiques et superposées à la donnée observée (superposition des courbes). Puis la pente est beaucoup plus grande dans le régime pseudo-stationnaire (phase pseudo-stationnaire). Le stockage final est là un peu plus variable et éloignée du stocke observé, d'environ 2 à 4 mm. Les courbes zoomées montrent ces mêmes constatations. Les courbes de RMSE montrent une plus grande différence pour les courbes simulées avec les données de l'imagerie, cependant les ordres de grandeurs sont conservés et sont autour de 4.10^{-3} m. Les valeurs de Nash-Sutcliffe sont très disparates, très proche de 1 dans le cas de Collias simulée à capacité au champ et sans les données de la tomographie, sinon pour toutes les autres comprises entre 0 et 0,4.

Dans le cas des simulations à **condition moyennement sèche**, les stockages observés et modélisés sans les données imagerie sont très proches. Le stockage simulé avec les données imagerie est proche à l'exception de la valeur maximale stockée juste avant l'arrêt de la pluie qui atteint un peu plus de 15 mm contre 13 mm pour les deux autres courbes. A part cette zone et la quantité d'eau stockée à la fin de simulation qui diffère de 2 mm environ, les pentes de la courbe sont très similaires. Les courbes zoomées montrent ces mêmes constatations. Les courbes du RMSE montrent une grande différence à l'exception de cette zone repérée précédemment, entre 0 et 4500 s les différences sont très semblables, au-delà de 4000 s la courbe simulée avec les donnée d'image montrent un plus grand RMSE ($RMSE\ 0 – 4000\ s$ = 1.10^{-3} m ; $RMSE > 4000\ s$ = 2.10^{-3} m (avec données image) et 1.10^{-3} m (sans les données image). Le critère de Nash-Sutcliffe montre là aussi de grandes différences entre les deux modalités de simulation, avec les données de l'imagerie ce critère est d'environ 0,92 alors que sans les données images ce critère est supérieur à 0,98.

Figure III – 33 : Evolution temporelle des courbes de stockage avec les deux versions du modèle et l'observation (trois sols et trois teneurs en eau initiales)

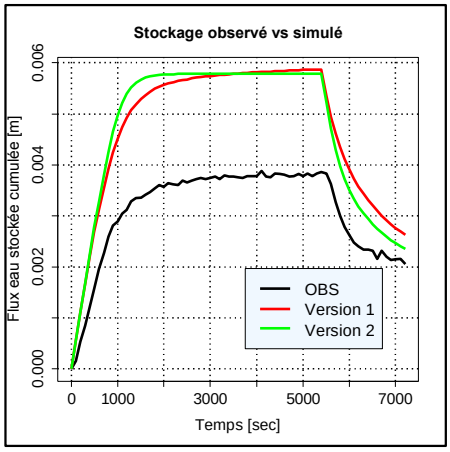
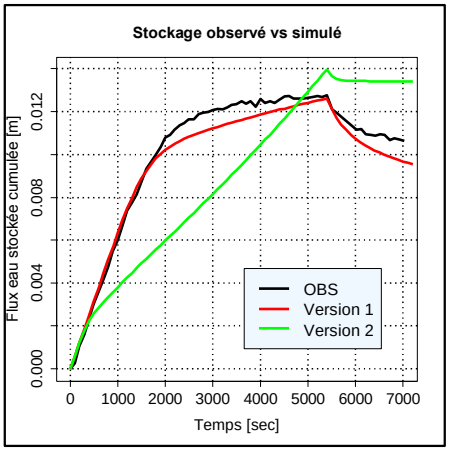
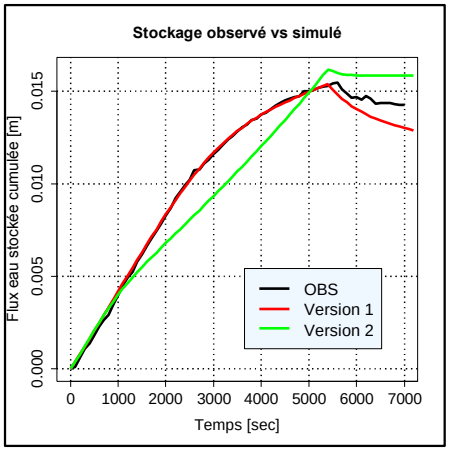
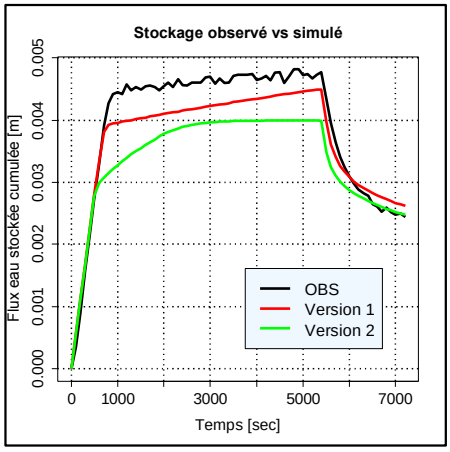
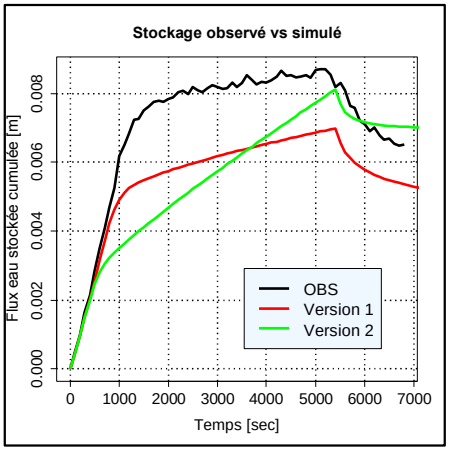
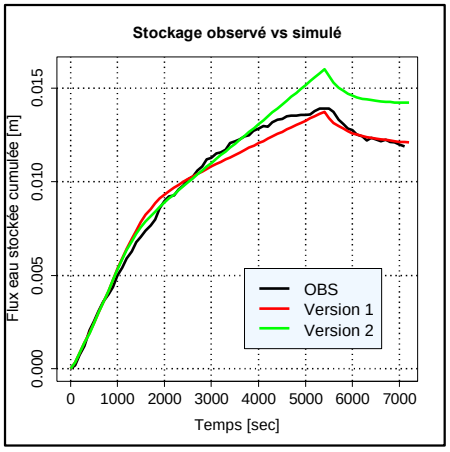
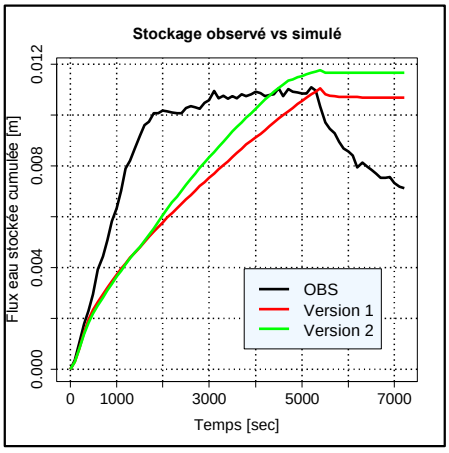
Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 34 : Evolution temporelle du stockage zoomée sur la percée avec les deux versions du modèle et l'observation (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

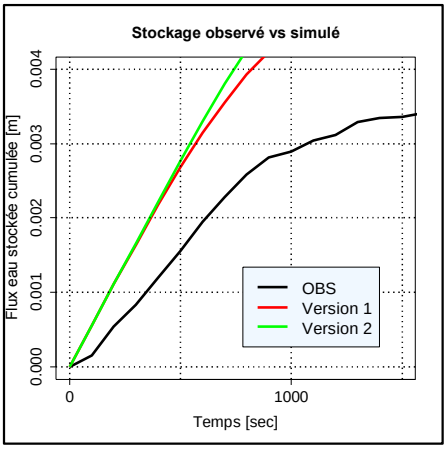
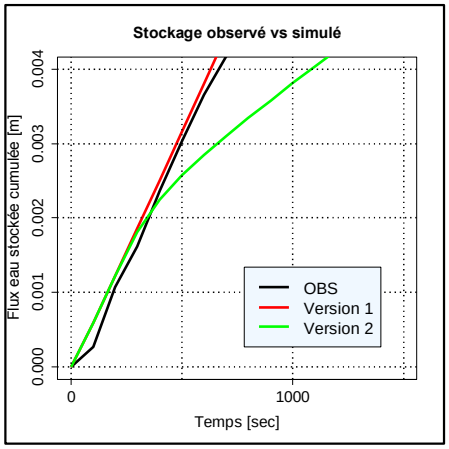
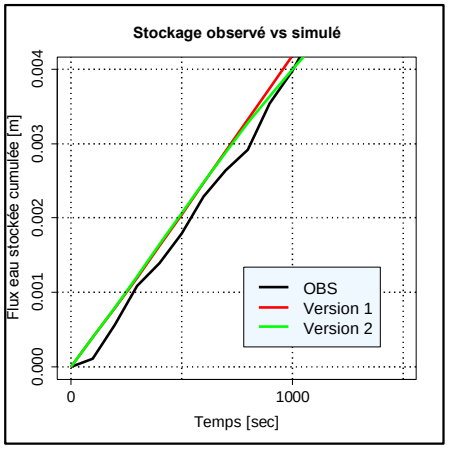
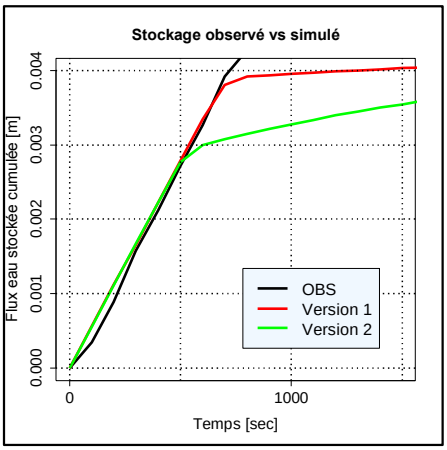
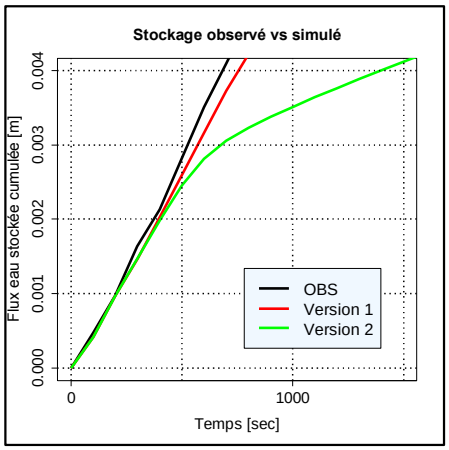
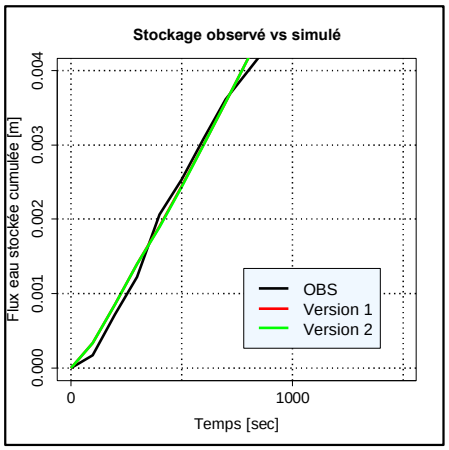
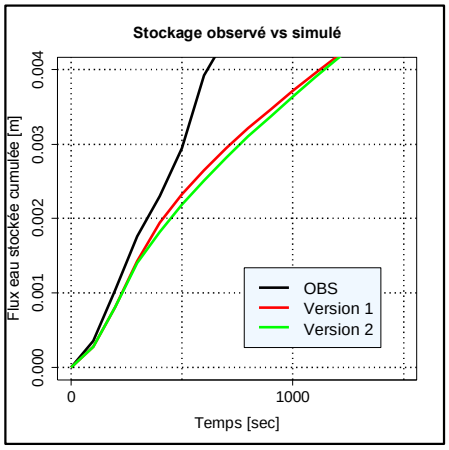
Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 35 : Evolution temporelle du stockage zoomée sur l'arrêt de l'apport d'eau avec les deux versions du modèle et l'observation (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

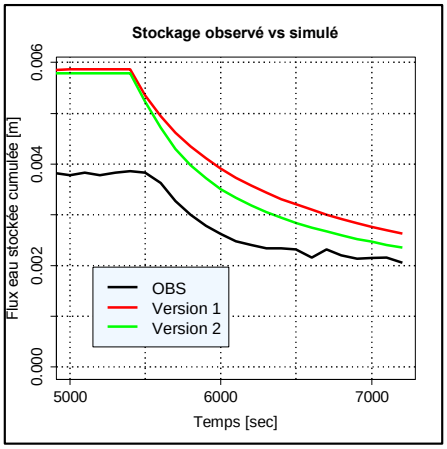
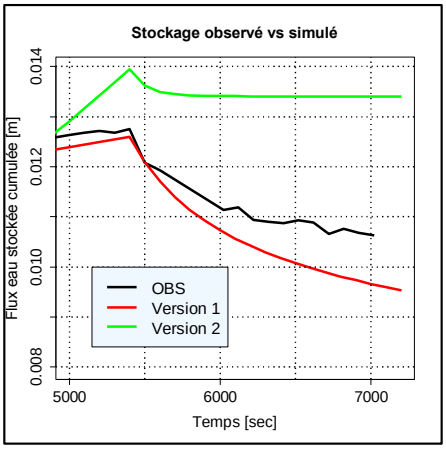
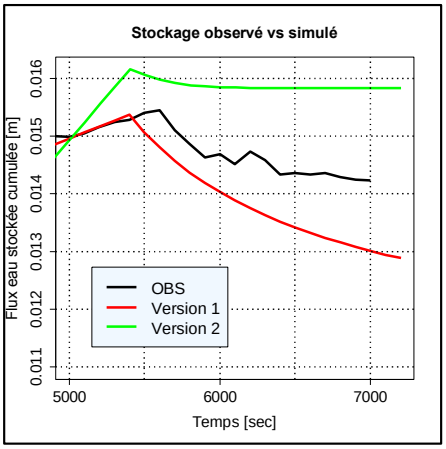
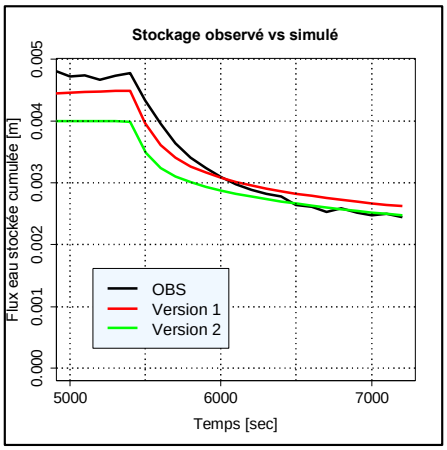
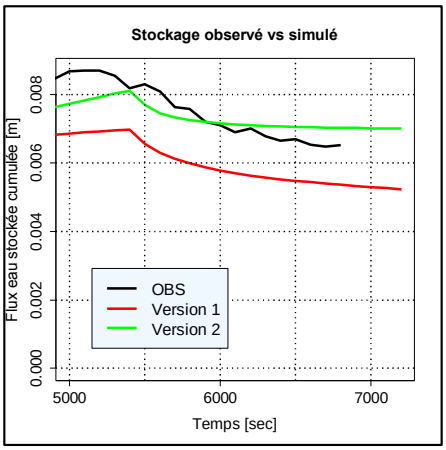
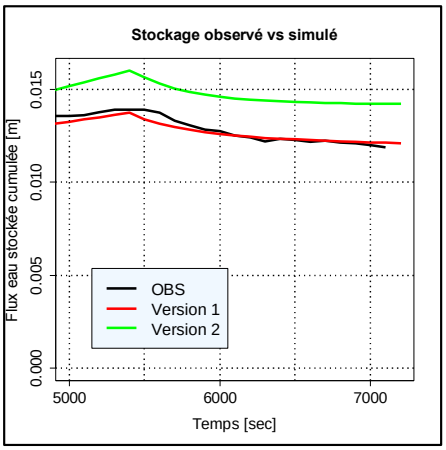
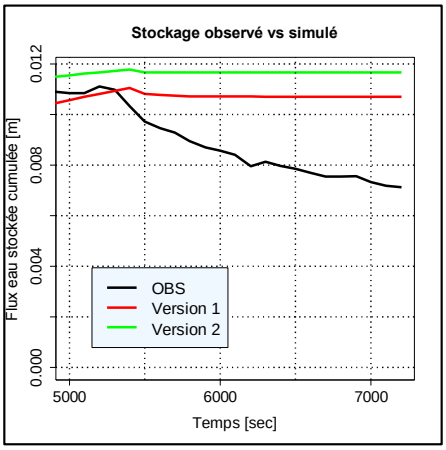
Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

Figure III – 36 : Evolution temporelle du RMSE du stockage avec les deux versions du modèle et l'observation (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

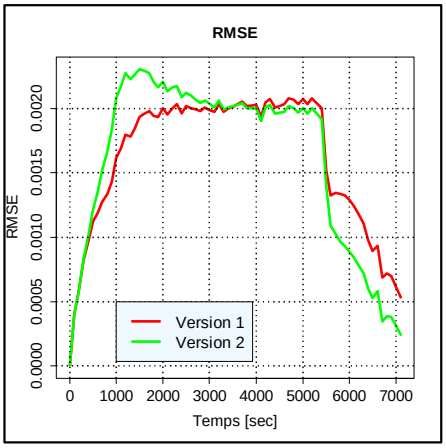
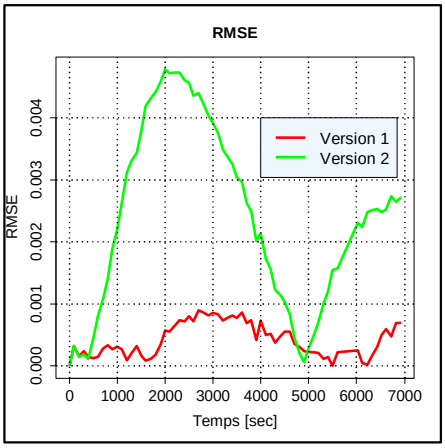
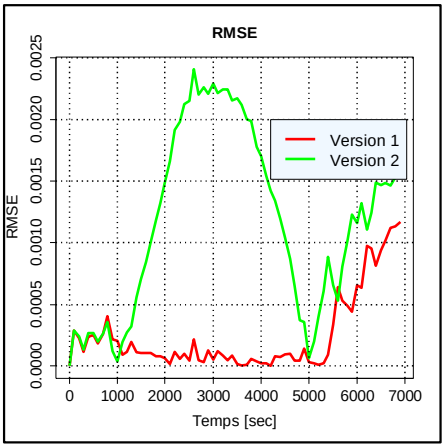
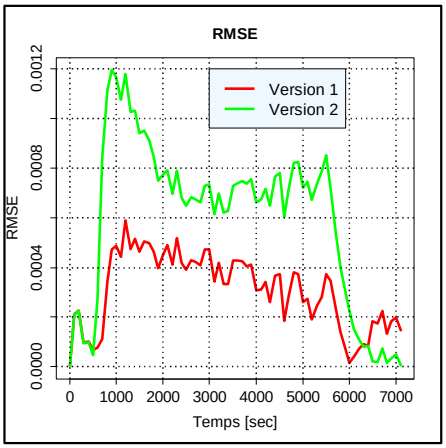
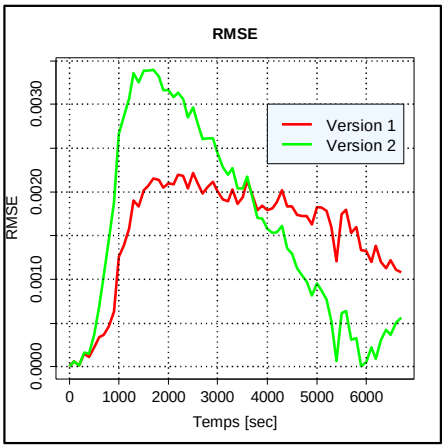
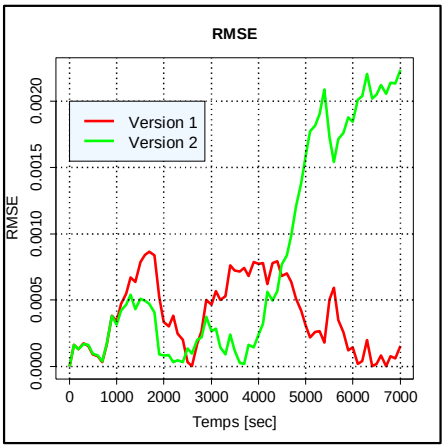
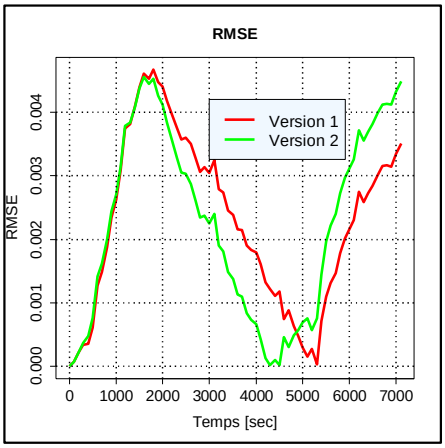
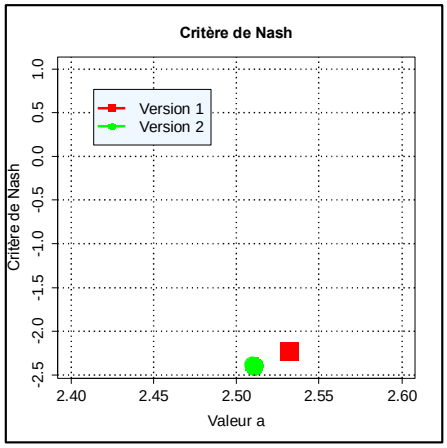
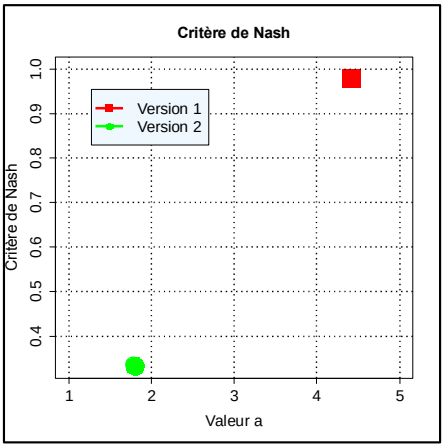
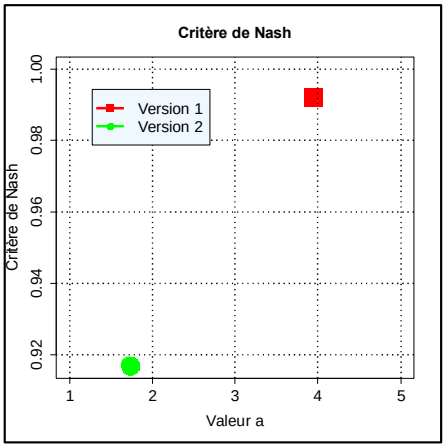
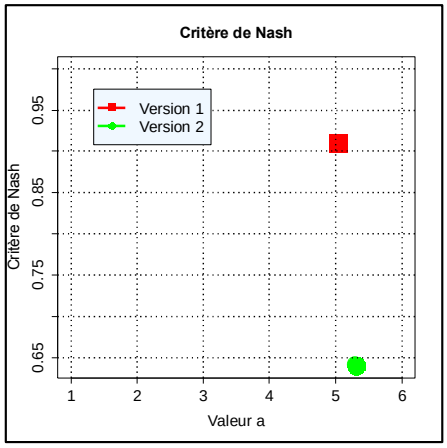
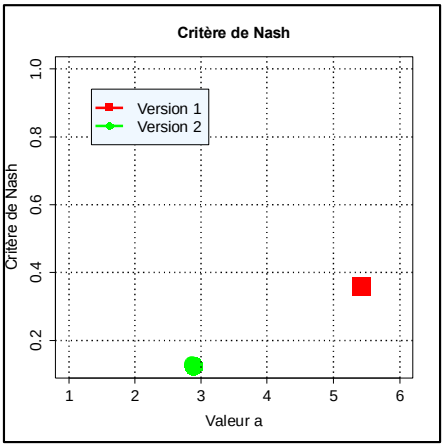
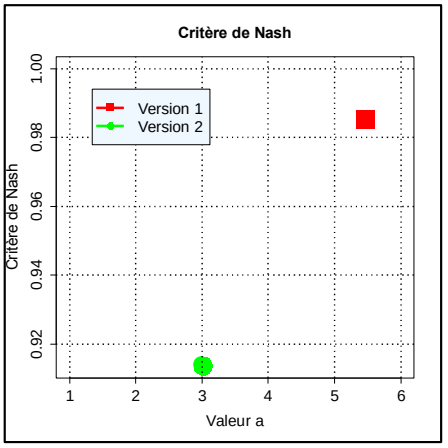
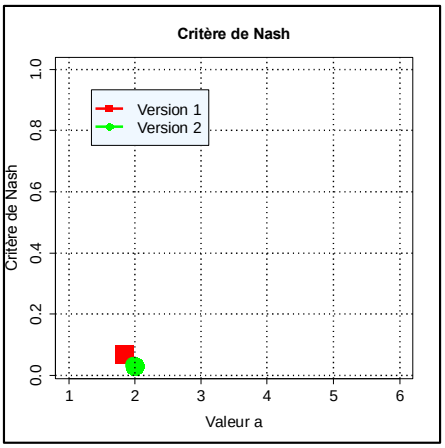
Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

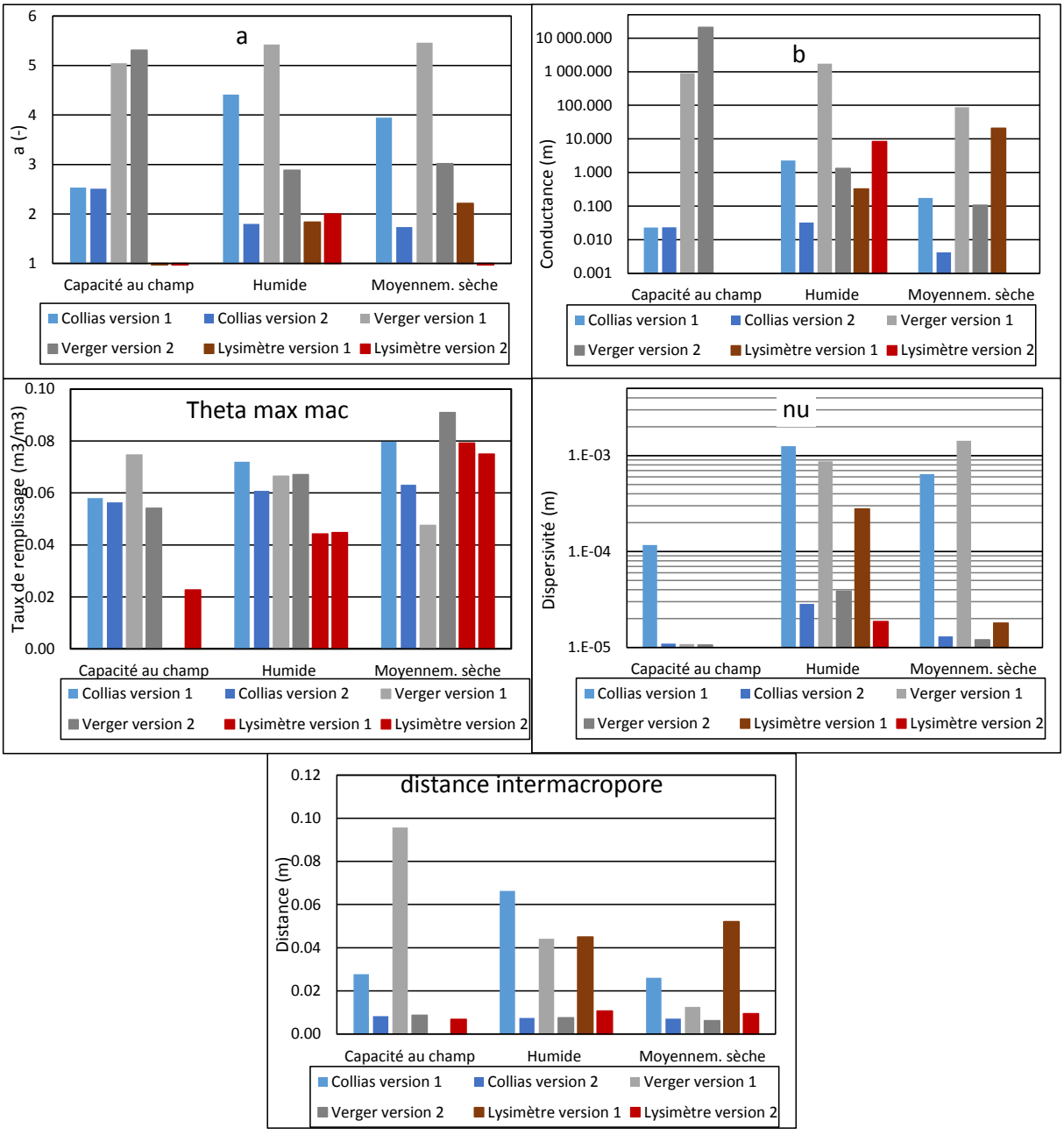
Figure III – 37 : Critère de Nash - Sutcliffe du stockage, pour les deux versions du modèle (trois sols et trois teneurs en eau initiales).

Sols \Teneur en eau initiale	Capacité au champ	Humide	Moyennement sèche
Collias			
Verger			
Lysimètre	ND		ND

III.3.3. Etude de l'évolution des paramètres selon les conditions initiales

Le tableau III – 15 présente les paramètres estimés pour les deux versions du modèle. La figure III – 38 montre les paramètres estimés sous forme « d'histogramme » selon la teneur en eau initiale de la colonne et en fonction de la version du modèle. Les valeurs de $\theta_{max-mac}$ et de la distance intermacropores dans la version avec l'utilisation de la donnée imagerie (version 2) sont les valeurs moyennes des profils mesurés sur les images afin de pouvoir comparer avec les valeurs estimées uniques (version 1).

Figure III – 38 : Evolution des paramètres selon la version du modèle et avec la teneur en eau initiale.



Le paramètre *a* [–], prend des valeurs similaires en conditions à capacité au champ pour les sols de Collias et Verger quelle que soit la version du modèle. Pour les conditions plus sèches, les valeurs de *a* sont semblables pour les mêmes sols et même version du modèle. Elles sont plus grandes lorsque la donnée image n'est pas utilisée (version 1) à l'exception des valeurs de *a* pour Lysimètre qui sont très proches que ce soit avec et sans la donnée image en condition humide.

Les valeurs estimées de *b* [$m.s^{-1}$] en condition à capacité au champ sont plus grandes pour Verger comparé à Collias quelle que soit la version du modèle. De manière générale, les valeurs estimées pour *b* quelle que soit la condition initiale et la version du modèle sont les plus grandes (maximum à 10^{+4} $m.s^{-1}$) mais diminuent avec la chute de teneur en eau initiale. Les valeurs de *b* obtenues pour Collias sont assez basses entre 10^{-2} et 1 $m.s^{-1}$. Pour le sol de Lysimètre, aucune tendance ne semble se dégager selon la teneur en eau initiale et/ou la version du modèle.

Le paramètre ν [m] est estimé à une valeur autour de 10^{-5} m quel que soit le sol, la teneur en eau initiale, pour le modèle utilisant les données de l'imagerie. Sans les données d'imagerie, les valeurs de paramètres sont plus disparates entre 10^{-5} et 10^{-3} m, mais ne présentent pas de tendance selon le type de sol ou selon teneur en eau initiale.

Le paramètre $\theta_{max-mac}$ [$m^3.m^{-3}$], depuis la plus grande teneur en eau vers la plus faible, aurait tendance à augmenter pour Collias et Lysimètre (seulement deux valeurs) mais à diminuer pour Verger, pour le modèle sans les données d'imagerie. Dans le cas du modèle utilisant l'imagerie, la valeur moyenne de ce paramètre aurait tendance à augmenter avec la diminution du teneur en eau initiale pour les trois sols.

Le paramètre de la distance intermacropores, *d* [m], montre de grandes différences selon la version du modèle utilisée. Dans le cas du modèle avec les données de l'imagerie, la valeur moyenne du paramètre est de 10^{-3} m (sauf Lysimètre condition humide à 10^{-2} m), avec une légère tendance à diminuer avec la chute de teneur en eau initiale. Dans le cas du modèle n'utilisant pas les données d'imagerie, l'ordre de grandeur de la distance est plus grand et est de 10^{-3} m, sans qu'une tendance nette se dégage selon la teneur en eau initiale.

En résumé, les ajustements ont permis de répondre aux questions posées. Le modèle Darcy-Richards – KDW est fonctionnel sur différents types de sols, et à différentes teneurs en eau initiales. Nous avons ajusté les paramètres de ce modèle sur 9 cas expérimentaux. A l'exception du sol argileux travaillé en condition à capacité au champ, les estimations ont pu être réalisées et fournissent des reconstitutions du drainage cumulé en bas de colonne et du stockage assez proches des observations. La seule limite établie du modèle couplé est pour le sol argileux travaillé en condition à capacité au champ, son cas est discuté plus en détail à la section IV.1. L'utilisation des profils de la distance intermacropores et de la macroporosité mesurés sur les images tomographiques dans le modèle couplé montre que les paramètres *d* et $\theta_{max-mac}$ du terme d'échange peuvent être remplacés par ces mesures sans dégrader fortement la capacité du modèle à simuler les expériences.

Tableau III – 15 : Valeurs des paramètres estimés dans les deux versions du modèle

Sols\Teneur en eau initiale		Capacité au champ (sans image)	Capacité au champ (avec images)	Humide (sans image)	Humide (avec image)	Moyennement sèche (sans image)	Moyennement sèche (avec images)
Collias	a	2,5	2,5	4,4	1,7	3,9	1,7
	$b\ [m.s^{-1}]$	$2{,}3.10^{-2}$	$2{,}3.10^{-2}$	2,2	$3{,}2.10^{-2}$	$1{,}7.10^{-1}$	$4{,}2.10^{-3}$
	$v\ [m]$	$1{,}1.10^{-4}$	$1{,}1.10^{-5}$	$1{,}2.10^{-3}$	$2{,}8.10^{-5}$	$6{,}4.10^{-4}$	$1{,}3.10^{-5}$
	$\theta_{max-mac}\ [-]$	0,058	0,056	0,072	0,060	0,079	0,063
	$dist\ [m]$	0,027	0,0083	0,066	0,0074	0,026	0,0072
Verger	a	5,0	5,3	5,4	2,8	5,4	3,0
	$b\ [m.s^{-1}]$	$9{,}1.10^{+2}$	$2{,}1.10^{+4}$	$1{,}7.10^{+3}$	1,3	$8{,}8.10^{+1}$	$1{,}1.10^{-1}$
	$v\ [m]$	$1{,}1.10^{-5}$	$1{,}1.10^{-5}$	$8{,}7.10^{-4}$	$3{,}8.10^{-5}$	$1{,}4.10^{-3}$	$1{,}2.10^{-5}$
	$\theta_{max-mac}\ [-]$	0,074	0,054	0,066	0,067	0,047	0,091
	$dist\ [m]$	0,095	0,0087	0,044	0,0075	0,012	0,0062
Lysimètre	a	ND	ND	1,8	2,0	2,2	ND
	$b\ [m.s^{-1}]$			$3{,}2.10^{-1}$	8,4	$2{,}1.10^{+1}$	
	$v\ [m]$			$2{,}7.10^{-4}$	$1{,}8.10^{-5}$	$1{,}7.10^{-5}$	
	$\theta_{max-mac}\ [-]$		0,022	0,044	0,045	0,079	0,075
	$dist\ [m]$		0,0069	0,045	0,011	0,052	0,0094