N° d'ordre NNT : 2025ENTP0015

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ENTPE
Membre de l'Université de Lyon

École Doctorale N° 206
Chimie, Procédés, Environnement

Spécialité / discipline de doctorat : Environnement

Soutenue publiquement le 18/12/2025, par :
Saint-Martin SAINT-LOUIS

Développement d'outils et méthodes infiltrométriques pour la caractérisation des sols urbains

---

Devant le jury composé de

GAUTIER, Mathieu	Professeur de l'INSA Lyon	Président du jury
BECHET Béatrice	Directrice de recherche DD	Rapportrice
HAMMECKER Claude	Chargé de recherche IRD	Rapporteur
DUWIG Céline	Chargé de recherche IRD	Examinatrice
LASSABATERE, Laurent	Ingénieur ICTPE ENTPE	Directeur de thèse
PREDELUS Dieuseul	Recteur Université d'Etat d'Haïti	Co-directeur de thèse
MAREUS Rubenson	Post-Doc Université d'Orléans	Co-encadrant de thèse

Remerciements

Je tiens avant tout à exprimer ma profonde reconnaissance à mes deux directeurs de thèse. En premier lieu, Laurent LASSABATÈRE, pour son soutien indéfectible, sa bienveillance, sa patience et surtout sa confiance. Merci pour les innombrables conseils, les corrections minutieuses et les accompagnements administratifs (au point qu'à certains moments, j'avais l'impression de préparer une thèse en administration, et je dois l'admettre, il avait raison : c'était une autre forme de formation à part entière).

Je lui suis également reconnaissant pour son aide dans mes démarches aussi bien en Haïti qu'en France, notamment pour trouver les moyens de séjour lors de mes séjours semestriels entre novembre 2021 et juillet 2024. Ses formations et ses orientations scientifiques ont constitué l'essence même du déroulement de cette thèse. Qu'il trouve ici le témoignage de ma plus vive gratitude.

En second lieu, Dieuseul PREDELUS, pour son accompagnement constant, son soutien moral et sa présence depuis le dépôt du dossier de bourse Anténor Firmin (financée par la Banque de la République d'Haïti (BRH) et l'Ambassade de France) jusqu'à la soutenance. Il lui suffit d'une minute pour dissiper mon stress et me redonner confiance. Sincèrement, sans lui et Laurent, cette soutenance n'aurait peut-être jamais eu lieu.

Je remercie chaleureusement les membres du jury d'avoir accepté de participer à cette étape décisive. Ma reconnaissance va particulièrement à Béatrice BECHET et Claude HAMMECKER, rapporteurs attentifs de cette thèse, ainsi qu'à Mathieu GAUTIER et Céline DUWIG, pour l'examen de mon travail et leurs échanges constructifs.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du comité de pilotage, Ghislain LIPEME-KOUYI et Rémy BAYARD, pour leurs conseils avisés et leur disponibilité.

Je souhaite remercier Gersende FERNANDES pour son accueil chaleureux au laboratoire dès mon arrivée. Elle a littéralement meublé mon appartement avant même que je ne m'y installe. Elle m'a initié au terrain, m'a accompagné tout au long de la thèse dans la maîtrise des outils de traitement de données et a su, par sa gentillesse, toujours deviner quand quelque chose n'allait pas chez Saint-Martin. Merci pour ta bonne humeur constante et ton amitié sincère.

Mes sincères remerciements vont aussi à Rubenson MAREUS, pour son soutien constant, ses relectures patientes et son accompagnement du début à la fin de cette aventure scientifique. J'adresse aussi mes remerciements à la Dr Gina RENOIS PREDELUS pour ses précieux conseils et ses échanges toujours enrichissants lors de nos discussions.

Je remercie la direction de l'ENTPE, en particulier Cécile DELOLME, pour son accueil et son appui, ainsi que la direction de la recherche (Luc DELATTRE, Francette PIGNARD et Sonia CÉNILLE) pour leur accompagnement attentif. Mention spéciale à Francette, toujours à la recherche d'une solution lorsque surgit un problème, et à Sonia, modèle de ponctualité, toujours prompte à m'informer et à me conseiller.

Ma gratitude s'adresse également à Jean-Philippe BEDELL, directeur du LEHNA-IAPHY, pour son accueil dès mon arrivée en France (et pour la première semaine passée chez lui), ainsi qu'à son épouse Valérie pour son hospitalité. Merci aussi à Nathalie MONDY, directrice du LEHNA, et à toute son équipe administrative pour leur accompagnement durant ces années.

Je remercie tous les membres du LEHNA et de l'équipe IAPHY pour l'ambiance conviviale et les riches échanges scientifiques. Merci à Rafael ANGULO-JARAMILLO, Brice MOURIER, Yves PERRODIN, Anne-Laure BADIN, mais aussi André-Marie, Laurence, Katharina, Gabrielle, Raphaël, Mélanie, Myriam, Thibaut, Olivier, Alain, Thierry et Claude pour les discussions, les repas partagés, les cafés et les éclats de rire.

Un grand salut aux doctorants : Zoé, Nathalie, Augustine, Swann, Manon, Lizeth, David, Florent et aux stagiaires de M1 et M2, notamment Fasnet BONCOURAGE, dont le stage a contribué à l'un des trois axes de cette thèse et a débouché sur un article scientifique. Vous m'avez fait sentir que même le "vieux Saint-Martin" pouvait encore bien s'amuser en équipe (rire).

Un mot spécial pour Alicia NAVEROS EUPHROSINE, toujours disponible pour m'écouter, régler mes démarches administratives et chercher à me redonner le sourire, surtout quand la situation en Haïti devenait inquiétante. Merci aussi à Daniel DONZE et Thérèse BASTIDE et Anne-Laure BADIN pour leur accompagnement sur le terrain et leurs conseils toujours pertinents.

Ma reconnaissance va à l'Ambassade de France, Campus France et à la Banque de la République d'Haïti (BRH), pour l'octroi de la bourse Anténor Firmin qui m'a permis de réaliser ce rêve doctoral, ainsi qu'à l'École Universitaire de Recherche des Sciences de l'Eau et des Hydrosystèmes (EUR-H2O) pour son soutien lors de la prolongation de ma thèse. Je remercie également le Laboratoire des Sciences pour l'Environnement et l'Énergie (LS2E-ENS) et la direction de l'École Normale Supérieure d'Haïti, en particulier Dr Jean Wilner PETIT, Dr Jean Rony MÉDY, Alvarès LOUIS et Bérard CÉNATUS, pour leur accompagnement administratif.

Merci à Simone, Deniz et toute l'équipe qui ont contribué au développement des variantes de l'algorithme BEST, ainsi qu'à Rémi et Pauline de l'INRAE pour les bons moments partagés aux colloques EGU 2023 et 2024 à Vienne.

Je n'oublie bien évidemment pas de remercier mes très chers amis, en particulier Marc AMICY, un ami, un frère, ainsi que sa famille, et Andestand DAVILMA, un ami, un cousin, un frère, pour leur soutien constant, sous toutes ses formes, qu'il ait eu un impact direct sur la thèse ou qu'il ait contribué à m'aider à surmonter les moments susceptibles de me perturber au cours de ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à la famille Wilkens LUBIN, ma petite cousine Christine LUBIN, une famille toujours disponible, prête à mettre tout ce qu'elle possède à ma disposition pour me permettre de travailler dans de bonnes conditions, de me sentir à l'aise et de poursuivre la thèse sans difficulté.

Je souhaite également remercier la famille Breus JONAS pour son soutien moral et la confiance sincère qu'elle a toujours placée en moi.

Ma reconnaissance va aussi à Emmanuel MILORD, un compagnon de réflexion et un frère de cœur, toujours présent pour des échanges enrichissants, tant sur nos travaux de recherche que sur les sujets du quotidien, notamment lors des périodes particulièrement difficiles pour la population haïtienne. J'ai partagé avec lui de très bons moments à Paris et à Lyon, empreints de solidarité et d'amitié.

Je souhaiterais remercier de tout cœur Misson ST JUSTE, Saulvy POLIMUS, Abe-Lunique JOSEPH, Guerlène EXALUS, Eliana PAPOULOUTE et Mme Ginette ULYSSE, une équipe solide, toujours là pour me soutenir, me réconforter et m'apporter leur présence bienveillante tout au long de cette aventure doctorale.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille, véritable pilier de ma vie : mes frères et sœurs (Fisnel, Baselais, Cherlourde, Milouse et leurs familles), mes cousins et cousines (Claudien, Julmice, Phalex, Bricely, Annette, Sylmise, Louisamène), mes oncles et tantes (Reynold SAINT-JUSTE, Luckner VAL, Leonne OSIAS, Marie DAVILMAR et tant d'autres).

Merci aussi à mes amis de longue date (Faustin PAUL, Dr VIXAMAR, Dr DÉLICE, Ing. JOURDAIN, la famille Daniel ETIENNE (mamie Daniel), Emmanuel VENANT, la famille MÉRAT Woody, Enel DERUISSEAU Smith MEZIUS, Edgard ALCIUS ; Ketly FLEURIMOND, Asline MATHIEU, Ashley ADRIEN ; Pasteur Smith et la famille Jhéry JOSEPH et tant d'autres). Comme disent souvent certains : "Saint-Martin, c'est l'homme du peuple !", et c'est sans doute pour cela que j'ai tant de personnes à remercier, même si je ne cite ici qu'une fraction de ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Enfin, je rends grâce au Grand Dieu de l'univers pour sa protection, sa lumière et sa force tout au long de ce parcours. Et une pensée toute particulière pour un cousin, un frère, un compagnon, dont je garde le nom dans mon cœur. Il a été présent dès les premières démarches de cette thèse.

À ma future fiancée, quelque part dans ce vaste monde : merci d'avance. Tu verras qu'il valait mieux arriver après la thèse ; avant, tu aurais dû partager les insomnies, les doutes et les cafés froids ! Ton heure viendra, avec plus de sérénité et moins de corrections à relire.

Résumé

La caractérisation hydrodynamique des sols constitue une étape préalable et essentielle à la compréhension des flux d'eau et des transferts de polluants dans la zone non saturée. Les propriétés hydrodynamiques des sols sont ainsi mobilisées pour prédire l'infiltration de l'eau, le ruissellement en surface, la recharge des nappes ainsi que les risques de contamination associés. Elles jouent un rôle déterminant dans l'aménagement des espaces urbains et agricoles, la gestion des ressources en eau et des eaux pluviales en milieu urbain. Dans le cadre de cette thèse, nous avons étudié la méthode Beerkan et les algorithmes BEST permettant le traitement des données infiltrométriques et la caractérisation des propriétés hydrauliques des sols. Nous nous sommes en particulier intéressés à deux déclinaisons de la méthode Beerkan : la méthode manuelle classique et une version automatisée reposant sur un prototype d'infiltromètre spécialement développé en amont de ce travail. Nous avons également exploré de nouvelles approches de traitement mathématique des observations adaptées à des configurations particulières et à des processus physiques spécifiques (notamment l'hydrophobicité des sols). Ce manuscrit est structuré autour de trois axes : (i) une étude comparative entre la méthode Beerkan classique et la version automatisée, (ii) une analyse de l'influence du rayon de l'infiltromètre sur la qualité des données, (iii) une application à un large ensemble de sites expérimentaux au sein d'un même tissu urbain, permettant de tester la version automatisée et de valider la série des algorithmes BEST, y compris leurs développements récents. Les résultats obtenus apportent plusieurs enseignements.

L'infiltromètre automatisé présente de nombreux avantages par rapport à la méthode classique, en termes de précision, de reproductibilité et de facilité d'utilisation. Toutefois, la méthode manuelle conserve toute sa pertinence dans les contextes de ressources limitées. Par ailleurs, la taille de l'infiltromètre s'avère déterminante : un rayon plus important favorise l'activation des réseaux de macropores et permet ainsi de mieux prendre en compte les écoulements préférentiels. Enfin, le déploiement sur de nombreux sites a permis de valider l'approche, avec des résultats satisfaisants dans la majorité des cas. Cette étude souligne enfin la nécessité de poursuivre le développement d'algorithmes alternatifs pour mieux représenter les écoulements particuliers, en particulier dans le cas de sols hydrophobes.

Mots clés : Infiltromètre, modélisation, Infiltration de l'eau, sols urbains, caractérisation hydrodynamique.

Abstract

The hydrodynamic characterization of soils is a preliminary and essential step in understanding water fluxes and pollutant transfers within the unsaturated zone. Soil hydrodynamic properties are thus used to predict water infiltration, surface runoff, groundwater recharge, and the associated contamination risks. They play a decisive role in the planning of urban and agricultural areas, as well as in the management of water resources and stormwater in urban environments. As part of this thesis, we investigated the Beerkan method and the BEST algorithms, which enable the processing of infiltrometric data and the characterization of soil hydraulic properties. We specifically focused on two variants of the Beerkan method: the traditional manual approach and an automated version based on an infiltrometer prototype specifically developed prior to this work. We also investigated new mathematical approaches to data processing, adapted to particular configurations and specific physical processes (notably soil hydrophobicity). This manuscript is structured around three main axes: (i) a comparative study between the classical and automated Beerkan methods, (ii) an analysis of the influence of the infiltrometer radius on data quality, (iii) an application to a large number of experimental sites within the same urban fabric, allowing us to test the automated version and validate the series of BEST algorithms, including their recent developments. The results provide several insights. The automated infiltrometer presents numerous advantages over the classical method, particularly in terms of accuracy, reproducibility, and ease of use. However, the manual method remains highly relevant in contexts with limited resources. Furthermore, the size of the infiltrometer proves to be crucial: a larger radius promotes the activation of macropore networks and thus better accounts for preferential flow. Finally, deployment across numerous sites validated the approach, with satisfactory results in the majority of cases. This study also highlights the need to continue developing alternative algorithms to better represent specific flow processes, particularly in hydrophobic soils.

Keywords: Infiltrometer, modeling, water infiltration, urban soils, hydrodynamic characterization.

Table des matières

Remerciements i

Résumé vi

Abstract viii

Table des matières x

I Introduction 1

II État de l'Art et revue de la littérature 5

II.1 Modification du cycle hydrologique en ville 5

II.2 Cycle hydrologique naturel 5

II.2.1 Processus hydrologiques 5

II.2.2 Bilan hydrologique 5

II.3 Effets de l'anthropisation 7

II.4 Cas des eaux pluviales en milieu urbain 9

II.4.1 Techniques alternatives 10

II.4.2 Zonage Pluvial 11

II.5 Le sol 13

II.5.1 Sol urbain 13

II.5.2 Eléments de pédologie 14

II.5.3 Le sol et ses constituants 16

II.5.4 Porosité du sol et écoulements 20

II.5.5 Physico-chimie et écoulements 21

II.6 Le sol et l'eau 22

II.6.1 Courbe de rétention d'eau 22

II.6.2 Courbe de conductivité hydraulique 26

II.7 Écoulement et conditions d'équilibre hydrostatique 29

II.7.1 Équilibre hydrostatique dans le sol 29

II.7.2 Modélisation de l'écoulement dans le sol 30

II.7.3 Écoulements particuliers et préférentiels 34
II.8 Dispositifs d'infiltration 36
II.8.1 Le perméamètre de Guelph 38
II.8.2 Le perméamètre de Philip-Dunne 39
II.8.3 L'infiltromètre à simple anneau 39
II.8.4 L'infiltromètre à double anneau 40
II.8.5 L'infiltromètre à disque 40
II.8.6 La méthode Beerkan 41
II.9 Conclusions de l'état de l'art et introduction de la problématique scientifique 47
III Matériels et Méthodes 48
III.1 Méthodologie générale et sites 49
III.1.1 Comparaison des méthodes manuelle et automatisée de l'essai Beerkan 49
III.1.2 Effet de la taille de l'anneau sur l'infiltration et l'activation des macropores 50
III.1.3 Robustesse de l'infiltromètre automatisé et relation entre biodiversité et infiltration . 51
III.2 Présentation des outils d'études pour la caractérisation hydrodynamique des sols 53
III.2.1 Méthode Beerkan classique 53
III.2.2 Infiltromètre automatisé 54
III.2.3 Infiltromètre de grande taille INFILTRON 57
III.3 Protocole expérimental 58
III.3.1 Protocole expérimental l'axe 1 : comparaison des méthodes Beerkan 58
III.3.2 Protocole expérimental de l'axe 2 : effet de la taille de l'anneau 59
III.3.3 Protocole expérimental de l'axe 3 : déploiement à grande échelle 60
III.4 Traitement en laboratoire 61
III.4.1 Masse volumique sèche et teneur en eau 61
III.4.2 Analyse granulométrique 61
III.5 Traitement des infiltrations par les algorithmes BEST 62
III.5.1 Traitement des données granulométriques 63

III.6 Outils de traitement des données et d'analyse statistique 63
III.6.1 Outils statistiques et méthode pour le traitement des données 63
III.6.2 Présentation des outils et tests statistiques utilisés 64
III.6.3 Logiciels utilisés 69
IV Résultats et discussions 71
IV.1 Comparaison des méthodes Beerkan manuelle et automatisée 71
IV.1.1 Caractérisation physique des différents sites à l'ENTPE 72
IV.1.2 Teneur en eau à saturation et paramètres de forme 74
IV.1.3 Courbes d'infiltration cumulées selon les méthodes 75
IV.1.4 Analyse ces courbes d'infiltration 86
IV.1.5 Estimation des paramètres BEST Sites-ENTPE 91
IV.1.6 Analyse statistique des paramètres hydrodynamiques h_g et K_s 116
IV.1.7 Comparaison des deux méthodes sur un sol sableux homogène (sites sénégalais) ... 121
IV.1.8 Synthèse et discussion – axe 1 124
IV.2 Effet de la taille de l'anneau sur la caractérisation hydraulique des sols urbains 126
IV.2.1 Approche méthodologique et cadre expérimental 126
IV.2.2 Caractérisation physique des sites 128
IV.2.3 Courbes d'infiltration cumulées selon la taille de l'anneau 128
IV.2.4 Analyse des taux d'infiltration (IR) 130
IV.2.5 Estimations BEST sur les courbes d'infiltration du site IUT 132
IV.2.6 Influence de l'anneau sur les paramètres hydrodynamiques K_s et h_g 144
IV.2.7 Synthèse et discussion – axe 2 146
IV.3 Robustesse de l'infiltromètre automatisé et des algorithmes BEST en contexte urbain ... 149
IV.3.1 Caractérisation physique des différents sites 149
IV.3.2 Résultats des courbes d'infiltration des sites étudiés 150
IV.3.3 Analyse des taux d'infiltration 152
IV.3.4 Ajustement de l'algorithme BEST 155

IV.3.5 Synthèse et discussion – axe 3 171

V Conclusion générale 177

VI **Bibliographie** 180

VII ANNEXE 191

VII.1 Les scripts pour l'axe 1 191

VII.1.1 Script_R_1_PSD.R 191

VII.1.2 Script_R_2_Rhod_thetai.R (Scripts des caractérisations du sol) 198

VII.1.3 Script_R_3a_Infiltrations_data. R 204

VII.1.4 Scripts_R_3b_BEST_Input.R 208

VII.1.5 Script_R_3c_Infiltrations_graphs.R 211

VII.1.6 Script_R_4a_Analysis.R 218

VII.1.7 Script_R_5_comp_BEST_V2.R 227

VII.1.8 Script_R_6_dist_BEST_V2.R 236

VII.1.9 Les scripts Scilab pour l'extraction des données brutes d'infiltration (Data-treatment_scilab_V6) 242

VII.1.10 Les scripts de Scilab_2_BEST-V003 (BEST_main.sce) 248

VII.1.11 Les scripts Scilab_2_BEST-V004 (BEST_main.sce) 249

VII.2 Figures d'estimation des algorithmes BEST des paramètres hydrodynamiques pour l'axe2-3 de 50 et 100% du jeu de données grand et petit anneau 250

VII.2.1 Figures d'estimation des algorithmes BEST des paramètres hydrodynamiques pour l'axe 3 de 50 et 100% du jeu de données du petit anneau 250

VII.2.2 Figures d'estimation des algorithmes BEST des paramètres hydrodynamiques pour l'axe 2 de 50 et 100% du jeu de données du grand Anneau 251

VII.3 Les différentes valeurs des paramètres de forme et d'échelle de l'algorithme BEST pour les sites du troisième axe. 252

Liste des Figures

Figure II-1. Cycle hydrologique : composantes et processus (Sébastien 2022) 6

Figure II-2 Paysage marqué par l'érosion hydrique sévère dans une zone aride. Cette forme d'érosion, amplifiée par les activités humaines telles que l'agriculture intensive et la déforestation, illustre l'impact de la dégradation des sols sur les écosystèmes et les services écosystémiques associés. (Amundson et al. 2015 ; Montgomery 2007)..... 8

Figure II-3. Profil pédologique et différents horizons constitutifs du sol (© Barot). 15

Figure II-4. Représentation des trois phases du sol, avec les parties en noir représentant les solides, en blanc les gaz et en gris les liquides (Sojka and Upchurch 1999)..... 16

Figure II-5. Photographie filtrée montrant la traçabilité du colorant Rhodamine WT (tons les plus sombres) dans le sous-sol argileux (série Denchworth) à Grendon Underwood, Oxford, Royaume-Uni. (Beven and Germann 2013) 21

Figure II-6. Exemples de courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour différents jeux de propriétés hydrodynamiques, en fonction de la valeur du paramètre m (Lassabatere et al., 2023)..... 29

Figure II-7. Représentation des distributions de la pression, de la gravité et de la charge totale dans un système en équilibre hydrostatique dans un tube..... 30

Figure II-8. schéma de l'infiltration d'un profil hydrique selon Green et Ampt (Vereecken et al. 2019) 32

Figure II-9. Différents scénarios d'infiltration et d'écoulements préférentiels. (Vereecken et al. 2019) 35

Figure II-10. Différents dispositifs d'infiltration, avec (a) la méthode Beerkan, (b) l'infiltromètre à tension, (c), le perméamètre de Guelph, (d) l'essai simple anneau avec dispositif automatisé, et (e)l'essai double anneau..... 37

Figure III-1. Site2 de l'ENTPE..... 50

Figure III-2. Localisation des sites expérimentaux investigues en 2021 (sites en bleu) et en 2022 (sites en violet) 51

Figure III-3. Illustration d'expérimentation sur les sites investigués 52

Figure III-4. Infiltromètres automatisés: a) capteur de pression différentielle, b) système d'acquisition de données, c) têtes du réservoir pour les parties haute et basse, d) infiltromètre dans son ensemble, e) détails du réservoir parties haute et basse, f-g) plan du trépied. 55

Figure III-5. Déploiement des infiltromètres automatisés sur le terrain 56

Figure III-6. Déploiement de l'infiltromètre INFILTRON sur le site de la Doua (droite) et à l'ENTPE (gauche)..... 57

Figure III-7. Photos des infiltromètres sur le site et d'un transect avec quatre emplacements identifiés pour les infiltrations (en haut), ainsi qu'un schéma global de la méthodologie, présentant la réalisation des essais Beerkan et Beerkan automatisés sur deux transects adjacents, suivie de l'inversion des essais quelques jours plus tard..... 59

Figure III-8. Réalisation des essais grand anneau (gauche) et petit anneau (droite) sur deux sites différents. La grille installée autour des anneau sert pour la mesure au radar géologiue. 60

Figure III-9. pesage des échantillons pour les mesures de teneur en eau (gauche) et granulomètre laser Mastersizer 3000 pour la détermination des distributions granulométriques (droite). 62

Figure III-10. Trois variantes classiques de la méthode BEST, BREST-Slope, BEST-Intercept, et BEST-Steady. Les points pleins sont ceux qui ont été sélectionnés pour décrire le régime asymptotique (régime permanent). Les points sont les données expérimentales et les lignes les données modélisées. Illustration à partir de données générées analytiquement. ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure IV-1. Teneurs en argile a), silt b), et sable c), triangle des textures d), représentations des différentes textures e), et masses volumiques apparentes f). 73

Figure IV-2. Boîtes à moustaches des paramètres hydrodynamiques pour chaque site : teneur en eau à saturation θs (a), paramètre de forme n (b), et paramètre η (c). Chaque boîte s'étend du premier au troisième quartile, la ligne centrale indique la médiane, les moustaches couvrent l'intervalle typique des données, et les points isolés signalent des valeurs atypiques. 75

Figure IV-3. Données pour le site S1 avec les courbes d'infiltration obtenues avec la méthode Beerkan, B (colonne 1), Beerkan Automatisée, AB (colonne 2) et superposition des données (colonne 3). 77

Figure IV-4. Superposition des données et estimation des valeurs pour les deux types d'infiltration aux même temps (colonne 1), erreur relative (colonne 2), pour les quatre transects du site 1. 78

Figure IV-5. Données pour le site S2 avec les courbes d'infiltration obtenues avec la méthode Beerkan, B (colonne 1), Beerkan Automatisée, AB (colonne 2) et superposition des données (colonne 3). 80

Figure IV-6. Superposition des données et estimation des valeurs pour les deux types d'infiltration aux même temps (colonne 1), erreur relative (colonne 2), pour les deux transects du site 2. 81

Figure IV-7. Données pour le site S3 avec les courbes d'infiltration obtenues avec la méthode Beerkan, B (colonne 1), Beerkan Automatisée, AB (colonne 2) et superposition des données (colonne 3). 82

Figure IV-8. Superposition des données et estimation des valeurs pour les deux types d'infiltration aux même temps (colonne 1), erreur relative (colonne 2), pour les deux transects du site 3. 83

Figure IV-9. Données pour le site S4 avec les courbes d'infiltration obtenues avec la méthode Beerkan, B (colonne 1), Beerkan Automatisée, AB (colonne 2) et superposition des données (colonne 3). 84

Figure IV-10. Superposition des données et estimation des valeurs pour les deux types d'infiltration aux même temps (colonne 1), erreur relative (colonne 2), pour les deux transects du site 4. 85

Figure IV-11. Boxplots du taux d'infiltration pour les différents facteurs, avec l'effet dispositif (b), l'effet site (c), l'interaction méthode : site illustrant l'effet site lorsqu'on utilise la méthode Beerkan et ce même effet lorsqu'on utilise la méthode AB..... 89

Figure IV-12. Résultats de BEST-Slope pour un point de chaque site (S1, S2, S3 et S4) ; chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) aisni que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 93

Figure IV-13. Résultats de BEST-Intercept pour un point de chaque site (S1, S2, S3 et S4) ; chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) aisni que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 96

Figure IV-14. Résultats de BEST-Steady pour un point de chaque site (S1, S2, S3 et S4) ; chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) aisni que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 99

Figure IV-15. Résultats de BEST-WR pour un ensemble de points présentant des données convexes nécessitant l'utilisation des algorithmes BEST-WR. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) aisni que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 103

Figure IV-16. Résultats de BEST-WR3T pour un ensemble de points présentant des données convexes nécessitant l'utilisation des algorithmes BEST-WR. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 106

Figure IV-17. Résultats de toutes les méthodes BEST pour le cas du point 3 du transect T1 du site S3. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)..... 107

Figure IV-18. Valeurs de $\boldsymbol{Ks}$ obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence $\boldsymbol{Ks}$.et droites de régression..... 109

Figure IV-19. Valeursde Ks en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites). 110

Figure IV-20. Valeursde h_g en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR, et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites). 112

Figure IV-21. Valeursde h_g en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites). 113

Figure IV-22. Droite de Henry et distributions des valeurs de hg et Ks, en version brute et log. 115

Figure IV-23. boxplots des valeurs de K_s pour les différents facteurs, avec l'effet méthode (b), l'effet site (c), l'interaction méthode : site illustrant l'effet site lorsqu'on utilise la méthode Beerkan et ce même effet lorsqu'on utilise la méthode AB. 119

Figure IV-24. boxplots des valeurs de h_g pour les différents facteurs, avec l'effet méthode (b), l'effet site (c), l'interaction méthode : site illustrant l'effet site lorsqu'on utilise la méthode Beerkan et ce même effet lorsqu'on utilise la méthode AB. 120

Figure IV-25. Superposition des données pour les deux types d'infiltration, données Beerkan (méthode B, points rouges) et données obtenues avec l'infiltromètre (méthode AB, lignes continues bleues), sites sénégalais 122

Figure IV-26. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST pour site sénégalais. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 124

Figure IV-27. Courbes d'infiltration cumulées obtenues avec le petit anneau (points verts) et avec le grand anneau (courbes bleues) pour les quatre sites. 129

Figure IV-28. Boites à moustaches des taux d'infiltration IR (mm/h) pour les différents sites investigués : (a) ENTPE : Site 1 ; (b) ENTPE Site 2 ; (c) les tranchées de la Doua et (d) Bassin d'infiltration de l'IUT. Les données hors distribution sont tracés sous forme de point. 130

Figure IV-29. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST versions BEST-Slope, Intercept et Steady pour le site de l'IUT. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 133

Figure IV-30. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST pour site sénégalais. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%). 135

Figure IV-31. Valeurs de $\boldsymbol{Ks}$ obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence $\boldsymbol{Ks}$.et droites de régression..... 137

Figure IV-32. Valeursde Ks en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites). 138

Figure IV-33. Valeurs de hg obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence hg.et droites de régression. 139

Figure IV-34. Valeursde Ks en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites). 141

Figure IV-35. Droite de Henry et distributions des valeurs de hg et Ks, en version brute et log. 143

Figure IV-36. Différences de valeur du paramètre d'échelle du potentiel de pression, h_g (mm) et de conductivité hydraulique à saturation (mm/h). entre les deux tailles d'anneau (petit versus large).. 144

Figure IV-37. (a) résultats de modélisation numérique de l'infiltration dans un sol macroporé en fonction de la taille de l'anneau ; en haut : domaines numériques étudiés incluant une matrice avec une géométrie donnée de macropore, A macropore droit situé à 8 cm de l'axe central et B macropore tortueux ; (b) résultats en termes de teneur en eau et de flux d'eau dans le sol en fonction du rayon de l'anneau (r_d) pour un sol homogène (gauche) et le système macroporé de type A (droite) (Fernandes (2023) et Saint-Louis et al.,(2023) 147

Figure IV-38. Courbes d'infiltration avec en abscisse le temps en minutes et en ordonnée l'infiltration cumulée en millimètre pour les différents sites investigués 151

Figure IV-39. Taux d'infiltration obtenus sur les différents sites (échelles log). 153

Figure IV-40. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST versions BEST-Slope, Intercept et Steady pour les sites Parc-Chambovet (PC), Parc-Clos-Layat (PCL) et Résidence-Damidot (RD). Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)..... 156

Figure IV-41. Figure IV.41. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST versions BEST-WR et WR3T pour les sites Parc-Chambovet (PC), Parc-Clos-Layat (PCL) et Résidence-Damidot (RD).

Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)..... 158

Figure IV-42. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST versions BEST-Slope, Intercept et Steady pour les sites Coste, Friche et Christalline. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 160

Figure IV-43. Résultats de l'algorithme BEST versions BEST-WR et BEST-WR3T pour les sites Coste, Friche et Christalline. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%) 162

Figure IV-44. Valeurs de $\boldsymbol{Ks}$ obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence $\boldsymbol{Ks}$.et droites de régression..... 163

Figure IV-45. Valeursde Ks en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites) ; échelles linéaires en haut et log en bas 165

Figure IV-46. Valeurs de hg obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence hg.et droites de régression. 167

Figure IV-47. Valeurs de h_g en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), des sites investigués et valeurs en fonction de la version sur tous les sites)..... 168

Figure IV-48. Droite de Henry et distributions des valeurs de hg et Ks, en version brute et log. 170

Figure IV-49. Matrice de corrélation entre les différentes variables, paramètres hydrodynamiques, hg et Ks (paramètre de capillarité et conductivité hydraulique), taux d'infiltration IR, richesse spécifique des plantes cultivées "RS.Pl.cult.", plantes sauvages "RS.Pl.sauv.", et indice de richesse spécifique total "RS.total". Code couleur : bleu pour les corrélations fortes positives et rouge pour les corrélations fortes négatives..... 174

Liste des tableaux

Tableau IV-1. Pourcentages granulométriques, incluant l'argile (pClay), le limon (pSilt), et le sable (pSand), densité apparente, ρd, et teneur en eau initiale, θi..... 74

Tableau IV-2. Valeurs moyennes des paramètres de de teneur en eau à saturation, θs, et de paramètres de forme n et η des différents sites. 75

Tableau IV-3. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour le taux d'infiltration avec les différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value).. 88

Tableau IV-4. Ordonnée à l'origine (b, mm/h) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre K_s. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro. 109

Tableau IV-5. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour K_s en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)..... 111

Tableau IV-6. ordonnée à l'origine (b, mm/h) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre h_g. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro. 112

Tableau IV-7. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour h_g en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)..... 114

Tableau IV-8. Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov pour hg, log10(-hg), Ks et log10(Ks), p-value, pour toutes les versions ainsi que les valeurs concaténées servant de référence (val. De référence) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras. 116

Tableau IV-9. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour K_s en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)..... 119

Tableau IV-10. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour h_g en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)..... 120

Tableau IV-11. Descriptions des sites étudiés pour l'axe 2 (porosité et teneurs en eau initiales)..... 128

Tableau IV-12. Ordonnée à l'origine (b, mm/h) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre K_s. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro. 136

Tableau IV-13. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour K_s en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)..... 138

Tableau IV-14. Ordonnée à l'origine (b, mm) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre K_s. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro. 140

Tableau IV-15. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour h_g en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)..... 140

Tableau IV-16. Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov pour hg, log10(-hg), Ks et log10(Ks), p-value, pour toutes les versions ainsi que les valeurs concaténées servant de référence (val. De référence) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras..... 142

Tableau IV-17. Résultats des tests de Student pour la comparaison des moyennes entre les deux tailles d'anneau ; degré de liberté (Df), valeur de la statistique de student (t), et valeur de probabilité critique (p) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras. 145

Tableau IV-18. Résultats des tests de Fisher et Levene pour la comparaison des variances entre les deux tailles d'anneau ; degrés de liberté (Df_1 et Df_2), valeur de la statistique de Fisher ou de Levene (F), et valeur de probabilité critique (p) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras..... 145

Tableau IV-19. Descriptions des sites étudiés pour l'axe 3 : masses volumiques apparentes, porosité et teneurs en eau initiales ; moyennes et écart-types entre parenthèse. 150

Tableau IV-20. Valeurs moyennes des paramètres de teneur en eau à saturation, θs, du taux d'infiltration et de paramètres de forme n et η des différents sites. 153

Tableau IV-21. Ordonnée à l'origine (b, mm/h) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre K_s. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro. 163

Tableau IV-22. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour K_s en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)..... 165

Tableau IV-23. Ordonnée à l'origine (b, mm) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre h_g. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro. 166

Tableau IV-24. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour h_g en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)..... 167

Tableau IV-25. Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov pour hg, log10(-hg), Ks et log10(Ks), p-value, pour toutes les versions ainsi que les valeurs concaténées servant de référence (val. De référence) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras..... 169

Tableau IV-26. Indicateurs de biodiversité : Indices de biodiversité avec la Richesse Spécifique (RS) par site pour les plantes, et taux d'infiltration moyens, pour les sites de Parc Chambovet (PC), Parc Clos Layat (PCL), Résidence Damidot (RD), les Cristallines (Crist), la résidence Rue Coste (RC), et la friche industrielle (Friche)..... 173

Liste des symboles

c_p	Paramètre de forme	[-]
αv	Paramètre de normalisation de la fonction de van Genuchten	[L^{-1}]
α	Paramètre décrivant la décroissance du flux capillaire	[L^{-1}]
n	Paramètre de forme de la courbe de rétention d'eau	[-]
$A, B,$ C	Coefficients du modèle BEST	[-]
D_g	Paramètre d'échelle associé à la taille des particules	[-]
$F(D)$	Fréquence cumulée des particules dont le diamètre est inférieur à D	[-]
p	Paramètre de forme pour la conductivité hydraulique	[-]
θ	Teneur en eau	[-]
θr	Teneur en eau résiduelle	[-]
θs	Teneur en eau à saturation maximale (porosité)	[-]
K	Conductivité hydraulique	[LT^{-1}]
Ks	Conductivité hydraulique à saturation	[LT^{-1}]
k	Perméabilité	[L^2]
K_{rw}	Conductivité hydraulique relative	[LT^{-1}]
K_0	Conductivité hydraulique initiale	[LT^{-1}]
P	Précipitations	[L]
N, M	Définissent la forme de la courbe granulométrique	[-]
E	Évaporation	[L]
R	Ruissellement	[L]
T	Transpiration	[L]
Se	Saturation effective	[L]
R_n	Rayonnement	[L]
ε/φ	Porosité totale	[-]
V_v/V_p	Volume total des pores	[L^3]

V_t	Volume total du sol (VER)	[L^3]
V_a	Volume occupé par l'air	[L^3]
V_e/V_w	Volume d'eau contenue dans les pores (m)	[L^3]
φ_m	Le potentiel de flux matriciel	[L]
ρ_s	Est la masse volumique des particules solides du sol	[M L^{-3}]
ρ_d	La masse volumique apparente	[M L^{-3}]
ρ_w	La masse volumique de l'eau	[M L^{-3}]
M_d	Masse des particules	[M]
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau	[$ML^{-1}T^{-1}$]
M_s	Masse de sol sec	[M]
M_w	Masse d'eau	[M]
m, n, η	Sont des paramètres de forme relatifs à la courbe de rétention d'eau	[-]
V_d	Volume occupé par le milieu poreux	[L^3]
S_r	Degré de saturation	[-]
S	Sorptivité	[$L/T^{1/2}$]
h	Potentiel de pression d'eau	[L]
h_g	Paramètre d'échelle pour le potentiel de pression	[L]
h_0	Potentiel de pression constant	[L]
r	Rayon des pores	[L]
r_d	Rayon de l'anneau (ou disque)	[L]
z/z_0	Altitude	[L]
P_w	La pression de l'eau du sol	[$ML^{-1}T^{-2}$]
P_o	Pression atmosphérique	[$ML^{-1}T^{-2}$]
Ψ	Succion matricielle	[L]
g	Accélération gravitationnelle	[LT^{-2}]
H	Charge hydraulique totale	[L]
ΔH	Différence de charge hydraulique	[L]

L	Longueur du trajet d'écoulement	[L]
A	Surface d'infiltration ou de calcul de flux	[L^2]
Q	Débit	[L^3T^{-1}]
q	Flux d'eau (ou vitesse darcéenne)	[LT^{-1}]
$i(t)$	Taux d'infiltration	[LT^{-1}]
$I(t)$	Infiltration cumulée	[L]
$\beta\ ;\ \gamma$	Paramètres pour la modélisation de l'infiltration	[-]
t_{max}	Temps max pour le régime transitoire (algorithme BEST)	[T]

Liste des acronymes

LEHNA	Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés
UMR	Unité Mixte de Recherche
IAPHY	Impact des Aménagements et des Polluants sur les Hydrosystèmes
IUT	Institut Universitaire de Technologie
ENTPE	École Nationale des Travaux Publics de l'État
ENSAL	École Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon
BI	BEST-Intercept
BSst	BEST-Steady
BS	BEST Slope
BWR	BEST Water Repellency
BWR3T	BEST Water Repellency à trois Termes
BEST	Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters
SCS-CN	Soil Conservation Service - Curve Number
SUDS	Systèmes Urbains de Drainage Durable (Sustainable Urban Drainage Systems)
VG-M	Van Genuchten–Mualem
VG-B	Van Genuchten–Burdine
CGCT	Code Général des Collectivités Territoriales
PLU	Plan Local d'Urbanisme
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SSP	La Société Suisse de Pédologie
VER	Volume élémentaire représentatif
ANOVA	Analyse de variance (ANalysis Of VAriance)
ANR	Agence Nationale de Recherche
S1, S2, S3, S4	Site 1, Site 2, Site 3 et Site 4
FDC	Friche Décines-Charpieu
PC	Parc Chambovet
PCL	Parc Clos Layat

RDam	Résidence Damidot
Christ	Cristalline
CM/ RC	Comme à la maison (Coste)/Résidence Coste
RS.Pl.cult	Richesse spécifique des plantes cultivées
RS.Pl.sauv	Richesse spécifique des plantes sauvages
RS.total	Richesse spécifique totale
B	Méthode Beerkan
AB	Automated Beerkan ou infiltromètre automatisé
WRB	Base de référence mondiale

I Introduction

La caractérisation hydrodynamique des sols est une étape préalablement nécessaire à la compréhension des flux d'eau dans le sol et aux transferts des polluants surtout pour la modélisation des flux d'eau et des polluants qui se trouvent à la surface du sol et qui constituent un risque pour les nappes phréatiques (Alagna et al. 2016; Di Prima 2015; Mubarak et al. 2010; Reynolds et al. 2000; Tamoh and Maslouhi 2004). En connaissant les propriétés hydrodynamiques des sols, on peut prédire l'infiltration de l'eau dans le sol, le ruissellement en surface (et les phénomènes d'érosion induits) ainsi que les risques de contamination (Rahmati et al. 2018). Du point de vue de l'aménagement des territoires urbains et agricoles, ces propriétés sont nécessaires pour la gestion des eaux de surface et pluviales tant sur le plan de quantité que de la qualité.

Le développement des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales requiert de bien connaitre la perméabilité des sols récepteurs, notamment en vue de l'installation des ouvrages et systèmes d'infiltration que sont les jardins « de pluie » (zones naturelles propices à l'infiltration), les noues infiltrantes, les tranchées et les puits d'infiltration, ou les divers ouvrages d'infiltration. L'infiltration à la source et la désimperméabilisassions du tissu urbain permettent de limiter les problématiques d'inondations en ville. Concernant la pollution, le contrôle de la pollution issue des friches urbaines et zones d'activités polluantes (déchetteries, sites de stockage et enfouissement des déchets) requiert aussi la connaissance de la perméabilité des sols. En effet, les déchets et ordures doivent être stockés sur des sols de perméabilités faibles (en l'absence de système dédié comprenant des barrières étanches). Et, en contexte agricole, la caractérisation hydrodynamique des sols permet d'optimiser l'arrosage pour éviter un gaspillage de l'eau et limiter le ruissellement et le lessivage des engrais chimiques ou naturels. Suite à tous ces problèmes auxquels fait face l'environnement dans le monde entier et surtout dans les pays sous-développés, plus particulièrement Haïti (majoritairement agricole), le pays le plus pauvre de l'hémisphère occidental ("Haïti" 2021), les scientifiques doivent multiplier leurs efforts pour rendre l'étude du sol accessible à toutes et tous, notamment aux professionnels spécialisés dans les sciences du sol.

La mesure des propriétés hydrodynamiques du sol et de ses capacités à infiltrer l'eau tout en filtrant les polluants transportés par l'eau a fait l'objet de nombreuses études. Ces dernières ont abouti au développement d'outils de mesure et d'évaluation des capacités d'infiltration du sol et des méthodes de caractérisation hydrodynamiques. Concernant l'évaluation de l'infiltration de l'eau dans le sol, un panel d'outils et de protocoles ont été développés, avec des différences de de types d'appareils, de coût et e temps requis pour la réalisation des essais. Parmi les méthodes traditionnelles, on mentionnera les

perméamètres (Amoozegar 1989), les infiltrations simple et double anneaux (Philip 1957a; Smettem et al. 1995), l'infiltromètre à disque (Vandervaere et al. 1997), la méthode de percolation ainsi que la méthode de la plaque poreuse de Richards (Hillel 1998). Parmi les méthodes simple anneau, la méthode Beerkan (Braud et al. 2005) est très simple (infiltration de volumes d'eau connus au travers d'un simple anneau) et donc est devenue très populaire (Angulo-Jaramillo et al. 2016). En complément de cette méthode, l'algorithme de traitement BEST, développé pour des paramètres hydrodynamiques des sols, a été mise sur pied dans l'objectif d'estimer la courbe de rétention d'eau, $\boldsymbol{\theta(h)}$, et la courbe de conductivité hydraulique, $\boldsymbol{K(\theta)}$ (Angulo-Jaramillo et al. 2019). La combinaison de la méthode Beerkan et de l'algorithme BEST ont été utilisées à maintes reprises pour l'étude des propriétés hydrodynamiques des sols en situations diverses et contrastées.

Cette thèse s'inscrit dans la liste longue des travaux effectués sur les méthodes infiltrométriques et en particulier la méthode Beerkan et l'algorithme BEST. On étudie ici certains nouveaux développements techniques concernant la méthode Beerkan et mathématique concernant l'algorithme BEST. Des dispositifs plus sophistiqués et automatisés ont récemment vu le jour pour fournir les mêmes données infiltrométriques avec moins d'effort (Concialdi et al. 2020; Di Prima 2015). Ces dispositifs sont sensés remplacer intégralement l'opérateur qui n'a plus rien à faire, une fois l'installation du dispositif finalisée. De manière analogue, de nouveaux développements algorithmiques ont été développés pour adapter l'algorithme BEST à de nouvelles physiques et notamment aux sols hydrophobes. En effet, les variantes classiques de l'algorithme BEST présentaient des limites pour certains sols avec des physiques particulières et difficiles à modéliser. En particulier, les sols très hydrophobes donnent lieu soit à aucune infiltration soit à une donnée qui présente une forme atypique difficilement modélisable avec les variantes classiques de l'algorithme BEST. Les écoulements préférentiels présentent aussi un challenge particulier, avec une réponse difficilement modélisable par l'algorithme BEST dans ses variantes classiques. Suite aux difficultés rencontrées, un algorithme adapté a été développé pour la caractérisation hydraulique des sols hydrophobes, BEST-WR (Di Prima et al. 2021). Avec ce nouvel algorithme BEST-WR, de nouveaux écueils sont apparus et une autre version a été développé sur la même logique : BEST-WR3T (Yilmaz et al. 2022). Néanmoins, aucune des nouvelles versions BEST n'a été directement testée avec des jeux de données importants.

Dans le cadre de cette thèse, nous cherchons à tester ces nouveaux développements technologiques et mathématiques dans un contexte de caractérisation hydrodynamique d'une large variété de sols. Dans un premier temps, nous cherchons à démontrer, que, en conditions contrôlées, les dispositifs automatisés développés procurent des réponses équivalentes au protocole Beerkan classique, ou expliquer les raisons physiques d'éventuels écart et de caractériser la répercussion sur la caractérisation

hydrodynamique. Dans un deuxième temps, nous étudions la question du choix de la taille de l'anneau sur la réponse et sur la capacité à intégrer les éboulements dans toute leur complexité (notamment préférentiel). En effet, outre le remplacement de l'opérateur par un dispositif automatisé, la taille de l'anneau peut changer les processus physiques d'infiltration et donc la donnée infiltrométrique. Enfin, après ces aspects relatifs au matériel, nous comptons étudier l'effet du choix de la variante de l'algorithme BEST pour le traitement des résultats. Ainsi, les variantes historiques et les nouvelles variantes sont déployées sur les mêmes jeux de données et comparées, sur des jeux communs. Après validation de l'utilisation des infiltromètres automatisés et l'étude de l'effet de la taille de l'anneau sur la réponse, le déploiement du dispositif automatisé sur un grand nombre de sites de la communauté urbaine de Lyon permet de conclure quant à pertinence de la combinaison de l'infiltromètre automatisé avec les variantes de l'algorithme BEST pour la caractérisation des sols urbains.

Ce manuscrit se compose donc, classiquement en chapitres successifs incluant, une conclusion, la revue de la littérature, les matériels et méthodes utilisées, les résultats et la conclusion. La partie revue de la littérature revient sur les concepts classiques de physique du sol et de processus responsables de de l'infiltration de l'eau dans le sol. La partie matériel et méthode décrit les sites, les dispositifs et protocoles utilisés dans ce travail de recherche. La partie résultats présente 3 axes, (i) comparaison du dispositif automatisés et de la méthode Beerkan classique sur un site contrôlé, (ii) l'effet de la taille de l'anneau sur la réponse infiltrométrique, et (iii) le déploiement du dispositif à l'échelle du bassin versant urbain, permettant de tester et mettre en difficulté le combo infiltromètre automatisé – algorithme BEST. La conclusion reprend les conclusions principales et permet d'esquisser un certain nombre de perspectives.

II État de l'Art et revue de la littérature

Dans ce chapitre, consacré à la revue de la littérature, on évoque successivement l'hydrologie, en termes de cycles hydrologique naturel et en milieu anthropisé, la description du sol comme lieu des processus hydrologiques, de la zone non-saturée à la nappe phréatique, et enfin les techniques infiltrométriques et les méthodes de caractérisation hydrodynamique des sols.

II.1 Modification du cycle hydrologique en ville

Dans cette première partie, on présente le cycle hydrologique naturel, avant de traiter des effets de l'anthropisation des milieux sur les processus hydrologiques, pour finalement aborder la problématique de la gestion des eaux pluviales en ville.

II.2 Cycle hydrologique naturel

Le cycle hydrologique est un processus fondamental qui régule les mouvements de l'eau à travers les différents réservoirs de la Terre, incluant l'atmosphère, les océans, les sols et les eaux souterraines. Ce cycle repose sur un équilibre entre des phénomènes tels que l'évaporation, les précipitations, l'infiltration et le ruissellement. Cependant, les activités humaines, notamment l'urbanisation, l'agriculture intensive et la déforestation, perturbent profondément ces processus naturels. La compaction des sols, l'imperméabilisation des surfaces urbaines et l'exploitation excessive des ressources en eau entraînent un déséquilibre hydrique qui se manifeste par une diminution de la recharge des nappes phréatiques, une augmentation du ruissellement de surface et une exacerbation des inondations et des sécheresses (Lehmann et al. 2020; Vereecken et al. 2014). Dans le contexte du changement climatique, la restauration et la préservation du cycle hydrologique revêtent une importance capitale (Hillel 1998; Lehmann et al. 2020).

II.2.1 Processus hydrologiques

L'ensemble des processus hydrologiques, en interaction constante, conditionne la disponibilité en eau à l'échelle locale et globale. Afin de mieux comprendre ces dynamiques et d'évaluer les ressources en eau, il est essentiel d'établir un bilan hydrique (ou bilan hydrologique) qui quantifie les flux entrants et sortants dans un système donné.

II.2.2 Bilan hydrologique

Le bilan hydrique repose sur une analyse quantitative des flux d'eau circulant dans un système hydrologique, comme un bassin versant, un sol ou un aquifère. Il permet d'évaluer la variation des stocks d'eau en fonction des apports (précipitations) et des pertes (évapotranspiration, ruissellement et infiltration). L'équation classique du bilan hydrique s'écrit ainsi (Figure II.1) :

$$P - E - T - R = \Delta S \quad (1)$$

où **P** représente les précipitations, **E** l'évaporation, **T** la transpiration, **R** le ruissellement, et **ΔS** la variation du stock d'eau dans le profil de sol (Dingman 2015; Hillel 1998).

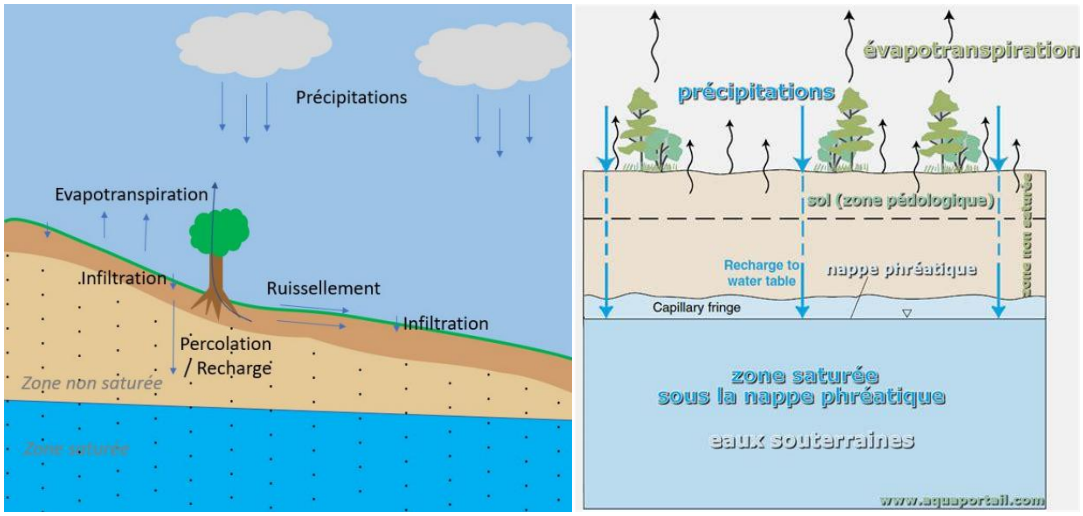


Figure II-1. Cycle hydrologique : composantes et processus (Sébastien 2022)

Les précipitations comprennent la pluie, la neige, la grêle, etc., et constituent l'apport principal en eau douce pour les systèmes terrestres. La variabilité temporelle et spatiale des précipitations a des effets directs sur les niveaux d'infiltration et de ruissellement, influençant les bilans hydriques locaux (Dingman 2015). Les précipitations sont souvent mesurées en millimètres (mm) d'eau tombée, ce qui correspond à des litres par m^2.

L'évapotranspiration combine l'évaporation directe des surfaces et la transpiration des plantes. Elle joue un rôle clé dans le bilan hydrique en limitant la quantité d'eau disponible pour l'infiltration. Le modèle de Penman-Monteith est couramment utilisé pour estimer ET (Hillel 1998):

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{(900)}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

Où R_n est le rayonnement net, G le flux de chaleur du sol, u_2 la vitesse du vent, e_s la pression de vapeur de saturation, e_a la pression de vapeur réelle, et Δ et γ sont des constantes.

Le ruissellement est le surplus d'eau qui ne s'infiltre pas dans le sol et qui ruisselle au moment de l'évènement pluvieux. Il est influencé par l'intensité de précipitation et les propriétés hydrodynamiques des sols. Les modèles de ruissellement comme le SCS-CN (Soil Conservation Service Curve Number) permettent d'estimer le ruissellement en fonction des types de sol et de couverture végétale (Cronshey 1986). Le ruissellement est le facteur premier d'érosion des sols.

Enfin, les eaux infiltrées dans le profil de sol participent au l'augmentation du volume d'eau stocké dans le profil de sol, ΔS. Une partie de ce volume correspond à la recharge des aquifères. Ces dernières se développent dans des formations géologiques capables de stocker et de transmettre de l'eau souterraine. La nappe phréatique désigne le niveau supérieur de l'eau dans un aquifère non confiné. Les paramètres associés incluent la transmissivité et le coefficient de stockage, paramètres essentiels pour déterminer les flux d'eau dans les systèmes souterrains (Freeze and Cherry 1979).

II.3 Effets de l'anthropisation

Historiquement, les perturbations anthropiques du cycle hydrologique ont conduit à une augmentation de l'érosion des sols, à une dégradation des écosystèmes aquatiques et à des risques accrus de pénuries d'eau. Ces impacts sont particulièrement visibles dans les zones urbaines où l'imperméabilisation limite l'infiltration de l'eau et accroît la vulnérabilité aux inondations (Fletcher et al. 2013). Les zones agricoles intensives sont également touchées, les pratiques non durables réduisant la capacité des sols à retenir l'eau, compromettant ainsi leur fertilité et augmentant la dépendance à l'irrigation (Hillel 1998; Reynolds et al. 2002). Dans ce contexte, la santé des sols joue un rôle clé dans la régulation du cycle hydrologique. Comme l'indiquent Lehmann (2020), les sols fonctionnent comme un écosystème vivant essentiel, soutenant à la fois la production agricole, assurant la filtration et l'épuration de l'eau, et servant de support à la biodiversité. Des sols en bonne santé améliorent l'infiltration, réduisent l'érosion et facilitent la recharge des nappes phréatiques, tout en agissant comme un tampon contre les excès climatiques tels que les inondations et les sécheresses et les pollutions émises en surface. Par la suite, nous effectuons deux focus : l'un sur l'érosion des sols, problématique touchant les zones rurales et l'agriculture, et l'autre sur l'augmentation des ruissellements en zone urbaine et la nécessité de gestion des eaux pluviales en ville.

L'érosion, bien qu'un processus naturel, est considérablement amplifiée par les activités humaines, notamment l'agriculture intensive, la déforestation et l'urbanisation (Figure II.2). Elle figure parmi les problèmes environnementaux les plus pressants à l'échelle mondiale (Montgomery 2007; Toy et al. 2002). Selon Lal (2001), environ 1 094 millions d'hectares (Mha) sont affectés par l'érosion hydrique, dont 751 Mha sévèrement, tandis que l'érosion éolienne touche 549 Mha, avec 296 Mha gravement dégradés. Ce phénomène entraîne une perte significative de fertilité des sols, impacte les rendements agricoles et exacerbe les émissions de carbone, perturbant ainsi le cycle global du carbone et contribuant au changement climatique (Lal 2001). Les sols agricoles sont particulièrement vulnérables, avec une perte annuelle estimée à plus de 10 millions d'hectares de terres arables, compromettant la sécurité alimentaire mondiale dans un contexte de croissance démographique accélérée (Dregne 1995).

L'accélération des taux d'érosion découle d'une exploitation humaine excessive des sols, entraînant des déséquilibres entre les mécanismes naturels de régénération et les processus d'érosion anthropiques (Kinzli et al. 2012). Cette intensification a eu pour effet de perturber les rétroactions naturelles du carbone dans le sol et d'augmenter la libération de gaz à effet de serre. Les conséquences de ces déséquilibres incluent une perte de productivité agricole, une réduction de la biodiversité et des impacts directs sur le changement climatique (Montgomery 2007). En Haïti, un pays majoritairement agricole et caractérisé par un relief montagneux, l'érosion constitue un défi majeur. Les pentes abruptes des mornes favorisent un ruissellement intense, provoquant le lessivage des sols et le transport des nutriments essentiels, ce qui accélère la désertification de nombreuses zones cultivables. La perte de la couche arable compromet non seulement la productivité agricole mais aggrave également les impacts socio-économiques dans un pays déjà vulnérable ("The World Bank annual report 2014" n.d.).



Figure II-2 Paysage marqué par l'érosion hydrique sévère dans une zone aride. Cette forme d'érosion, amplifiée par les activités humaines telles que l'agriculture intensive et la déforestation, illustre l'impact de la dégradation des sols sur les écosystèmes et les services écosystémiques associés. (Amundson et al. 2015; Montgomery 2007).

Le contexte actuel du changement climatique et de l'urbanisation croissante se traduit aussi par une problématique d'augmentation des ruissellements en zones urbaines, posant ainsi la question de la gestion des eaux pluviales en ville. La gestion des eaux pluviales regroupe l'ensemble des mesures destinées à limiter le ruissellement et à atténuer les impacts des précipitations sur l'environnement, notamment en milieu urbain (Srishantha and Rathnayake 2017). Jusqu'aux années 1990, cet enjeu a été relativement ignoré, mais l'augmentation continue des surfaces imperméables avec l'étalement urbain a renforcé les risques d'inondations urbaines, générant ainsi une pression croissante pour l'adoption de plans de gestion des eaux dans les zones industrialisées (Brown et al. 2009; Gimenez-Maranges et al. 2020; Porse 2013). En effet, les systèmes de drainage classiques, largement utilisés en première instance, se caractérisent par de grandes infrastructures centralisées – principalement des réseaux de

caniveaux et de tuyaux – dont la fonction première est d'évacuer rapidement les eaux de pluie pour réduire le risque d'inondation (Brown et al. 2009; Novotny et al. 2010). Cependant, face aux effets accentués des précipitations extrêmes et à l'incapacité des systèmes traditionnels à gérer l'intensification de ces phénomènes, les approches de gestion des eaux pluviales se sont diversifiées (Novotny et al. 2010).

Les nouvelles approches de gestion des eaux pluviales adoptent désormais des solutions adaptées aux contextes variés et visent à limiter les ruissellement et infiltrer à la source pour limiter la surcharge des infrastructures hydrauliques, et prévenir la pollution des cours d'eau, de sorte à mieux intégrer l'eau de pluie dans le cycle hydrologique (Srishantha and Rathnayake 2017). Ces approches reposent sur l'utilisation de divers ouvrages et techniques, incluant la création de bassins de rétention, la restauration des zones humides et la plantation de couverts végétaux, ces derniers réduisant le ruissellement, stabilisant les sols et favorisant l'infiltration (Nearing et al. 1989). En Haïti, des pratiques locales telles que l'aménagement de rampes, souvent construites de manière artisanale, ont été adoptées pour réduire l'érosion hydrique. Ces initiatives, bien qu'efficaces à petite échelle, nécessitent un appui technique et financier accru pour être durablement intégrées à une stratégie nationale de gestion des sols et des eaux.

En synthèse, l'érosion des sols et les ruissellements constituent un enjeu environnemental et socio-économique crucial, tant à l'échelle mondiale que dans des contextes locaux tels qu'Haïti, où les pressions anthropiques amplifient ces phénomènes. Des efforts sont indispensables pour développer des solutions pour contrer les effets du ruissellement et de l'érosion et garantir une gestion durable des sols et des eaux, contribuant ainsi à la préservation des écosystèmes, à la sécurité alimentaire et à l'amélioration des conditions de vie dans les zones vulnérables.

II.4 Cas des eaux pluviales en milieu urbain

En milieu urbain, la gestion des eaux pluviales est essentielle pour répondre aux défis liés à l'imperméabilisation des sols, tels que l'augmentation des ruissellements, les inondations récurrentes et la pollution des eaux de surface. L'urbanisation rapide, associée à une densification accrue, diminue la capacité d'infiltration naturelle des sols et surcharge les systèmes de drainage existants. Ces phénomènes amplifient les risques d'inondation et exacerbent les impacts environnementaux et socio-économiques associés (Bertrand-Krajewski 2015; Desbordes 1987).

Historiquement, au XIXe siècle, les eaux pluviales étaient perçues comme une nuisance à évacuer rapidement pour prévenir les désagréments sanitaires et hydrauliques : une approche fondée sur des réseaux d'égouts séparatifs ou unitaires (Desbordes 1987). Cependant, cette gestion purement quantitative des eaux s'est révélée insuffisante face à l'urbanisation croissante et aux pressions environnementales (Bouarafa et al. 2019). À partir du milieu du XXe siècle, des techniques comme les

bassins de retenue ont été introduites pour réguler les débits et limiter les inondations en ville (Marsalek and Chocat 2002). Dans les années 1980, les préoccupations environnementales ont provoqué un changement de paradigme vers une gestion durable des eaux pluviales. De nouveaux systèmes (toits végétalisés, pavés perméables, ouvrages d'infiltration, etc) se sont imposés comme des solutions visant à retenir et infiltrer les eaux de ruissellement directement sur place. Ces pratiques permettent de réduire les débits de pointe, de limiter la pollution des eaux pluviales et de favoriser leur réutilisation pour des usages non potables (Barbosa et al. 2012; Fletcher et al. 2013; Jankowfsky et al. 2014).

Aujourd'hui, les Systèmes de Drainage Urbain Durable (SUDS – Sustainable Urban Drainage Systems) intègrent un éventail de solutions, telles que les zones végétalisées et les espaces ouverts, comme les toits verts, les noues infiltrantes, les ouvrages d'infiltration, et les chaussées poreuses. Ces infrastructures favorisent non seulement l'infiltration à la source, mais aussi la régénération des écosystèmes urbains en offrant des bénéfices multiples, notamment la régulation thermique et la réduction des îlots de chaleur (Ferrans et al. 2022; Tang et al. 2021). Enfin, les épisodes de précipitations extrêmes, de plus en plus fréquents dans le contexte du changement climatique, appellent à une adaptation de ces techniques et ouvrages. Les bassins d'orage et les systèmes de récupération des eaux pluviales, par exemple, jouent un rôle crucial pour atténuer les impacts des événements météorologiques extrêmes et renforcer la résilience des villes (Cettner et al. 2014).

II.4.1 Techniques alternatives

Les **techniques alternatives de gestion des eaux pluviales**, initialement développées pour pallier les limites des réseaux centralisés, se sont progressivement imposées comme des solutions innovantes dans les environnements urbains. Parmi ces dispositifs figurent les noues végétalisées, les bassins d'infiltration, les tranchées drainantes et les chaussées perméables, qui visent à limiter les volumes de ruissellement et à atténuer les impacts hydrologiques associés à l'imperméabilisation des sols (Chocat 2017). Ces solutions ont permis une gestion décentralisée et locale des eaux pluviales, contribuant simultanément à la réduction des polluants et à la recharge des nappes phréatiques.

Cependant, malgré leur efficacité dans des contextes spécifiques, ces techniques ponctuelles ne suffisent pas toujours à répondre aux défis complexes posés par l'urbanisation croissante et les effets du changement climatique. Ce constat a conduit à l'émergence de concepts plus globaux et intégrés, souvent regroupés sous la notion de **gestion des eaux pluviales à la source**. Ce terme, désormais largement adopté, désigne une approche systémique visant à imiter les processus naturels du cycle de l'eau au cœur même des zones urbanisées (Fletcher et al. 2015). Contrairement aux techniques alternatives, la gestion à la source se distingue par son ambition de concilier plusieurs objectifs à la

fois : réduction des inondations, amélioration de la qualité des eaux, préservation de la biodiversité et amélioration des conditions microclimatiques locales.

Les **Systèmes Urbains de Drainage Durable (SUDS)** incarnent cette transition, combinant des principes écologiques et des outils technologiques pour optimiser leur conception et leur performance. Les avantages des SUDS et de la gestion à la source résident dans leur capacité à réduire les impacts de l'urbanisation tout en contribuant à renforcer la résilience des villes face aux événements climatiques extrêmes. Par exemple, les infrastructures vertes comme les toitures végétalisées, les jardins de pluie et les bassins de rétention permettent non seulement de diminuer le ruissellement, mais augmentent également la capacité des villes à résister aux épisodes pluvieux intenses (Berland et al. 2017). Ces solutions offrent aussi des **co-bénéfices écologiques**, notamment la réduction des îlots de chaleur urbains, l'amélioration de la qualité de l'air et la séquestration du carbone, contribuant ainsi à l'amélioration du cadre de vie urbain.

Cependant, bien que ces techniques présentent de nombreux avantages, leur mise en œuvre reste confrontée à des défis. Les coûts d'installation initiaux restent élevés, et leur performance dépend d'un entretien régulier et d'une planification adaptée aux spécificités de chaque site. Par exemple, la gestion de la sédimentation ou l'obstruction des dispositifs de drainage peut compromettre leur efficacité à long terme (Golden and Hoghooghi 2018). De plus, bien que la maintenance soit cruciale pour garantir le bon fonctionnement des infrastructures, des études récentes montrent que ces systèmes peuvent rencontrer des problèmes techniques tels que l'accumulation de débris organiques ou l'obstruction des pores de drainage, affectant ainsi leur capacité à infiltrer les eaux de pluie (Li and Yeung 2014).

En conclusion, la transition des techniques alternatives vers une gestion intégrée des eaux pluviales, centrée sur la gestion à la source, marque une avancée majeure pour répondre aux défis complexes de l'urbanisation et du changement climatique. En combinant des solutions fondées sur la nature (SfN) avec des technologies de pointe, cette approche permet de créer des villes plus résilientes et durables, tout en préservant les ressources en eau et en contribuant à l'amélioration du cadre de vie urbain.

II.4.2 Zonage Pluvial

Le **zonage pluvial** est un outil technique et juridique clé dans la gestion intégrée des eaux pluviales en milieu urbain, visant à optimiser l'infiltration à la parcelle et à atténuer les effets négatifs du ruissellement. Selon M. Saulais et B. Kerloc'h (2021), il permet de définir des zones spécifiques en fonction des caractéristiques hydrologiques et géologiques du territoire, favorisant des solutions de gestion adaptées et intégrant les enjeux de résilience face aux risques d'inondation.

D'un point de vue technique, le zonage pluvial repose sur l'évaluation détaillée de la perméabilité des sols, de la topographie, de la capacité de rétention d'eau et des risques d'inondation. L'objectif est de

délimiter des zones où l'infiltration peut être encouragée, par exemple en intégrant des infrastructures vertes comme les noues végétalisées, les bassins d'infiltration ou les chaussées perméables (Enviroscop 2020). Ce zonage permet aussi d'identifier des secteurs où l'implémentation de solutions durables est difficile, notamment à cause de sols imperméables ou de la présence d'anciennes infrastructures urbaines. Dans ce cas, la gestion de l'eau à la parcelle est privilégiée, car elle limite les volumes de ruissellement et réduit la surcharge des réseaux de drainage (Sorensen et al. 2015).

Le cadre réglementaire complète ces aspects techniques en intégrant ces critères dans les documents d'urbanisme et les régulations locales. En France, la gestion des eaux pluviales est encadrée par **l'article L.2224-10 du Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT)** (d'État 2023), qui impose aux communes d'assurer la collecte, le stockage et l'évacuation des eaux de pluie. Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) et le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) intègrent des prescriptions spécifiques, telles que la limitation de l'imperméabilisation des sols ou l'obligation d'installer des dispositifs d'infiltration dans certaines zones à risque (Fletcher et al. 2015). Ce cadre juridique structure l'urbanisation en fonction des capacités du sol à gérer l'eau de pluie et à éviter les conséquences des inondations urbaines, garantissant ainsi une gestion décentralisée et une meilleure prise en compte des enjeux écologiques et hydrologiques locaux.

Le zonage pluvial présente plusieurs avantages. Sur le plan environnemental, il permet de restaurer les processus naturels du cycle de l'eau en réduisant le ruissellement et en favorisant la recharge des nappes phréatiques, renforçant ainsi la résilience des territoires face aux sécheresses et aux crues (Fletcher et al. 2015). En outre, il soutient des objectifs de biodiversité en intégrant des solutions qui augmentent les surfaces végétalisées et la connectivité écologique, telles que les jardins de pluie ou les toitures végétalisées (Li et al. 2017).

Néanmoins, malgré ses avantages, la mise en œuvre du zonage pluvial soulève des défis importants. Les processus de planification et de réglementation nécessitent une coordination étroite entre les autorités locales, les aménageurs et les experts techniques, notamment pour garantir que les mesures d'infiltration sont adaptées aux contextes spécifiques des sites et pour assurer un entretien adéquat des infrastructures (Golden and Hoghooghi 2018). De plus, la prise en compte des changements climatiques et des phénomènes extrêmes, tels que les pluies intenses ou les sécheresses prolongées, représente un défi supplémentaire pour la conception et l'adaptation des solutions de gestion de l'eau (Berland et al. 2017). En conclusion, le **zonage pluvial** est un outil stratégique pour la gestion durable des eaux pluviales, intégrant des solutions techniques d'infiltration à la parcelle dans un cadre juridique et réglementaire précis. Il favorise une approche systémique combinant les principes de la gestion à la

source et les exigences d'urbanisation durable, en offrant des solutions adaptées aux défis contemporains liés à l'urbanisation croissante et au changement climatique.

II.5 Le sol

Le sol est un élément central de la biosphère et un régulateur des grands équilibres environnementaux (Girard et al. 2011). Il est décrit comme un système dynamique et complexe, résultant de l'altération physique, chimique et biologique des roches mères sous l'influence de facteurs tels que le climat, les organismes vivants, la topographie et le temps (Girard et al. 2011; Hillel 1998; Jenny 1994). Ces processus, affectant la couche superficielle de la croûte terrestre, se déroulent sur des échelles temporelles longues (milliers ou des millions d'années).

Le sol remplit des fonctions écologiques fondamentales au sein des écosystèmes terrestres. Il agit comme un réservoir et un filtre naturel, régulant le cycle de l'eau et biogéochimiques, le stockage et le recyclage des nutriments et du carbone, et jouant un rôle clé dans la régulation des gaz à effet de serre. En outre, il soutient la biodiversité en fournissant les nutriments indispensables à la végétation, essentiels au fonctionnement des écosystèmes terrestres (Girard et al. 2011). Le sol est essentiel non seulement pour son rôle dans les cycles hydriques et géochimiques, mais aussi pour ses interactions avec les écosystèmes et les activités humaines. Ses propriétés physiques, chimiques et biologiques varient à la fois dans l'espace et dans le temps, influençant les processus de transfert d'eau et de solutés (Brady and Weil 2008; Hillel 1998).

Le sol joue également un rôle crucial pour les activités humaines. Il constitue un support essentiel à l'agriculture, participant à la production alimentaire, tout en intervenant dans la filtration et l'épuration des eaux. Ces fonctions anthropiques s'ajoutent à ses rôles écologiques, en renforçant son importance pour la régulation des grands équilibres environnementaux. Ainsi, une gestion durable et une compréhension approfondie des sols sont indispensables pour préserver les systèmes sol et maintenir les services écosystémiques rendus par ces systèmes. Comme le soulignent (Girard et al. 2011), cette gestion doit intégrer les interactions entre les processus naturels et les pressions anthropiques pour garantir une exploitation durable des ressources, au sens large, et notamment de la ressource en sol, au sens particulier.

II.5.1 Sol urbain

La notion des sols urbains prend toute sa place dans plein domaine avec de variantes définitions selon le domaine d'étude. En effet, les spécialistes de l'aménagement du territoire adoptent généralement une approche spatiale, en considérant les sols urbains comme étant l'ensemble des sols situés au sein d'une aire urbaine. À l'inverse, ceux des sciences du sol retiennent préférentiellement une approche génétique basée sur l'origine et la formation des sols, en fonction du niveau de pression anthropique.

Par ailleurs, la classification pédologique des sols est catégorisée de façon spécifique suivant le niveau d'intensification des activités humaines. Selon la classification internationale de l'Union Internationale des Sciences du Sol (IUSS), nous avons les technosols qui sont définis comme des sols contenant une proportion significative d'artéfacts ou présentant des couches imperméables continue en surface ou en profondeur (Schad 2015; WRB 2014). Cependant, la classification française, de manière comparable décrit les Anthroposols comme des sols fortement anthropisés (Baize and Girard 2009; Vidal-beaudet and Rossignol 2018). Pour ces définitions, elles reposent sur des critères génériques donc, ne prennent pas en compte la position géographique des sols.

Néanmoins, la couverture pédologique des milieux urbains selon l'histoire de l'urbanisation, est majoritairement constituée de sols anthropisés, ce qui explique la grande considération des Technosols et des Anthroposols dans les études portant sur les sols urbains, en se référant surtout au sein du groupe de travail SUITMA de l'IUSS (IUSS Working Group 2022; Makki et al. 2021; WRB 2014).

En effet, il est important de distinguer une définition générique d'une définition géographique des sols. Dans le cadre des sols dont les propriétés et les processus pédogénétiques sont dominés par l'action humaine, sont des sols Anthropisés tandis que les sols urbains peuvent être définis comme l'ensemble des sols situés à l'intérieur d'une aire urbaine (INSEE 2011) dans ce cadre, la couverture du sol est entendue comme la couverture physique et biologique de la surface terrestre de façon instantanée (Cord et al. 2010; Jansen and Di Gregorio 2000). En somme, les sols urbains sont donc majoritairement anthropisés, tout en capable d'inclure les sols plus faiblement modifiés, particulièrement dans certaines surfaces végétalisées ou en périphérie urbaine.

II.5.2 Eléments de pédologie

La pédologie, discipline qui étudie l'origine, la formation, la classification et les propriétés des sols, est essentielle pour comprendre les processus de formation des sols et appréhender leurs propriétés. Cette étape est fondamentale pour appréhender les processus responsables des écoulements d'eau et de transfert des éléments au sein des sols. Ces processus, déterminants pour la recharge des nappes phréatiques et la gestion des eaux pluviales, dépendent de propriétés pédologiques fondamentales telles que la texture, la structure et l'organisation des horizons (Brady and Weil 2008; Hillel 1998).

Le sol est constitué de couches distinctes appelées horizons, qui se développent sous l'effet de processus pédogénétiques tels que l'altération de la roche-mère, le lessivage des particules et l'accumulation de matière organique. Ces horizons influencent fortement les flux d'eau dans le sol, en modifiant sa porosité, sa perméabilité et ses propriétés hydrodynamiques globales (Brady and Weil 2008). Les horizons les plus courants s'organisent comme suit (Figure II.3) :

- **Horizon O** : couche organique, riche en matière végétale décomposée, jouant un rôle crucial dans l'infiltration du fait de sa porosité efficace, de sa capacité à retenir l'eau, mais aussi de sa forte teneur en matières organiques à l'origine de phénomène d'hydrophobicité.
- **Horizon A** : Zone de mélange de matière organique et de particules minérales, l'horizon A est souvent le plus actif hydrologiquement. Il facilite les échanges entre l'atmosphère, les racines et les horizons plus profonds (Hillel 1998).
- **Horizon B** : Riche en argiles et oxydes accumulés, il agit souvent comme une zone de stockage temporaire, limitant la percolation rapide. Cet horizon occupe souvent une part importante du profil de sol.
- **Horizon C** : Constituée de fragments de roche partiellement altérés, cette couche marque la transition vers la roche-mère. Elle offre généralement un faible capacité d'infiltration à cause de sa structure compacte.

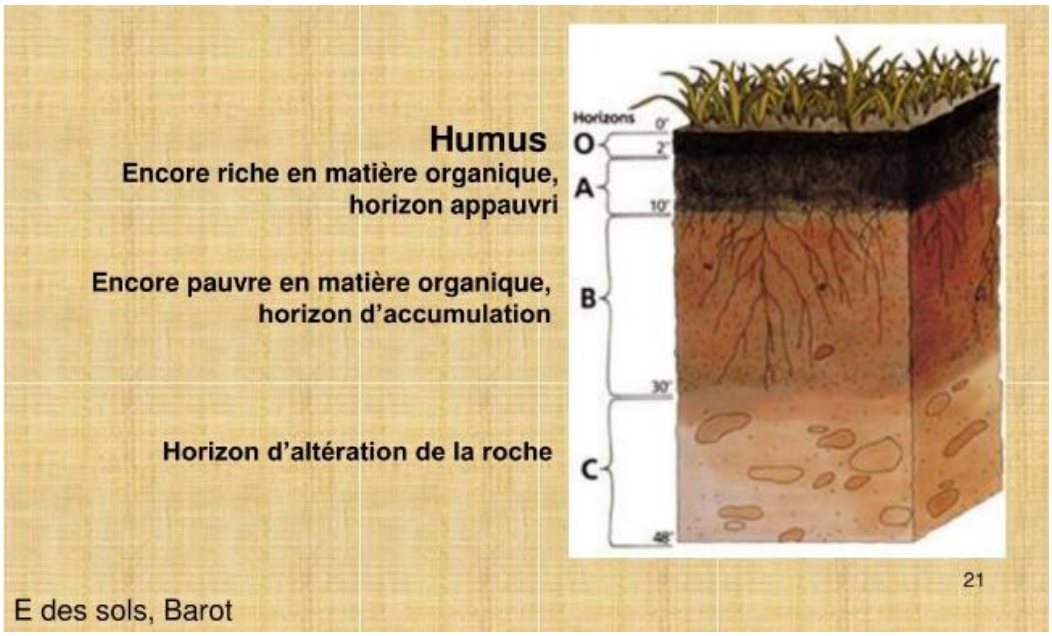


Figure II-3. Profil pédologique et différents horizons constitutifs du sol (© Barot).

L'organisation verticale du sol en horizons résulte de processus d'altération, d'accumulation et de décomposition organique. Ces horizons présentent des caractéristiques distinctes en termes de couleur, de structure et de composition chimique. Le modèle classique inclut généralement les horizons O, A, B et C (Hartemink et al. 2020), tel que décrit ci-dessus. L'horizon O, situé en surface, est principalement constitué de matière organique en décomposition. L'horizon A, ou horizon minéral, est enrichi en matière organique et constitue la couche fertile. L'horizon B se caractérise par une accumulation de matériaux lessivés, tels que l'argile, tandis que l'horizon C correspond à la roche mère

altérée. Cette structure reflète les interactions continues entre les processus pédogénétiques naturels et les influences anthropiques (Musy and Soutter 1991).

Les sols urbains constituent un cas particulier. Ils se distinguent par leur origine mixte, combinant des matériaux naturels et anthropiques. Ces derniers incluent des résidus de construction, des déchets et des pollutions récentes, et se caractérisent par une grande hétérogénéité. Néanmoins, ils conservent également un rôle écologique crucial. Ils participent à la régulation des cycles hydriques, au support de la végétation et au maintien de services écosystémiques dans les environnements densément peuplés (De França et al. 2023).

II.5.3 Le sol et ses constituants

Le sol est un système triphasé composé d'une phase solide, ensemble des particules minérales et organiques, d'une phase liquide, aussi appelée solution du sol, et d'une phase gazeuse, formée par l'air contenu dans les pores (Figure II-4). Ces trois constituants sont quantifiés en rapports volumiques et massiques et doivent être considérés pour comprendre l'ensemble des phénomènes physico-chimiques et biologiques qui se produisent dans le sol.

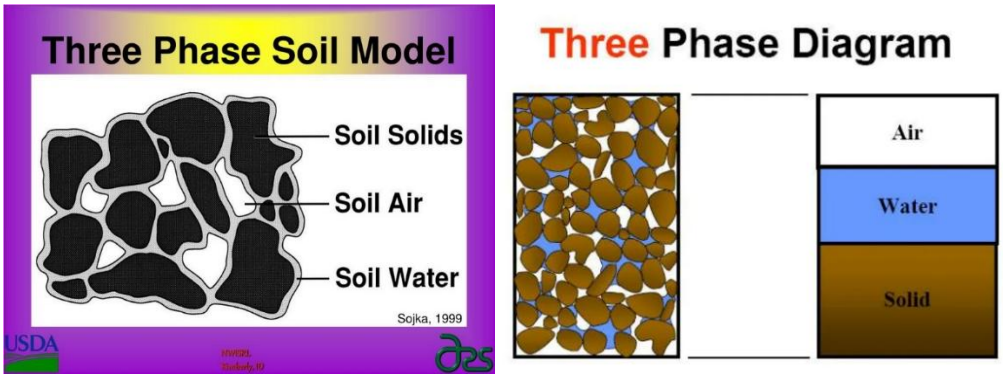


Figure II-4. Représentation des trois phases du sol, avec les parties en noir représentant les solides, en blanc les gaz et en gris les liquides (Sojka and Upchurch 1999)

II.5.3.1 Phase solide du sol

La phase solide constitue le squelette du sol, assurant ses propriétés mécaniques (portance). La phase est composée principalement de matières minérales et de matières organiques, en proportions variables selon les horizons.

II.5.3.1.1 Composantes de la phase solide

La matière minérale est formée de particules de tailles variées, allant des cailloux et graviers aux sables et limons. Ces particules résultent de la désagrégation des roches mères sous l'influence des processus d'altération chimique, physique et biologique (Jenny 1994). Elles peuvent se distinguer par leurs classes granulométriques :

- Argiles (< 0,002 mm) : Ces particules ultrafines possèdent une surface spécifique élevée et des propriétés colloïdales, leur conférant une capacité exceptionnelle de rétention d'eau et d'échange cationique (Musy and Soutter 1991).
- Limons (0,002 – 0,05 mm) : Particules intermédiaires qui jouent un rôle important dans la structure du sol, offrant un compromis entre rétention d'eau et perméabilité.
- Sables (0,05 – 2 mm) : Les particules sableuses, bien que moins aptes à retenir l'eau, favorisent un bon drainage et une excellente aération (Kutilek and Nielsen 1994)

La matière organique du sol, bien qu'en quantité réduite, est essentielle pour sa fertilité et sa stabilité. Elle se compose de résidus végétaux et animaux à divers stades de décomposition, de microorganismes, ainsi que de substances synthétisées au cours des processus biologiques. Cette fraction organique joue un rôle clé dans la formation et la stabilité des agrégats, en agissant comme un ciment entre les particules minérales (Six et al. 2004).

II.5.3.1.2 Texture du sol

La texture du sol correspond à la répartition des différentes tailles de particules minérales. Elle est déterminée par des analyses granulométriques qui mesurent les proportions respectives de sable, limon et argile. La Société Suisse de Pédologie (SSP) a défini des échelles de classification texturale, regroupées dans des catégories comme les sols argileux, limoneux ou sableux (Musy and Soutter 1991).

Les proportions de sable, de limon et d'argile permettent d'attribuer à un sol une classe texturale spécifique. Ces classes, définies par des seuils granulométriques, incluent les sols argileux (> 30 % d'argile), limoneux (> 50 % de limon), et sableux (> 70 % de sable). La texture du sol influence de manière significative ses propriétés physiques, chimiques et biologiques, jouant un rôle central dans les processus hydrodynamiques comme l'infiltration et le ruissellement (Hillel 1998).

La texture du sol joue un rôle crucial dans la porosité et la conductivité hydraulique. Par exemple, les sols sableux, contenant plus de 70 % de sable, se distinguent par des pores de large taille prédominants, favorisant une infiltration rapide mais limitant la rétention d'eau (Gee and Bauder 1986). À l'inverse, les sols argileux, avec une proportion d'argile supérieure à 40 %, se caractérisent par des micropores qui augmentent la rétention d'eau tout en réduisant la conductivité hydraulique saturée (Lal and Shukla 2004). Les sols limoneux, intermédiaires par leur composition texturale, sont souvent sujets à la formation de croûtes superficielles, surtout en conditions humides, ce qui peut limiter l'infiltration (Hillel 1998). Ces différences texturales influencent directement la disponibilité en eau pour les plantes, les flux hydriques verticaux et les pertes par ruissellement (Horn et al. 1995).

II.5.3.1.3 Structure du sol

La structure du sol, qui reflète l'organisation des agencements des particules et la formation des agrégats, module l'effet de la texture en déterminant la connectivité et la distribution des pores. Les sols bien structurés, riches en matière organique, facilitent l'infiltration en créant des mésopores ou macropores connectés (Hillel 1998). En revanche, les sols compactés, où les agrégats sont détruits, limitent les flux hydriques, augmentant les risques de ruissellement et d'érosion hydrique (Horn et al. 1995). Les structures lamellaires (platy), courantes dans les sols compactés, inhibent particulièrement les flux verticaux, tandis que les structures prismatiques ou colonnaires des sols argileux concentrent les écoulements le long de chemins préférentiels (Lal and Shukla 2004).

La structure du sol est influencée par des forces électrostatiques résultant des charges électriques des colloïdes argileux et de l'humus. Ces interactions déterminent la cohésion des agrégats, la porosité totale, ainsi que la distribution des pores (Banton et al. 1997). La structure du sol peut être classifiée de manière qualitative selon le mode d'arrangement des particules :

- Une structure particulaire favorise un drainage rapide et une faible rétention d'eau.
- Une structure fragmentaire ou continue offre une plus grande stabilité mécanique et une capacité de rétention d'eau accrue.

Ces différents types de structure influencent directement la capacité d'infiltration, la résistance à l'érosion et les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère (Musy and Soutter 1991).

II.5.3.2 La phase gazeuse du sol

La phase gazeuse du sol correspond à l'air contenu dans les pores (vides) non occupés par l'eau. Dans un sol en conditions naturelles, l'air et l'eau coexistent en proportions variables selon la structure du sol, son taux d'humidité et les conditions hydriques. Lorsque l'humidité augmente, l'eau remplace l'air dans les pores, réduisant ainsi la proportion de la phase gazeuse. Inversement, en période de sécheresse ou après drainage, les pores se vident d'eau et se remplissent d'air (Jury and Horton 2004). Cet équilibre entre l'air et l'eau influence les processus de diffusion gazeuse et la disponibilité de l'oxygène pour les organismes vivants.

La phase gazeuse du sol joue un rôle essentiel dans les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère et influence les processus biologiques et physico-chimiques du milieu souterrain (Hillel 1998). Sa composition diffère de celle de l'air atmosphérique en raison des interactions avec la solution du sol et de l'activité biologique, notamment la respiration des racines et des microorganismes qui consomment l'oxygène (O_2) et rejettent du dioxyde de carbone (CO_2) (Šimůnek and van Genuchten 2008). La composition de l'air du sol est déterminée par plusieurs processus :

- Les échanges avec l'atmosphère, qui se font par diffusion moléculaire et par convection en fonction des gradients de pression gazeuse.
- Les interactions avec la solution du sol, où certains gaz comme le CO_2, l'oxygène et l'azote se dissolvent partiellement dans l'eau.
- L'activité biologique du sol, notamment la respiration des microorganismes et des racines, qui consomme de l'oxygène et produit du dioxyde de carbone.
- Les apports anthropiques et naturels, incluant la présence de gaz d'origine organique ou industrielle (pesticides volatils, composés organiques en décomposition) (Šimůnek and van Genuchten 2008).

Dans un sol bien structuré, la porosité permet une bonne circulation de l'air, assurant un renouvellement des gaz et un apport en oxygène suffisant pour la vie microbienne et racinaire. À l'inverse, un sol compacté ou saturé en eau limite les échanges gazeux, pouvant entraîner une asphyxie des racines et une accumulation de gaz tels que le méthane (CH_4) et l'hydrogène sulfuré (H_2S), particulièrement dans les sols hydromorphes (Linn and Doran 1984).

II.5.3.3 La phase liquide du sol

La phase liquide du sol correspond à l'ensemble de l'eau contenue dans les pores du sol, sous forme libre ou retenue par les forces capillaires et d'adsorption. Elle joue un rôle essentiel dans les processus physiques, chimiques et biologiques du sol, en assurant notamment le transport des solutés et des nutriments nécessaires à la croissance des plantes (Hillel 1998). Dans les systèmes naturels, l'eau atteint le sol principalement sous forme de précipitations (pluie, neige) ou via la condensation atmosphérique (rosée, brouillard). Toutefois, une partie de cette eau est interceptée par la végétation ou s'évapore avant d'infiltrer le sol (Brady and Weil 2008). Une fois au sol, elle peut suivre plusieurs trajectoires : ruisseler en surface, s'infiltrer dans la matrice poreuse, ou être absorbée par les racines des plantes avant d'être évapotranspirée. Une fraction plus profonde percole lentement à travers les horizons du sol et peut alimenter les nappes phréatiques (Musy and Soutter 1991).

Au cours de ce trajet, la composition chimique de l'eau interstitielle varie. Cette composition résulte d'interactions complexes entre l'eau et les constituants solides du sol. Ces interactions incluent la dissolution des minéraux, les échanges ioniques au sein des argiles, ainsi que les processus biologiques de minéralisation des matières organiques. L'« eau du sol » contient ainsi une diversité d'ions dissous, parmi lesquels les principaux cations sont H^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+ et NH_4^+, tandis que les anions dominants incluent OH^-, Cl^-, HCO_3^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, HPO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$ et CO_3^{2-} (Brady and Weil

2008; Musy and Soutter 1991). La phase liquide du sol constitue un vecteur fondamental pour les transferts d'eau et de solutés.

II.5.4 Porosité du sol et écoulements

Les pores d'un matériau poreux sont généralement classés en trois catégories selon leur taille (Angulo-Jaramillo et al. 2016; Bear 2013) :

- **Les macropores** (diamètre supérieur à 30 nm), qui participent majoritairement aux écoulements rapides et gravitaires, souvent associés aux phénomènes de percolation et d'infiltration. Les macropores non capillaires ont, eux, des dimensions supérieures à 2 mm.
- **Les mésopores** (diamètre compris entre 2 et 30 nm), qui jouent un rôle clé dans la rétention capillaire et les échanges entre zones saturées et non saturées.
- **Les micropores** (diamètre inférieur à 2 nm), où l'eau est généralement adsorbée par des forces de surface, avec une mobilité très réduite.

Les macropores influencent fortement l'hydrodynamique des sols (Beven and Germann 2013; Gao et al. 2018), notamment en accélérant le transport des solutés et en réduisant les temps de résidence de l'eau dans le profil du sol, ce qui peut exacerber les risques de contamination des nappes phréatiques (Gerke 2006; Jarvis 2007). Ces structures naturelles jouent également un rôle crucial dans le drainage des sols et la recharge des nappes, tout en contribuant au maintien des flux hydrologiques dans les écosystèmes terrestres. Toutefois, leur présence peut poser des défis en matière de gestion des sols, notamment en agriculture, où ils favorisent la lixiviation des nutriments, réduisant ainsi la fertilité des sols (Nimmo 2007).

Les écoulements dans le sol sont donc complexes, avec superposition d'écoulement matriciels et macroporeux. Une illustration de la complexité des écoulements est illustrée dans la Figure II.5. Ce schéma illustre les écoulements préférentiels dans les macropores et met en évidence la différenciation entre la circulation autour des agrégats du sol dans l'horizon A et l'imperméabilité relative en profondeur, semblable à la dynamique racinaire observée. D'après (Beven and Germann 2013). Les écoulements macroporeux se traduisent par une humidification très régionalisée de zone profondes alors même que l'humidification matricielle est nettement plus lente.



Figure II-5. Photographie filtrée montrant la traçabilité du colorant Rhodamine WT (tons les plus sombres) dans le sous-sol argileux (série Denchworth) à Grendon Underwood, Oxford, Royaume-Uni. (Beven and Germann 2013)

II.5.5 Physico-chimie et écoulements

On vient de démontrer que les propriétés physiques, et notamment les propriétés géométriques des pores pouvaient un rôle drastique pour les écoulements. Il en est de même pour les propriétés chimiques de sols. Dans certains types de sols, des matières organiques, constituées partiellement de composés hydrophobes, entravent l'infiltration de l'eau. En conséquence, l'eau a des difficultés à s'infiltrer au sein du sol, affectant potentiellement la formation de structures du sol ainsi que la disponibilité des nutriments pour les plantes (Oades 1984). Ce phénomène, qui a des conséquences significatives sur l'infiltration, la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments, est désigné sous le terme d'hydrophobicité. Un sol est qualifié d'hydrophobe lorsqu'il présente une capacité à résister à la pénétration de l'eau (Di Prima et al. 2021; Doerr et al. 2000).

L'hydrophobicité des sols est une propriété ayant des répercussions majeures sur la croissance des plantes, l'hydrologie de surface et souterraine, ainsi que sur l'érosion des sols (Di Prima et al. 2021; Doerr et al. 2000). Cette problématique suscite actuellement un intérêt croissant parmi les chercheurs et les décideurs politiques, en raison de ses impacts négatifs potentiellement significatifs sur la qualité environnementale et la productivité agricole (Di Prima et al. 2021; Doerr et al. 2000; Ritsema and Dekker 2000; Shillito et al. 2020).

II.6 Le sol et l'eau

L'écoulement des fluides (ici, eau interstitielle) est principalement influencé par des propriétés telles que la capacité de rétention d'eau par capillarité et la conductivité hydraulique (ou perméabilité), qui caractérise l'aptitude du milieu à laisser circuler les fluides (Banton et al. 1997; Bear 1988). Les sols sont donc décrits au regard de ces deux caractéristiques. Ainsi, la caractérisation hydrodynamique des sols inclue la détermination des courbes de rétention d'eau par capillarité et la conductivité hydraulique en non saturé, toutes deux décrites par la suite.

II.6.1 Courbe de rétention d'eau

Afin d'approfondir ces notions, nous présentons ci-dessous les principales grandeurs physiques impliquées dans la construction de la courbe de rétention d'eau par capillarité. Dans un premier temps, il convient de définir les variables d'état définies à l'échelle du volume élémentaire représentatif (VER). Le concept de volume élémentaire représentatif (VER) est essentiel et permet de définir et d'associer des variables d'état (teneur en eau, pression matricielle, concentration des solutés, etc.) (Bear 1988; Blunt 2017; De Marsilly 1986).

II.6.1.1 Porosité

La porosité totale d'un matériau est définie comme le rapport entre le volume des pores et le volume total occupé par le matériau à l'état sec (Banton et al. 1997). Elle peut être exprimée en pourcentage selon la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} \tag{3}$$

Où ε représente la porosité totale, V_v le volume des pores et V_t le volume total du sol. Cet indice permet d'évaluer la proportion de vides présents dans le sol. Une autre formulation de la porosité distingue les phases gazeuse et liquide du sol :

$$\varepsilon = \frac{V_a + V_e}{V_t} \tag{4}$$

Où V_a désigne le volume occupé par l'air et V_e le volume d'eau contenue dans les pores.

La porosité peut également être déterminée à partir de la masse volumique apparente et de la masse volumique des solides constituant le sol :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \tag{5}$$

Où ρ_s est la masse volumique des particules solides du sol, exprimée comme $\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$, et ρ_d la masse volumique apparente, définie par $\rho_d = \frac{M_d}{V_d}$.

II.6.1.2 Teneur en eau du sol

Deux indicateurs permettent de quantifier la présence d'eau dans un sol : la teneur en eau volumique et la teneur en eau massique. La teneur en eau volumique est le rapport du volume d'eau sur le volume total du sol :

$$\theta = \frac{V_e}{V_t} \quad (6)$$

La valeur de θ varie entre la teneur en eau résiduelle ($\boldsymbol{\theta_r}$) et la teneur en eau à saturation ($\boldsymbol{\theta_s}$). Toutefois, en conditions naturelles, la saturation totale est rarement atteinte en raison du piégeage d'air dans la matrice poreuse (Musy and Soutter 1991).

Par ailleurs, la teneur en eau massique, appelée aussi humidité massique, est exprimée comme le rapport entre la masse d'eau contenue dans l'échantillon et la masse du sol sec :

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (7)$$

Où M_w représente la masse d'eau et M_s la masse du sol sec. La relation entre ces deux paramètres est donnée par l'équation :

$$\theta = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (8)$$

Où ρ_w est la masse volumique de l'eau. La saturation effective S_e permet d'évaluer la fraction d'eau présente dans les pores en fonction de la saturation maximale et de la teneur en eau résiduelle :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

Où θ_s est la teneur en eau à saturation et θ_r la teneur en eau résiduelle.

Le degré de saturation (S_r) est une grandeur essentielle en physique des sols, car il exprime la fraction de l'espace poral occupée par l'eau. Comme le soulignent Hillel (1998) et van Genuchten (1980), cette notion permet de décrire l'état hydrique des sols, qu'ils soient saturés ou non, et constitue une base pour la modélisation des processus hydrodynamiques.

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} \quad (10)$$

Où S_r représente le degré de saturation (m^3/m^{-3}), V_w volume d'eau contenu dans les pores (m^3), V_p volume total des pores (m^3).

En utilisant les propriétés physiques mesurables du sol, cette formule s'écrit :

$$S_r = \frac{\theta}{\varphi} \tag{11}$$

Où φ est la porosité totale du sol (m³/m³). Pour mieux caractériser les sols partiellement saturés, il est important d'introduire les limites hydriques. La teneur en eau résiduelle correspond à la quantité minimale d'eau retenue dans les micropores et non mobilisable par gravité. La teneur en eau à saturation représente quant à elle la quantité d'eau contenue lorsque tous les pores du sol sont remplis.

II.6.1.3 Succion et potentiel hydrique

La succion d'un sol, introduite en géotechnique en 1965, correspond à l'énergie potentielle de l'eau du sol, analogue à la charge hydraulique dans les milieux saturés (Musy et Soutter, 1991). Elle est opposée au potentiel de pression de l'eau du sol. Lorsque la solution interstitielle est soumise à une pression hydrostatique, le potentiel de pression devient positif, et s'exprime selon la relation :

$$\varphi_p = \rho_w g h \ \text{[Pa]} \tag{12}$$

Où h est la hauteur équivalente d'une colonne d'eau. La pression de l'eau du sol P_w peut être reliée à la pression atmosphérique P_o par :

$$h = \frac{P_w - P_o}{\rho_w g} \ \text{[m]} \tag{13}$$

Le potentiel gravitaire, quant à lui, traduit l'effet des forces de pesanteur et se calcule par :

$$P_g = \rho_w g z \ \text{[Pa]} \tag{14}$$

La somme des différents potentiels conduit à la définition de la charge hydraulique totale :

$$H = h + z \ \text{[m]} \tag{15}$$

En physique du sol, il est courant de parler de « potentiel de pression d'eau », la variable h qui correspond au potentiel de pression φ_p ramené à une hauteur d'eau, en le divisant par $\rho_w g$. Le lecteur ne s'étonnera pas e cet abus de langage dans la suite du manuscrit.

II.6.1.4 Courbe de rétention d'eau

La relation entre la teneur en eau du sol et le potentiel de pression est exprimée par la courbe de rétention d'eau, qui dépend intrinsèquement de la distribution des tailles de pores et de leur connexité (Angulo-Jaramillo et al., 2016). Cette relation, à l'échelle du capillaire est due à la formation de ménisques à l'interface eau-air-sol, et peut être modélisé par la loi de Jurin :

$$|h| = \frac{2\,\gamma cos(\omega)}{r\,\rho_w\,g} \ \text{[m]} \tag{16}$$

Où γ est la tension superficielle de l'eau, ω l'angle de contact et r le rayon capillaire. Pour une valeur de potentiel donné, h, tous les pores de rayons inférieurs à $r_d = \frac{2\,\gamma cos(\omega)}{\rho_w\, g\, |h|}$ sont donc théoriquement remplis d'eau. Le volume de sol occupé par les pores de rayons inférieurs au rayon limite définit donc le volume d'eau dans le sol, correspondant à une valeur spécifique de la teneur en eau θ. On construit ainsi la relation entre le potentiel de pression, h, et la teneur en eau dans le milieu θ. Cette vision capillaire est bien sûr très simpliste et la courbe de rétention d'eau $\theta(h)$.Cette courbe décrit la capacité du sol à retenir l'eau par capillarité.

Plusieurs formulations ont été proposées pour représenter mathématiquement la courbe de rétention d'eau, $\theta(h)$. La formulation mathématique de van Genuchten (1980) est fréquemment utilisée, du fait de sa capacité à représenter bon nombre de données expérimentales, et cela avec un nombre relativement restreint de paramètres :

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^{1-\frac{1}{n}}} \tag{17}$$

avec

$$m = 1 - \frac{1}{n} \tag{18}$$

La condition précédente (Equation 24) vise à réduire le nombre de paramètres pour faciliter leur estimation en phase d'ajustement de données expérimentales. Une formulation plus générale peut aussi être utilisée :

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \tag{19}$$

Les paramètres θ_r et θ_s désignent respectivement la teneur en eau résiduelle, soit la quantité minimale d'eau retenue par le sol lorsque le potentiel hydrique est très faible, et la teneur en eau à saturation, qui correspond à la quantité maximale d'eau que le sol peut contenir lorsque tous les pores sont remplis d'eau. Le paramètre α (m^{-1}) est associé à la pression d'entrée d'air dans le sol, ou peut être vu comme l'inverse d'une valeur spécifique du potentiel de pression, h_g. Ce paramètre h_g influence le point d'inflexion de la courbe de rétention. Les paramètres n et m définissent la forme de la courbe.

Cette relation est déterminante, notamment en zone non-saturée. La courbe de rétention d'eau, aussi appelée courbe de rétention hydrique ou courbe caractéristique d'humidité (Musy and Soutter 1991), reflète la capacité des pores du sol à retenir l'eau en fonction de la capillarité et de l'organisation de la matrice poreuse. On peut distinguer deux types de situations opposées : (i) les sols argileux à texture

fine, qui ont une capacité importante de rétention par capillarité et qui maintiennent de hautes valeurs de teneur en eau, mêmes pour de fortes valeurs de succion matricielle, et (ii) les sols sableux qui présentent une faible rétention par capillarité, du fait de leur taille de pores et d'une structure poreuse favorable au drainage rapide. L'analyse de $\theta(h)$ reste complexe en raison de la diversité des tailles et formes des pores, ainsi que de la dépendance des forces capillaires à l'hétérogénéité structurelle du sol.

II.6.2 Courbe de conductivité hydraulique

II.6.2.1 Loi de Darcy

La loi de Darcy (1856) exprime la relation entre le débit d'écoulement et la perte de charge hydraulique dans un milieu poreux saturé en eau :

$$Q = K_s A \times \frac{\Delta H}{L} \tag{20}$$

Où Q est le débit, K_s la conductivité hydraulique à saturation, A la surface de passage, ΔH la différence de charge hydraulique et L la longueur du trajet d'écoulement. Cette équation simplifie le mouvement de l'eau dans les sols homogènes et saturés (Bear 1988; Jackson 1972).

La conductivité hydraulique mesure la capacité d'un sol à conduire l'eau sous l'effet d'un gradient de potentiel hydraulique et dépend également des propriétés du fluide, telles que la densité et la viscosité. La conductivité hydraulique peut être reliée aux propriétés du fluide qui s'écoule et à un paramètre intrinsèque au milieu poreux, appelé perméabilité. Conductivité hydraulique à saturation, K_s, et perméabilité, k, sont reliés par la relation suivante : $K_s = \frac{k \cdot \rho_w \cdot g}{\mu_w}$. La masse volumique de l'eau ρ_w (kg/m³) et l'accélération gravitationnelle g (m/s²) interviennent dans la force motrice du mouvement de l'eau sous l'effet de la gravité. La viscosité dynamique de l'eau μ_w (Pa·s) influence la résistance au déplacement de l'eau dans le sol (Bear 1988; Darcy 1856).

La perméabilité, définie comme la capacité intrinsèque du sol à laisser passer les fluides à travers sa matrice poreuse, dépend de la taille, de la distribution et de la connectivité des pores, incluant macropores, mésopores et micropores (Bear 1988; Hillel 1998). Les sols sableux, avec leurs pores larges et connectés, présentent une perméabilité élevée, favorisant des écoulements rapides, tandis que les sols argileux, riches en micropores, ont une perméabilité faible en raison des forces capillaires dominantes et de la faible connectivité (Brady and Weil 2008; Rawls et al. 1991).

II.6.2.2 Loi de Darcy généralisée

La loi de Darcy, initialement démontrée expérimentalement en colonne de laboratoire, et donc formalisée en 1D a été généralisée en 3D :

$$q = -K_s\, gradH \;=\; -K_s \nabla H \tag{21}$$

Où q représente le flux d'eau (vecteur) et ∇H le gradient hydraulique.

La loi a aussi été généralisée pour être adaptée au régime non saturé. Pour un sol non saturé, la conductivité hydraulique dépend de la teneur en eau et varie en conséquence. La relation de Darcy a donc été formalisée de la manière suivante :

$$q = -K(\theta)\, \nabla H \tag{22}$$

Ainsi, la conductivité hydraulique, $K(\theta)$, dépend de la teneur en eau. Elle atteint sa valeur maximale K_s lorsque le sol est saturé, tous les pores étant saturés et pouvant conduire l'eau. En revanche, en conditions non saturées ($\theta < \theta_s$), la conductivité hydraulique diminue et devient inférieure à K_s, car seuls les pores remplis d'eau peuvent conduire l'eau et participer à l'écoulement.

Par analogie avec ce qui est décrit dessus pour la valeur K_s, $K(\theta)$ ne constitue pas une propriété intrinsèque du sol. Ainsi, car elle dépend à la fois des caractéristiques du fluide et de celles du milieu poreux. Afin de distinguer ces contributions, la conductivité hydraulique peut être exprimée sous la forme suivante **(**Bear, 1988**)** :

$$K(\theta) = k\frac{\rho_w g}{\mu_w} K_{rw}(\theta) \tag{23}$$

Où k est la perméabilité intrinsèque du sol (m²), caractérisant la capacité du milieu à transmettre l'eau indépendamment des propriétés du fluide. La masse volumique de l'eau ρ_w (kg/m³) et l'accélération gravitationnelle g (m/s²) et la viscosité dynamique de l'eau μ_w (Pa s) caractérisent toujours le fluide (ici eau interstitielle). Enfin, la perméabilité relative $K_{rw}(\theta)$ est un facteur adimensionnel variant entre 0 et 1, traduisant l'impact des variations de la teneur en eau sur la capacité du sol à transporter l'eau. Cette formulation met ainsi en évidence l'interaction entre les propriétés physiques du sol et du fluide dans les processus d'infiltration et d'écoulement de l'eau.

II.6.2.3 Expression pour la conductivité hydraulique en non saturé

De nombreuses formulations ont été proposées pour décrire les courbes hydrodynamiques, et notamment la conductivité hydraulique. Cette dernière a été souvent estimée par application de modèles capillaires à des formulations mathématiques spécifiques pour la courbe de teneur en eau (Angulo-Jaramillo et al., 2016). Parmi les plus classiques et fréquemment utilisées, on retrouve les associations de formulation suivantes. En premier lieu, la formulation de Genuchten (1980) avec la relation de Burdine ($m \;=\; 1 - \frac{2}{n}$), pour décrire la courbe de rétention d'eau et le modèle de Brooks et Corey (1964) pour décrire la conductivité hydraulique en non saturé :

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m} \quad (24)$$

$$\frac{K(\theta)}{K_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{\eta} = S_e^{\eta} \quad (25)$$

Dans ces équations, *n* et *m* sont des paramètres de forme pour la courbe de rétention d'eau, et $\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p$, avec $p = 1$, est un paramètre de forme pour la conductivité hydraulique. Les termes θ_s et θ_r représentent respectivement la teneur en eau volumique à saturation et la teneur en eau résiduelle, tandis que h_g correspond au paramètre d'échelle pour le potentiel de pression. Ces formulations sont connues sous le nom de modèles van Genuchten–Burdine (VGB), qui incluent le modèle de van Genuchten (1980) couplé à la condition de Burdine ($m = 1 - \frac{2}{n}$) et le modèle de (Brooks and Corey 1964).

D'autres formulations sont également couramment employées, notamment pour des applications en résolution numérique. Par exemple, le modèle van Genuchten–Burdine (VGM), qui couple le modèle de Van Genuchten (1980) avec la condition de Mualem ($m = 1 - \frac{1}{n}$) avec modèle capillaire de Mualem (1976) est souvent utilisé dans les modèles numériques (Angulo-Jaramillo et al. 2016), notamment le modèle Hydrus (Radcliffe and Simunek 2010):

$$S_e(h) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m} \quad (26)$$

$$\frac{K(S_e)}{K_s} = S_e^l \left(1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right)^2 \quad (27)$$

Une analyse comparative de ces différentes formulations mathématiques a été proposée par (Lassabatere et al. 2021). La Figure II.6. illustre ainsi la famille de courbes de rétention d'eau et de conductivité hydraulique relatives en fonction de la valeur des paramètres de forme (ici *m* est représenté). On voit que les deux formulations produisent approximativement les mêmes formes de courbes, des courbes de rétention et de conductivité hydrauliques très étalées pour les valeurs de m proche de zéro, et à contrario avec une très faible lissage pour des valeurs de m proches de 1. On note donc l'effet important des paramètres de normalisation.

Les propriétés hydrodynamiques sont déterminantes dans la mesure où elles influencent directement les processus d'infiltration et les flux d'eau dans la zone non saturée. Elles doivent être déterminées proprement et précisément. Les sections suivantes détaillent comment les techniques d'infiltrométrie peuvent aider à leur détermination.

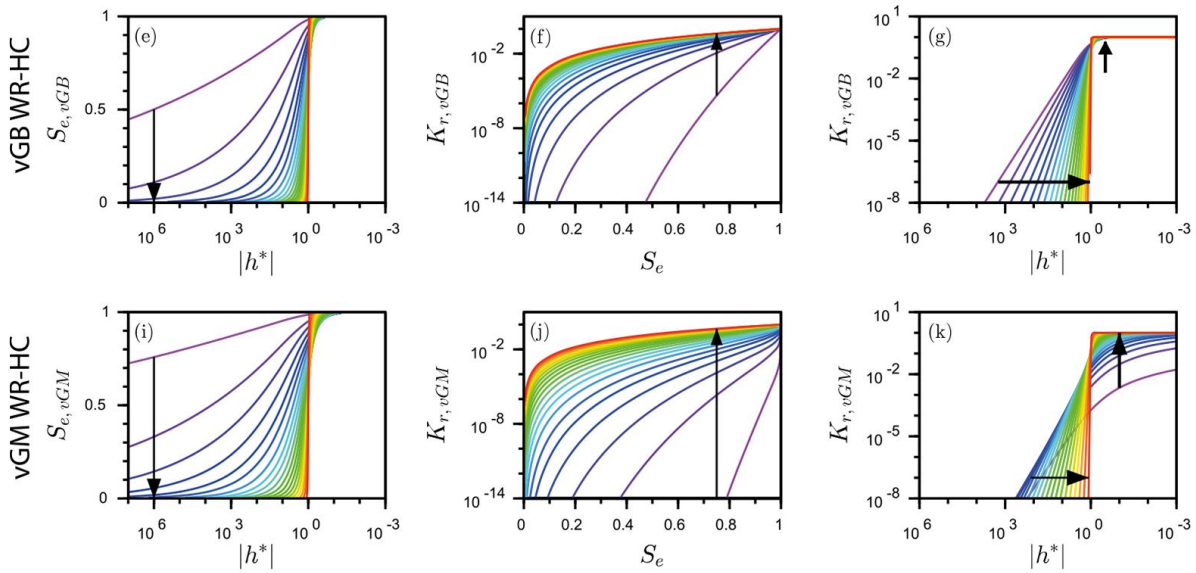


Figure II-6. Exemples de courbes de rétention et de conductivité hydraulique pour différents jeux de propriétés hydrodynamiques, en fonction de la valeur du paramètre m (Lassabatere et al., 2023)

II.7 Écoulement et conditions d'équilibre hydrostatique

Dans un sol, l'eau est soumise à diverses forces influent sur sa quantité mouvement. On a vu précédemment que, à l'échelle du VER (volume élémentaire représentatif), les deux forces à potentiel principalement considérées sont la gravité et la force de pression de l'eau sur elle-même. Ainsi, à l'équilibre hydrostatique, le potentiel de pression compense exactement le potentiel gravitaire. Le gradient de potentiel total est alors nul. En cas de non équilibre isostatique, c'est la loi de Darcy qui est utilisée pour prédire le flux d'eau qui résulte en fonction du gradient hydraulique (gradient de charge hydraulique). Cette section explore les conditions d'équilibre hydrostatique ainsi que les conditions d'écoulement pour dériver la loi de Richards et aborder le cas de l'infiltration de l'eau dans le sol.

II.7.1 Équilibre hydrostatique dans le sol

En condition d'équilibre, le potentiel de pression de l'eau dans le sol compense parfaitement l'effet de la gravité. Cela implique qu'à chaque mètre de profondeur supplémentaire, le potentiel de pression augmente d'un mètre. La distribution verticale des potentiels hydriques – potentiel de pression, potentiel gravitaire et potentiel total – peut être représentée tel qu'illustré dans la Figure II.7. Ce diagramme est souvent qualifié de "profil hydrique" (Banton et al. 1997).

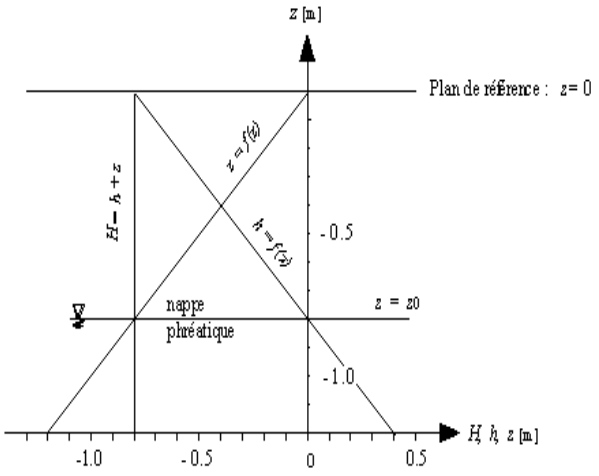


Figure II-7. Représentation des distributions de la pression, de la gravité et de la charge totale dans un système en équilibre hydrostatique dans un tube.

Au niveau piézométrique, qui correspond à la surface de la nappe phréatique, le potentiel de pression est nul. Dans cette zone, la teneur en eau est égale à la saturation. Sous ce niveau, le potentiel de pression augmente linéairement avec la profondeur selon la relation :

$$h(z) = h_0 + (z_0 - z) \tag{28}$$

La teneur en eau reste alors constante, correspondant à celle à saturation, ce qui indique que le milieu est saturé en eau. En revanche, au-dessus du niveau piézométrique, le potentiel de pression devient négatif. Dans cette région désaturée, la teneur en eau diminue avec l'altitude z, et son évolution suit un profil en accord avec la courbe de rétention d'eau $\theta(h)$. Ce cas est théorique et l'équilibre isostatique n'est que très rarement atteint, notamment en zone non saturée.

II.7.2 Modélisation de l'écoulement dans le sol

En conditions d'écoulement, ce dernier peut être décrit en combinant la loi de Darcy et le principe de conservation de la masse. En milieu non saturé et non déformable, la teneur en eau dans un volume élémentaire peut varier dans le temps. Ainsi, un flux d'eau (positif) se traduit par une augmentation de la quantité d'eau et non pas une compression du fluide (a contrario du cas des nappes captives). Dans ce cas, le fluide peut être considéré comme incompressible. Les écoulements sont donc régis par l'équation de continuité pour un fluide incompressible (Bear 1988) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot q \tag{29}$$

L'équation générale de l'écoulement dans un milieu non saturé, connue sous le nom d'équation de Richards, résulte de la combinaison de cette équation de continuité et de la loi de Darcy généralisée (Equation 22) et conduit à l'équation suivante (Bear 1988) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathrm{K}(\theta) \cdot \nabla \mathrm{H}] \tag{30}$$

Pour un écoulement unidimensionnel vertical, cette équation se simplifie comme suit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\left(\frac{\partial h(\theta)}{\partial z} + 1\right)\right] \tag{31}$$

Dans cette formulation, l'axe vertical est orienté vers le haut, conformément au système de mesure international (Bear 1988). Toutefois, certaines publications adoptent une convention différente où l'axe est dirigé vers le bas (vers la profondeur), ce qui entraîne une modification du signe du terme +1 dans l'équation. Par exemple, dans le cadre des travaux de (Richards 1931) sur l'infiltration, ainsi que dans certaines études hydrologiques récentes (Šimůnek and van Genuchten 2008), l'axe Oz est dirigé vers le bas, ce qui conduit au remplacement du terme « +1 » par « -1 » dans l'expression du gradient de charge hydraulique.

Cette équation permet de modéliser les écoulements darcéens, homogènes et uniformes, en supposant un milieu poreux isotrope et sans hétérogénéités notables (Bear 1988). Cependant, dans des cas fréquents, les écoulements sont discontinus ou hétérogènes en raison de la structure complexe du sol, notamment la présence de macropores et de fractures (Angulo-Jaramillo et al. 2016; Lassabatere et al. 2021). Pour ces situations, des modèles plus avancés, intégrant des processus physiques plus complexes tels que les flux préférentiels ou l'anisotropie du milieu, doivent être utilisés afin d'obtenir une description plus réaliste des phénomènes d'écoulement (Šimůnek et al. 2003).

II.7.2.1 Infiltration cumulée et taux d'infiltration

L'infiltration de l'eau dans le sol est un processus fondamental en hydrologie et en physique du sol, jouant notamment un rôle clé dans la gestion des eaux pluviales. Il s'agit du mouvement de l'eau à travers la surface du sol vers les couches plus profondes, influençant directement la recharge des nappes phréatiques, la disponibilité en eau pour les plantes, et la qualité des eaux souterraines.

Comme l'explique (Hillel 1998), l'infiltration dépend des propriétés physiques du sol, notamment sa texture, sa structure et sa porosité, qui influencent la dynamique de l'eau. Philip (1957b) ajoute que ce phénomène est gouverné par des forces hydrodynamiques, notamment la gravité et la capillarité, et qu'il est modulé par l'état initial d'humidité du sol ainsi que par les conditions climatiques.

L'infiltration cumulée, notée $I(t)$, représente le volume total d'eau ayant pénétré le sol par unité de surface au cours du temps t. Elle s'exprime par l'intégrale du taux d'infiltration instantané $i(t)$

$$I(t) = \int_0^t i(t)dt \tag{32}$$

Où $i(t)$ est la vitesse à laquelle l'eau s'infiltre à un instant donné à la surface du sol dans la zone d'infiltration. En 1D, $i(t) = q(z = 0, t)$. Le taux d'infiltration, noté $i(t)$ peut aussi être défini comme la dérivée temporelle de l'infiltration cumulée $I(t)$:

$$i(t) = \frac{dI(t)}{dt} \tag{33}$$

Cette relation traduit le fait que le taux d'infiltration représente le flux instantané d'eau à travers la surface du sol. Il varie en fonction des propriétés du sol et des conditions environnementales, notamment l'intensité de la pluie et l'état de saturation du sol (Dingman 2015). Comme l'indiquent (Salifu et al. 2021), la prédiction du taux d'infiltration est un défi majeur en raison des variations spatiales et temporelles des caractéristiques du sol et de la complexité du problème posé. Ces variations influencent les paramètres des modèles d'infiltration et rendent nécessaire l'utilisation de méthodes de mesure précises adaptées aux conditions locales.

Au sein du sol, un front d'infiltration sépare les zones non humidifiées des zones récemment humidifiées et se propagent vers le bas, le long du profil de sol. Une illustration de ce phénomène est proposé dans la Figure II-8. De nombreux auteurs ont travaillé sur la conceptualisation du taux d'infiltration, du front d'infiltration et de la relation entre ces deux deniers (Angulo-Jaramillo et al. 2016).

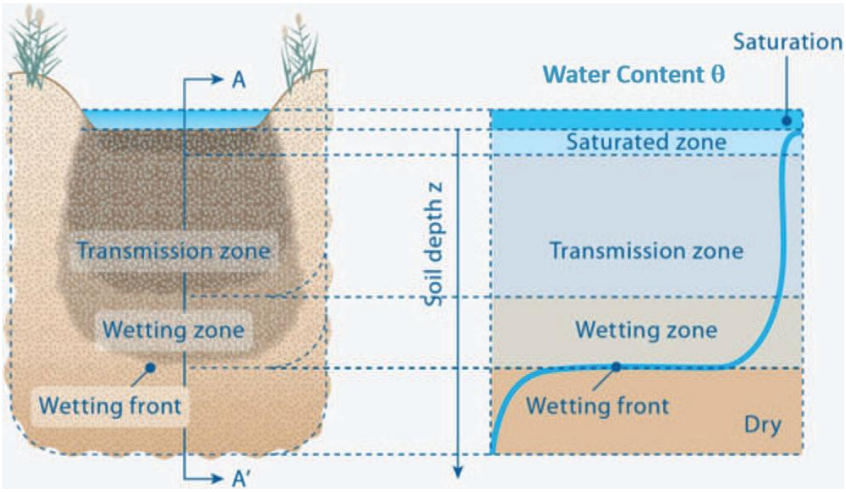


Figure II-8. schéma de l'infiltration d'un profil hydrique selon Green et Ampt (Vereecken et al. 2019)

II.7.2.2 Modélisation de l'infiltration dans le sol

L'infiltration de l'eau dans le sol a fait l'objet de nombreuses approches de modélisation, à la fois numériques et analytiques (Radcliffe and Simunek 2010). Notamment, l'infiltration cumulée $I(t)$ a fait l'objet de nombreux développements (Basset et al. 2025). Haverkamp et al. (1994) ont proposé une formulation permettant de quantifier l'infiltration en surface en résolvant analytiquement l'équation de

Richards. Cette approche considère un potentiel de pression constant à la surface du sol, noté h_0, ainsi qu'un profil initialement uniforme où $h_i < h_0 \leq 0$. Smettem et al. (Smettem et al. 1994) ont ensuite étendu cette solution aux expérimentations infiltrométriques en intégrant le flux radial résultant de la source circulaire. Ces formulations ont été ensuite simplifiées par ces mêmes auteurs pour définir des approximations pour le régime transitoire ainsi que pour le régime asymptotique, quand le taux d'infiltration se stabilise (Haverkamp et al. 1994; Smettem et al. 1994).

Ainsi, pour le cas d'une expérience d'infiltration où une valeur de potentiel de pression constante est appliquée sur un disque de rayon interne r au-dessus d'un sol homogène avec une teneur en eau initiale uniforme, l'infiltration cumulative tridimensionnelle et le taux d'infiltration sont décrits par les expressions suivantes :

Régime transitoire :

$$I(t) = S\sqrt{t} + (AS^2 + BK_s)t \tag{34}$$

$$i(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + (AS^2 + BK_s) \tag{35}$$

En régime stationnaire :

$$I_{+\infty}(t) = (AS^2 + K_s)t + \mathrm{C}\frac{S^2}{K_s} \tag{36}$$

$$i_{+\infty}(t) = AS^2 + K_s \tag{37}$$

Où S représente la sorptivité du sol (décrite plus bas), et les constantes A,B,C sont définies selon (Lassabatère et al. 2006) :

$$A = \frac{\gamma}{r(\theta_s - \theta_0)} \tag{38}$$

$$B = \frac{2-\beta}{3}\left(1 - \frac{K_0}{K_s}\right) + \frac{K_0}{K_s} \tag{39}$$

$$C = \frac{1}{2(1-\beta)\left(1 - \frac{K_0}{K_s}\right)}\, ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \tag{40}$$

Ici r, est le rayon de l'anneau, θ_0 et θ_s désignent respectivement la teneur en eau initiale et finale (ou à saturation), tandis que $\beta = 0.6$ et $\gamma = 0.75$, sont des paramètres valides pour la plupart des sols lorsque $\theta_0 < 0.25\theta_s$ (Haverkamp et al. 1994).

Selon Moret-Fernández et al. (2020), lorsque le sol initialement sec est soumis à une infiltration, la conductivité hydraulique initiale K_0 peut être considérée comme négligeable par rapport à la

conductivité saturée K_s (soit $K_0 \ll K_s$). Ainsi, les constantes B et C peuvent être approximées comme suit, pouvant potentiellement alléger un peu les calculs :

$$B \approx \frac{2-\beta}{3} \tag{41}$$

$$C = \frac{1}{2(1-\beta)}\ ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \tag{42}$$

II.7.2.3 Sorptivité et Approches Analytiques de l'Infiltration

Un paramètre fondamental dans ces équations est la **sorptivité**, qui caractérise la capacité d'un sol à absorber l'eau par capillarité. En l'absence de gravité, elle représente la constante de proportionnalité entre l'infiltration cumulée et la racine carrée du temps. Elle peut être calculée à partir des courbes hydrodynamiques caractéristiques et les conditions initiales et finales, selon la formulation de (Angulo-Jaramillo et al. 2016) :

$$S^2(\theta_0, \theta_f) = \int_{\theta_0}^{\theta_f} (\theta_f + \theta - 2\theta_0)\, D(\theta) d\theta \tag{43}$$

Lassabatere et al. (2021) et (2023) ont démontré que cette formulation n'était valide que lorsque la pression imposée restait nulle ou négative (et en tous cas inférieure à la valeur de la pression d'entrée d'air). Dans le cas particulier où la teneur en eau initiale correspond à la teneur résiduelle θ_r et la teneur en eau finale est la saturation θ_s, cette relation peut être simplifiée (Angulo-Jaramillo et al. 2016):

$$S^2(\theta_0, \theta_f) = -c_p\ \theta_s\ K_s\ h_g \tag{44}$$

Où c_p est un coefficient de forme dépendant de la formulation des courbes de rétention d'eau et de la conductivité hydraulique (Lassabatere et al. 2021). Cette relation permet de relier les caractéristiques intrinsèques du sol aux paramètres hydrodynamiques qui gouvernent l'infiltration.

Ainsi, ces formulations analytiques offrent un cadre robuste pour l'étude des processus d'infiltration en milieux poreux. Elles permettent d'évaluer l'influence des conditions initiales du sol, des propriétés hydrodynamiques et des paramètres de modélisation sur l'évolution de l'infiltration, aussi bien en conditions transitoires que stationnaires. Ces formulations constituent la base analytique des méthodes BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters) qui sont présentées par la suite (Angulo-Jaramillo et al. 2019).

II.7.3 Écoulements particuliers et préférentiels

L'écoulement préférentiel dans le sol se manifeste lorsque l'eau ne s'infiltre pas de manière uniforme à travers le profil, mais suit des chemins spécifiques facilitant un transfert rapide, souvent autour de macropores, fissures, ou canaux biologiques (Beven and Germann 2013). Contrairement à une infiltration uniforme selon un front de mouillage (ou d'infiltration) classique, ces écoulements peuvent

court-circuiter une partie importante de la matrice du sol, entraînant des implications significatives pour le transport des solutés et des polluants. Il peut s'ensuivre ensuite une adsorption réduite par les particules du sol et une diminution de la rétention des polluants (Lassabatere et al. 2004, 2007). En effet, Hendrickx et Flury (2001) et Jarvis (2007) ont montré que l'eau et les contaminants, tels que les pesticides ou les nitrates, peuvent se déplacer rapidement à travers les sols via des chemins préférentiels, augmentant ainsi les risques de pollution des eaux souterraines et de surface. Cela est particulièrement problématique dans les systèmes agricoles où les intrants chimiques sont utilisés intensivement.

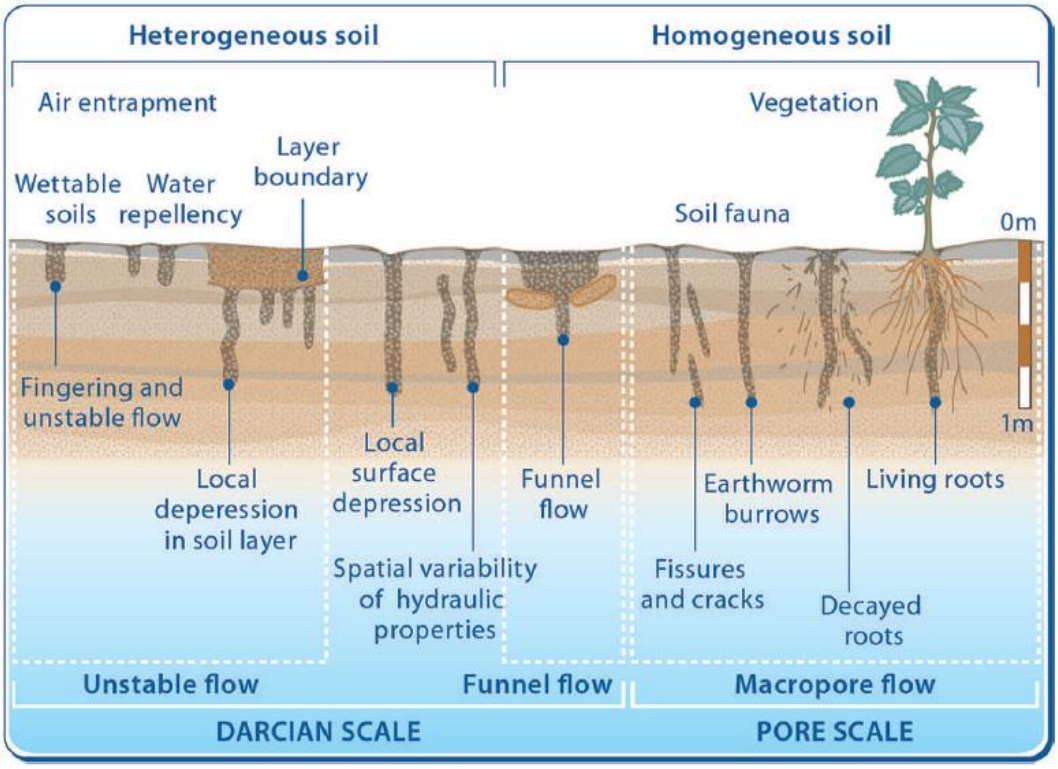


Figure II-9. Différents scénarios d'infiltration et d'écoulements préférentiels. (Vereecken et al. 2019)

Les écoulements préférentiels peuvent être induits par de nombreux facteurs (Figure II-9), dépendamment de la texture du sol, de sa structure du sol et de ses propriétés physico-chimiques (propriétés hydrophobes). La structure du sol joue un rôle clé dans la formation de ces écoulements préférentiels. Les macropores, formés par des racines, des organismes vivants ou des processus physiques comme le retrait et le gonflement des argiles, favorisent la création de voies directes pour l'eau et les solutés. Ces structures augmentent la connectivité hydraulique verticale et horizontale, contournant les zones où l'eau pourrait autrement être retenue, freinée et/ou filtrée (Köhne et al. 2009). Les caractéristiques physico-chimiques sont aussi déterminantes (Hillel 1998). En effet, de fortes teneurs en matières organiques dans le sol peuvent se traduire par une hydrophobicité marquée (Beatty

and Smith 2013), avec des répercussions notables l'infiltration en début d'évènement se traduisant par des formes particulières pour les courbes d'infiltration cumulée (Pachepsky and Karahan 2022).

La revue de la littérature met en lumière l'importance des écoulements préférentiels dans les processus d'infiltration et de transfert des contaminants. Une partie des travaux de ce travail de thèse investiguera l'influence des macropores et de l'hydrophobicité sur les techniques infiltrométriques.

II.8 Dispositifs d'infiltration

Le développement d'outils modernes, tels que les infiltromètres, permet de mieux caractériser les propriétés hydrodynamiques des sols. Ces outils fournissent des données précises sur la capacité des sols à infiltrer l'eau, ce qui est essentiel pour élaborer des stratégies de gestion durable. Par exemple, l'infiltration à la source, qui réduit les risques d'inondation dans les zones urbaines , se base sur des ouvrages d'infiltration dont la capacité d'infiltration peut être estimée par infiltrométrie (Ventura et al. 2010). Dans un contexte plus récent, cette approche a été affinée pour mieux intégrer l'impact des changements climatiques et des modifications de l'usage des sols sur les ressources en eau. Par exemple Musy (2014) soulignent l'importance de l'évaluation spatiale et temporelle des flux hydriques pour la gestion durable des ressources en eau. L'infiltrométrie peut comporter clairement un intérêt dans l'apport de connaissances sur les propriétés hydrodynamiques des sols, notamment au regard des stratégies d'infiltration permettant de réduire les effets négatifs du ruissellement excessif sur les systèmes hydrologiques (Musy et al. 2014).

Au cours des deux dernières décennies, la recherche en infiltrométrie a conduit à une diversification et à une amélioration significative des outils infiltrométriques. Ces avancées ont pour objectif d'augmenter l'efficacité, la précision et l'adaptabilité des méthodes et dispositifs, tout en surmontant les limitations des dispositifs antérieurs. Le but demeure d'optimiser la fiabilité de la mesure de l'infiltration et la fiabilité des paramètres essentiels tels que la conductivité hydraulique à saturation et les autres paramètres des courbes hydrodynamiques. Divers outils et méthodes infiltrométriques permettent de quantifier la capacité d'infiltration d'un sol et d'évaluer les flux d'eau sous des conditions contrôlées (Angulo-Jaramillo et al. 2016). En général, les protocoles consistant à appliquer un volume d'eau sur une surface donnée enregistrent le temps nécessaire à son infiltration, avec une distinction entre deux approches principales : (i) l'infiltration en conditions insaturées, activant uniquement les micropores du sol, et (ii) l'infiltration en conditions saturées, sollicitant l'ensemble du réseau poral, y compris les macropores, ce qui peut favoriser l'apparition d'écoulements préférentiels. Selon les protocoles, la charge appliquée à la surface du sol peut être constante ou variable dans le temps, suivant qu'une pression ou une tension constante ou décroissante est imposée.

Afin de mieux appréhender les techniques de mesure de l'infiltration, nous présentons brièvement les principaux outils infiltrométriques, leurs protocoles et principes de fonctionnement dans les sous-sections suivantes. Ces dispositifs se distinguent par la manière dont l'eau est appliquée à la surface du sol. Par exemple, le perméamètre de Guelph (Kodešová et al. 2010; Reynolds et al. 1983; Reynolds and Lewis 2012) et le perméamètre de Philip-Dunne (Alakayleh et al. 2019; Dunne 1978) fonctionnent par forage et appliquent une charge de pression constante ou variable.

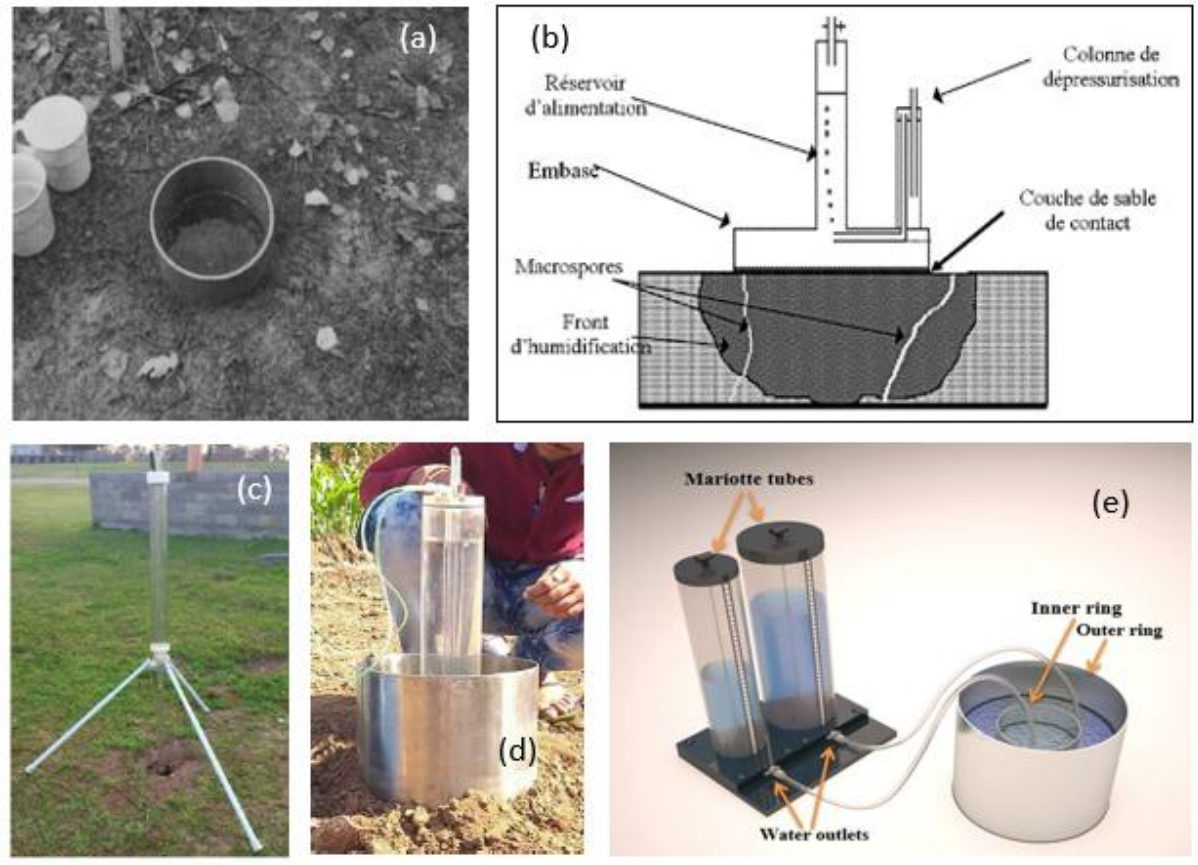


Figure II-10. Différents dispositifs d'infiltration, avec (a) la méthode Beerkan, (b) l'infiltromètre à tension, (c), le perméamètre de Guelph, (d) l'essai simple anneau avec dispositif automatisé, et (e)l'essai double anneau.

En revanche, les infiltromètres, tels que l'infiltromètre à simple anneau (Reynolds and Elrick 1991a), l'infiltromètre à double anneau (Boeno et al. 2021; Philip 1957b), l'anneau Beerkan (Braud et al. 2005; Lassabatère et al. 2006) et l'infiltromètre automatisé (Di Prima 2015), appliquent une condition de pression à la surface du sol et se différencient en fonction de la méthode utilisée. L'infiltromètre à disque (Ankeny et al. 1989, 1988; Perroux and White 1988; Tamoh and Maslouhi 2004), quant à lui, applique une tension (potentiel de pression négatif), permettant de mesurer l'infiltration en conditions insaturées, en activant uniquement la matrice du sol. Ces dispositifs, qu'il s'agisse de perméamètres ou d'infiltromètres de surface, permettent d'estimer l'infiltration cumulative $I(t)$ [L] et le taux

d'infiltration $i(t)$ [LT^{-1}] sous des conditions contrôlées, fournissant ainsi des données précieuses pour évaluer les caractéristiques hydrodynamiques du sol (Angulo-Jaramillo et al. 2016).

L'analyse des courbes d'infiltration fournies par ces différents dispositifs peuvent être modélisées numériquement ou analytiquement pour estimer les caractéristiques hydrodynamiques du sol. Toutefois, chaque dispositif présente des spécificités et des limitations, qui seront détaillées dans les sections suivantes.

II.8.1 Le perméamètre de Guelph

Le perméamètre de Guelph (Figure II-9, c) est un outil permettant d'estimer in situ la conductivité hydraulique saturée (K_s) et le potentiel de flux matriciel (φ_m) en générant un écoulement tridimensionnel autour d'un puits rempli d'eau et soumis à une charge hydraulique constante (Reynolds et al. 1983). L'expérimentation consiste à forer un puits de rayon r_w (0,02 m ou 0,03 m), à y appliquer une charge hydraulique contrôlée (H), et à mesurer le débit d'infiltration (Q) sous des conditions stabilisées.

L'estimation de la conductivité hydraulique saturée repose sur différentes approches analytiques. La méthode GP-R (Guelph Permeameter - Richards) considère l'effet de la capillarité, tandis que la méthode GP-L (Guelph Permeameter - Laplace) l'ignore, entraînant ainsi une surestimation de K_s. L'expression générale utilisée pour déterminer K_s est :

$$K_s = \frac{Q}{C * H} \tag{45}$$

Où C est un coefficient dépendant du modèle d'analyse et des propriétés du sol.

Le potentiel de flux matriciel (φ_m), indicateur de la pression capillaire dans le sol, est évalué via la méthode GP-G (Guelph Permeameter - Gardner), qui modélise la décroissance exponentielle de la conductivité hydraulique en fonction de la charge de pression (h) :

$$K(h) = K_s e^{-\alpha h} \tag{46}$$

Où α est un paramètre décrivant la décroissance du flux capillaire. L'estimation de φ_m repose sur la relation :

$$\varphi_m = \frac{H}{\lambda} \tag{47}$$

Avec λ un paramètre empirique dépendant du sol. Les méthodes qui négligent l'effet de l'écoulement saturé tendent à surestimer λ, contrairement à GP-R qui prend en compte cette composante. Enfin, la structure du sol et le diamètre du puits influencent les mesures de K_s et φ_m. L'hétérogénéité et la

présence de macropores peuvent fausser les estimations, justifiant ainsi l'adoption de modèles analytiques ajustés aux conditions locales (Fatehnia et al. 2016).

II.8.2 Le perméamètre de Philip-Dunne

Le perméamètre de Philip-Dunne (Dunne 1978), inspiré des travaux de (Philip 1957b) et simplifié par (Regalado et al. 2005), permet d'estimer in situ la conductivité hydraulique saturée (K_s) et la sorptivité (S) du sol sous une charge hydraulique constante. Ce dispositif, constitué d'un cylindre de diamètre standard (généralement 100 mm), est enfoncé dans le sol, formant un puits de rayon r_w, puis rempli d'eau afin de maintenir une charge hydraulique contrôlée (H). L'eau s'infiltre dans le sol, et le débit stabilisé (Q) est mesuré, permettant d'estimer K_s via la relation :

$$Q = C \cdot K_s \cdot H \tag{48}$$

Où C est un coefficient dépendant des caractéristiques du sol et de la géométrie du puits. Le modèle de (Philip 1957b) décrit également l'infiltration cumulative $I(t)$ en fonction du temps (t) par l'équation :

$$I(t) = S \cdot t^{\frac{1}{2}} + A \cdot t \tag{49}$$

Où S représente la sorptivité et A un coefficient lié à K_s. Cette méthode, bien qu'appréciée pour sa simplicité d'application sur le terrain, reste sensible aux variations structurelles du sol, notamment l'hétérogénéité et la présence de macropores, pouvant influencer l'interprétation des résultats.

II.8.3 L'infiltromètre à simple anneau

L'infiltromètre à simple anneau (Figure II-9, d) est un outil classique utilisé pour mesurer l'infiltration d'eau dans les sols. Il consiste en un anneau unique inséré partiellement dans le sol, à l'intérieur duquel de l'eau est ajoutée pour observer le taux d'infiltration. Cette méthode peut être sensible aux conditions locales, comme la rugosité de surface et les perturbations causées lors de l'installation, limitant parfois la précision des mesures (Reynolds and Elrick 1991b). La méthode Beerkan (Figure II-9, a) fait partie des essais simple anneau. Cette méthode requiert un opérateur pour verser successivement des volumes connus et noter leurs temps d'infiltration. Cette méthode est décrite plus en détail dans la section suivante.

Concialdi et al. (2020) ont amélioré cette approche en introduisant l'infiltromètre automatisé, facilitant les mesures en éliminant les biais humains tout en augmentant la reproductibilité des résultats. L'infiltromètre automatisé permet une flexibilité pour des sols variés et des situations complexes. La méthode Beerkan manuelle ou automatisée, peut être combinée aux algorithmes BEST, et permet ainsi une application directe pour évaluer des paramètres hydrodynamiques. Néanmoins, elle nécessite des ajustements précis ou certaines précautions pour des sols hétérogènes ou complexes.

Au cours de la dernière décennie, des alternatives ont été développées pour améliorer la robustesse des mesures et s'adapter à divers contextes de terrain. (Bagarello et al. 2004) ont exploré des dispositifs d'infiltrométrie à charge variable, réduisant le temps d'expérimentation tout en assurant une meilleure représentativité des sols structurés. Ces avancées illustrent la nécessité d'adapter les méthodes d'infiltrométrie aux spécificités des sols et aux exigences opérationnelles, favorisant ainsi le développement de dispositifs plus précis et plus faciles à utiliser sur le terrain.

II.8.4 L'infiltromètre à double anneau

La méthode des doubles anneaux, introduite par Philip (1957b), a été développée pour minimiser les effets de bordure associés aux infiltromètres à simple anneau. Il s'agit ici de rendre l'infiltration vertical dans l'anneau centrale et de supprimer la composante radiale. Cette technique consiste à insérer deux anneaux concentriques dans le sol : l'anneau externe sature latéralement le sol, limitant ainsi les écoulements horizontaux et permettant une estimation plus précise de la conductivité hydraulique à saturation (K_s).

Cependant, des recherches ultérieures ont mis en évidence certaines limitations. Bouwer (1986) a souligné que l'hétérogénéité du sol et la présence de macropores peuvent influencer les chemins d'infiltration, compromettant ainsi la précision des estimations de K_s. De même, Reynolds et al. (Reynolds et al. 2000) ont observé que ces facteurs peuvent entraîner des écoulements préférentiels, rendant les mesures moins fiables.

Pour surmonter ces défis, des améliorations ont été proposées. Morel-Seytoux et Khanji (Morel-Seytoux and Khanji 1974) ont développé des modèles prenant en compte la double porosité du sol, offrant une meilleure compréhension des écoulements préférentiels. L'intégration de capteurs de pression et de systèmes de suivi automatisés a également amélioré la précision des mesures, tout en réduisant les erreurs humaines (Zhang 1997).

II.8.5 L'infiltromètre à disque

Cet outil mesure l'infiltration sous une charge constante ou variable à l'aide d'un disque posé directement sur le sol (Figure II-9, b). Ces dispositifs associent un système de Mariotte — permettant d'appliquer une succion contrôlée —, un réservoir et une poire d'alimentation en contact avec le sol. L'intérêt de ces infiltromètres est qu'ils sollicitent le sol dans des conditions non saturées en surface, en appliquant un potentiel de pression inférieur à 0 (ou à la pression d'entrée d'air). Cela a pour effet de mobiliser uniquement une partie de la porosité du sol, à savoir la porosité matricielle, tout en désactivant les macropores. Avec ce type de dispositif, il est ainsi possible de caractériser la matrice

du sol, moyennant des traitements des données, souvent basés sur la considération du modèle van Genuchten (1980) – Mualem (1976) pour les courbes hydrodynamiques (Perroux and White 1988).

Tamoh et Maslouhi (2004) ont étudié l'utilisation de l'infiltromètre à disque dans un contexte semi-aride au Maroc, démontrant son efficacité pour caractériser les propriétés hydrodynamiques in situ, notamment sur les sols complexes de Mnasra. Leur travail a également souligné l'importance des variations locales de texture et de structure sur les mesures d'infiltration, renforçant la pertinence de ce dispositif pour une utilisation sur le terrain. On peut aussi noter que cette approche a été combinée avec la méthode Beerkan classique afin de caractériser les sols à perméabilité duale (Lassabatere et al. 2019). L'infiltromètre à tension permet alors la caractérisation de la matrice, tandis que l'essai Beerkan prend en compte la macroporosité.

II.8.6 La méthode Beerkan

Développée par Braud et al. (2005), cette méthode combine des mesures d'infiltration simple-anneau avec l'estimation des propriétés hydrodynamiques par un algorithme spécifique : l'algorithme BEST (Lassabatère et al. 2006). La méthode expérimentale a été construite pour être excessivement simple et donc déployable pour de grandes campagnes avec le minimum de matériel et de complexité. De ce fait, cette méthode a connu un succès important et a été déployée pour un grand nombre d'étude (Angulo-Jaramillo et al. 2019). L'algorithme BEST initial (Lassabatère et al. 2006) a lui aussi connu de nombreuses modifications et adaptations aux sites ayant des particularités contrastées (sols hydrophobes écoulements préférentiels, etc.). Toutes les variantes de l'algorithme BEST sont décrites ci-dessous.

II.8.6.1 Variantes classiques pour le traitement des données infiltrométriques

Toutes les variantes de BEST se basent dans un premier temps sur l'estimation des paramètres de forme, comme expliqué ci-dessus, puis dans un deuxième temps sur l'estimation de la sorptivité S $[LT^{-\frac{1}{2}}]$ et la conductivité hydraulique à saturation K_s $[LT^{-1}]$. Ces deux paramètres sont fondamentaux pour caractériser l'infiltration de l'eau dans le sol. Leur estimation repose sur l'ajustement des modèles analytiques décrits par Haverkamp et al. (1994) et réécrits par Lassabatere et al. (2006). Par la suite, le paramètre d'échelle pour le potentiel de pression d'eau, h_g peut être déduit de la relation suivante (Lassabatère et al. 2006):

$$h_g = -\frac{S^2}{c_p(\theta_s - \theta_i)\left[1 - \left(\frac{\theta_i}{\theta_s}\right)^{\eta}\right]K_s} \tag{50}$$

Avec

$$c_p = \Gamma\left(1+\frac{1}{n}\right)\left\{\frac{\Gamma\left(m\eta-\frac{1}{n}\right)}{\Gamma(m\eta)}+\frac{\Gamma\left(m\eta+m-\frac{1}{n}\right)}{\Gamma(m\eta+m)}\right\} \quad (51)$$

Où Γ est la fonction gamma, et m, n, η sont des paramètres de forme relatifs à la courbe de rétention d'eau. Par la suite, nous détaillons les algorithmes utilisés pour ajuster les données infiltrométriques par les cinq variantes. Une représentation synthétique est présentée dans la Figure III-10.

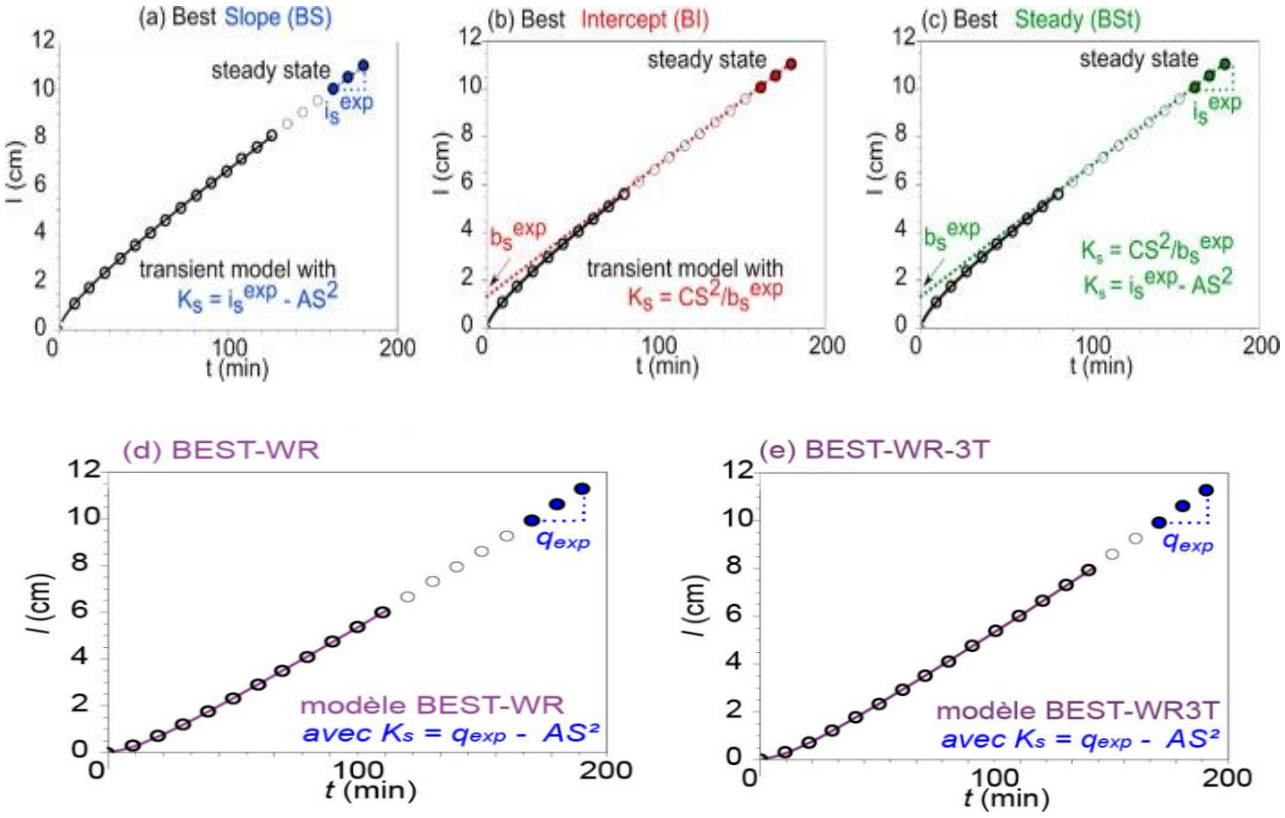


Figure II-11. Cinq variantes de la méthode BEST, BREST-Slope, BEST-Intercept, BEST-Steady, BEST-WR et BEST-WR3T. Les points pleins sont ceux qui ont été sélectionnés pour décrire le régime asymptotique (régime permanent). Les points sont les données expérimentales et les lignes les données modélisées. Illustration à partir de données générées analytiquement.

II.8.6.1.1 BEST-Slope

Toutes les variantes classiques de l'algorithme BEST reposent sur l'ajustement des données expérimentales sur le même modèle analytique défini par l'équation (34). La première variante de l'algorithme BEST-Slope remplace la conductivité hydraulique en fonction de la sorptivité en utilisant le taux d'infiltration en régime permanent, i_s^{exp}, conformément à l'équation (37). Cette contrainte supplémentaire permet d'établir un lien entre S et la conductivité hydraulique saturée K_s. Afin de surmonter les problèmes liés à la non-unicité des paramètres et d'améliorer la robustesse de l'inversion,

l'infiltration cumulative est reformulée, et seule la sorptivité est optimisée. Cette approche aboutit aux relations suivantes :

$$K_s = i_s^{exp} - AS^2 \tag{52}$$

$$I(t) = S\sqrt{t} + \left[A(1-B)S^2 + Bi_s^{exp}\right] t \tag{53}$$

Dans ces expressions,$I(t)$ désigne l'infiltration cumulative et i_s^{exp} correspond au taux d'infiltration expérimentalement déterminé en régime permanent. Ce dernier est obtenu par régression linéaire sur les derniers points de la courbe d'infiltration, représentant l'état d'équilibre. La valeur de i_s^{exp} est alors assimilée à la pente de la droite de régression. L'estimation de la sorptivité S repose alors sur l'ajustement de l'équation aux données expérimentales. Cette optimisation est réalisée en minimisant une fonction objective classique définie comme suit :

$$f(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^{k} [I^{exp}(t_i) - I_{est}(t_i)]^2 \tag{54}$$

Où I^{exp} représente l'infiltration cumulative mesurée expérimentalement et $I^{mod}(t_i)$l'infiltration cumulative modélisée. Une fois *S* déterminée, la conductivité hydraulique K_s peut être calculée à l'aide de l'équation (54).

Comme ce modèle utilise la phase transitoire de l'infiltration, il peut perdre en précision lorsque le nombre de points de données ajustés (k) est trop important et que le modèle ajuste une partie de la courbe cumulée en dehors du régime transitoire. Pour pallier ce problème, BEST-Slope ajuste les données en sélectionnant un sous-ensemble de points, allant d'un minimum de cinq jusqu'à N_{tot}, soit l'ensemble des données disponibles. Pour chaque ensemble contenant les k premiers points, soit une durée d'expérience t_k, les paramètres S et $K_s$sont estimés et on détermine un temps maximal qui définit le régime transitoire. On vérifie a posteriori la validité de l'approche en comparant t_k à ce temps maximal. Ce dernier est donné par la relation suivante (Lassabatère et al., 2006) :

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-B)^2}\left(\frac{S}{K_s}\right)^2 \tag{55}$$

Ici, le rapport $\frac{S}{K_s}$ correspond au temps caractéristique de la gravité défini par (Philip 1969). Seules les valeurs de S et K_s associées aux cas pour lesquels $t_k \leq t_{max}$ sont considérées comme valides. Parmi ces combinaisons, celle correspondant à la valeur maximale de $k(k_{step})$ est retenue, car elle est supposée fournir les estimations les plus fiables.

II.8.6.1.2 BEST-Intercept

D'après Yilmaz et al. (2010), l'algorithme BEST-Slope peut conduire à une estimation erronée de la conductivité hydraulique saturée, K_s, en particulier lorsque le taux d'infiltration initial (i_s) est proche de la pente de la courbe d'infiltration stabilisée, AS^2. Dans de telles conditions, l'utilisation de l'équation (54) pour estimer K_s devient inadaptée. En effet, si la valeur estimée de AS^2 dépasse le taux d'infiltration mesuré à la fin de l'expérience, l'estimation de K_s peut devenir négative, ce qui est physiquement incohérent.

Pour remédier à cette limitation, l'algorithme BEST-Intercept (Yilmaz et al. 2010) établit une relation alternative entre la sorptivité S et K_s, en exploitant l'ordonnée à l'origine de l'expansion asymptotique $I_{+\infty}(t)$ (Equation 36). Cette relation est définie par :

$$b_s{}^{exp} = C \times \frac{S^2}{K_s} \tag{56}$$

Où $b_s{}^{exp}$, l'ordonnée à l'origine, est déterminé par régression linéaire des points décrivant l'infiltration en régime permanent. Ainsi, K_s, est calculé via l'équation suivante :

$$K_s = C\ \frac{S^2}{b_s^{exp}} \tag{57}$$

Contrairement à BEST-Slope, cette approche repose sur une division plutôt qu'une soustraction, garantissant ainsi une estimation toujours positive de K_s.

En combinant les équations (34) et (57), on obtient une nouvelle expression pour l'infiltration cumulative en régime transitoire :

$$I(t) = S\sqrt{t} + \left(AS^2 + BC\frac{S^2}{b_s^{exp}}\right)t. \tag{58}$$

Cette équation constitue une alternative à l'équation (55) et est utilisée pour estimer S selon la même approche que dans BEST-Slope. La validité temporelle du modèle d'infiltration transitoire est également évaluée par le calcul du temps maximal t_{max}. Une fois S déterminé, S est insérée dans l'équation (57) pour estimer K_s.

II.8.6.1.3 BEST-Steady

D'après Bagarello et al. (2014a), BEST-Steady emploie l'interception ($b_s{}^{exp}$) et la pente ($i_s{}^{exp}$) de la régression des points définissant le régime permanent sur le graphique de I par rapport à t. En combinant les équations (54) et (56), qui concernent la définition de la pente et de l'interception de l'expansion en régime stable, on obtient :

$$i_s^{exp} = AS^2 + C\frac{S^2}{b_s^{exp}} \tag{59}$$

Et ainsi, S peut être déterminé de la manière suivante :

$$S = \sqrt{\frac{i_s^{exp}}{A+\frac{C}{b_s^{exp}}}} \tag{60}$$

Ensuite, Ks peut être déterminé en utilisant soit l'équation (54), (58), soit en le calculant de la manière suivante :

$$K_s = \frac{Ci_s^{exp}}{Ab_s^{exp}+C} \tag{61}$$

II.8.6.2 Les nouvelles variantes de BEST

Les méthodes BEST classiques ne permettent pas de représenter les courbes convexes mais uniquement des courbes concaves. La concavité traduit le fait que le taux d'infiltration décroît normalement dans le temps de valeurs quasi infinie au début (quand le gradient hydraulique est maximal) vers un flux quasi constant fonction de la conductivité hydraulique à saturation du sol et de la sorptivité. Lorsque le sol est hydrophobe, les écoulements sont restreints au début et donc le taux peut prendre des valeurs très faibles en place et lieu des valeurs quasi infinies. Cela se traduit par des courbes convexes ou mixte avec une convexité initiale avant de présenter une concavité. Pour permettre la modélisation de ces courbes, deux nouvelles variantes de BEST à savoir BEST-WR et BEST-WR-3T ont été mises au point et sont présentées et appliquées ci-après.

II.8.6.2.1 Approche globale de correction pour l'hydrophobicité

L'infiltration de l'eau dans les sols hydrophobes est donc freinée en début de parcours. Pour permettre une modélisation de ce processus, une correction a été proposée pour corriger le taux d'infiltration, et permettre des valeurs qui partent à l'instant t=0 de zéro (0) à un maximum pendant la phase de diminution de l'hydrophobicité. L'infiltration cumulée est ensuite calculée par intégration du taux d'infiltration modifié (Abou Najm et al. 2021). Ci-dessous l'équation du taux d'infiltration avec le terme correctif :

$$i_{WR}(t) = i(t)(1 - e^{-\alpha_{WR}t}) \tag{62}$$

Avec $i_{WR}(t)$ le taux d'infiltration dans les sols hydrophobes **(**L T^{-1}**)**, t le temps de dimension **(**T**)** depuis le début des expérimentations et α_{WR} est un paramètre d'échelle **(**T^{-1}**)**. Le paramètre α_{WR} est traduit directement l'hydrophobicité des sols (Abou Najm et al. 2021). Le paramètre α_{WR} peut aussi être relié à un temps caractéristique de disparition de l'hydrophobicité $t_{WR} = \log(2)/\alpha_{WR}$. L'infiltration

cumulée est ensuite obtenue par intégration dans le temps, $I_{WR}(t) = \int_0^t i_{WR}(u)du$. Les deux algorithmes BEST-WR et BEST-WR3T se distinguent par le modèle choisi pour décrire le taux d'infiltration $i(t)$ et proposent ainsi des équations différentes pour $i_{WR}(t)$ et $I_{WR}(t)$.

II.8.6.2.2 BEST-WR

L'algorithme BEST-WR applique le facteur de correction aux taux d'infiltration décrit par l'approximation à deux termes. Pour rappel, le modèle de référence est l'équation implicite quasi-exacte (QEI pour « Quasi-Exact Implicit formulation ») développée par Haverkamp et al. (1994). Les formulations du modèle quasi-exact peuvent être développées en séries au voisinage de zéro pour donner lieu à des approximations construire sur les 2 ou 3 premiers termes de la série. Le modèle de BEST-WR considère donc l'approximation à deux termes pour le taux d'infiltration (Eq. 37) pour y appliquer le facteur correctif pour donner lieu à l'équation suivante (Di Prima et al. 2021) :

$$I_{WR}(t) = S\sqrt{t} - \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\alpha_{WR}}}\mathrm{erf}\left(\sqrt{\alpha_{WR}t}\right) + [A(1-B)S^2 + B{i_s}^{exp}]t - \frac{[A(1-B)S^2 + B{i_s}^{exp}](1-e^{-\alpha_{WR}t})}{\alpha_{WR}} \quad (63)$$

Dans cette équation $\boldsymbol{erf}$ représente la fonction d'erreur de Gauss. BEST-WR a en complément utilisé la même relation que BEST-Slope pour remplacer K_s par S : $K_s = {i_s}^{exp} - AS^2$. Ainsi, l'équation (63) présente deux inconnues à savoir α_{WR} et S , rendant possible l'estimation de ces deux paramètres par ajustement des observations (Di Prima et al. 2021).

II.8.6.3 BEST-WR-3T

L'algorithme BEST-WR3T repose sur la même méthodologie si ce n'est que c'est une expansion à trois termes qui est utilisée pour le taux d'infiltration (Moret-Fernández et al. 2020).

$$I(t) = S\sqrt{t} + \left(\frac{2-\beta}{3}K_s + K_0 + AS^2\right)t + \frac{K_s}{9S}(\beta^2 - \beta + 1)t^{\frac{3}{2}} \quad (64)$$

Cette équation inclut donc les trois premiers termes de la série **:** terme en $\sqrt{t}$ qui correspond à la sorptivité qui domine l'infiltration en début d'infiltration, un deuxième terme en t lié avec au régime transitoire qui inclut le rôle de la gravité et donc impliquant la conductivité à saturation (K_s), et enfin troisième terme en $\boldsymbol{t^{\frac{3}{2}}}$ qui est aussi associé à la contribution de la gravité et qui est rarement pris en considération. Le nombre de termes à considérer fait l'objet de discussion au sein de la communauté scientifique (Lassabatere et al. 2009; Moret-Fernández et al. 2020). L'expression finale du modèle BEST-WR3T est complexe et prend la forme suivante (Yilmaz et al. 2022) :

$$I_{WR3T}(t) = I_{WR}(t) + \frac{(\beta^2 - \beta + 1)}{9}\frac{\left(i_{+\infty}^{exp} - AS^2\right)^2}{S}t^{\frac{3}{2}} \quad (65)$$

$$-\frac{(\beta^2-\beta+1)}{6}\frac{\left(i_{+\infty}^{exp}-AS^2\right)^2}{S}\left[-\frac{t^{\frac{1}{2}}}{\alpha_{WR}}e^{-\alpha_{WR}t}+\frac{\sqrt{\pi}}{2\alpha_{WR}^{3/2}}erf(\alpha_{WR}\,t)\right]$$

Tout comme pour l'algorithme BEST-WR, la relation $K_s = i_{+\infty}^{exp} - AS^2 +$ a été utilisée pour exprimer le modèle en fonction des deux inconnues S et α_{WR}. En conséquence, l'expérience doit être menée jusqu'à atteinte du régime permanent, bien que la méthode d'analyse des données varie selon l'algorithme.

II.9 Conclusions de l'état de l'art et introduction de la problématique scientifique

Ces outils, dispositifs et protocoles, bien que différents dans leurs conceptions, ont tous contribué à une meilleure compréhension des processus d'infiltration et de rétention d'eau dans les sols. Ils constituent une base solide pour les travaux méthodologiques développés antérieurement à cette thèse, mais aussi dans cette thèse qui s'appuie notamment sur des infiltromètres automatisés de (Concialdi et al. 2020) et sur la méthode Beerkan classique, ainsi que les méthodes BEST.

L'ensemble de ces éléments mentionnés dans cette partie met en évidence que la performance des méthodes de mesure et de traitement dépend fortement du type de sol, du régime d'écoulement et de la résolution temporelle des données acquises. Pour répondre aux questions scientifiques liées à cette thèse nous nous basons sur l'adéquation des dispositifs expérimentaux (protocole Beerkan Manuel et version automatisée) et des algorithmes actuels pour la caractérisation hydrodynamique des sols urbains dans divers contextes.

III Matériels et Méthodes

Après avoir exploré divers outils infiltrométriques et les algorithmes BEST pour la caractérisation hydrodynamique des sols, nous nous focalisons ici sur deux instruments clés de cette thèse : l'anneau Beerkan et l'infiltromètre automatisé présentés ci-dessus combinés avec les algorithmes BEST pour une caractérisation complète des propriétés hydrodynamiques des sols. Le chapitre précédent a mis en lumière l'importance d'outils plus précis, accessibles et économiquement viables pour affiner la caractérisation hydrodynamique des sols.

Notre démarche scientifique repose sur trois axes de recherche principaux, chacun répondant à une question scientifique spécifique à travers une méthodologie adaptée :

1. **Validation de l'infiltromètre automatisé**. Afin d'évaluer la fiabilité et la précision de cet outil, nous avons mené une étude comparative avec la méthode Beerkan classique. Cette approche expérimentale permet de vérifier la concordance des paramètres hydrodynamiques obtenus par les deux dispositifs et d'identifier les éventuelles divergences.
2. **Impact de la taille de l'anneau infiltrométrique sur l'infiltration et les macropores.** Ce volet vise à analyser l'influence du diamètre de l'anneau (15 cm et 50 cm) sur les processus d'infiltration. Pour ce faire, des essais comparatifs ont été réalisés afin de quantifier les variations d'infiltration cumulées et de paramètres hydrodynamiques et relier cela à l'activation de réseaux de macropores du sol.
3. **Application à grande échelle de l'infiltromètre automatisé**. Dans cette dernière phase, l'objectif est d'évaluer la pertinence et l'efficacité de cet outil pour la caractérisation hydrodynamique des sols en contexte urbain. L'exploitation des résultats obtenus à travers les différentes expérimentations permettra d'examiner la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques et d'envisager des applications opérationnelles.

Dans cette partie, nous commencerons par présenter les sites d'étude sélectionnés, en détaillant leurs caractéristiques physiques et pédologiques. Ensuite, nous décrirons les outils et protocoles expérimentaux mis en œuvre pour chaque axe de recherche, avec un accent particulier sur la méthode Beerkan et l'infiltromètre automatisé. Une attention spécifique sera portée à l'algorithme BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters), en détaillant ses trois variantes historiques BEST-Slope, BEST-Intercept et BEST-Steady ainsi que deux autres variantes nouvellement développées pour les sols hydrophobes. Enfin, nous exposerons les outils statistiques et méthodes de traitement des données pour interpréter les résultats obtenus.

III.1 Méthodologie générale et sites

Dans le cadre de cette thèse, des expérimentations ont été menées sur différents types de sols, principalement dans la région lyonnaise, ainsi qu'au Sénégal, afin d'évaluer les performances des méthodes infiltrométriques dans des contextes pédologiques variés. Les sites sont décrits axe par axe, tels que décrits ci-dessus.

III.1.1 Comparaison des méthodes manuelle et automatisée de l'essai Beerkan

L'étude comparative des méthodes manuelle et automatisée a été réalisée sur le campus de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE). Ce site expérimental présente un sol aménagé, représentatif des environnements urbains, avec une texture limono-sableuse et une structure influencée par les activités anthropiques. Le campus de l'ENTPE et de l'ENSAL (École Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon) est situé à Vaulx-en-Velin, dans l'est de l'agglomération lyonnaise, en France. Le campus de l'ENTPE a un rôle crucial dans les activités pédagogiques et scientifiques de l'établissement. Ils sont utilisés par des étudiants de divers cursus, notamment les Bachelors en transitions écologiques, pour des expérimentations pratiques portant sur des thématiques liées à l'hydrologie, la gestion durable des sols et la caractérisation hydrodynamique. Ce cadre permet de combiner enseignement théorique et pratique, tout en soutenant les recherches appliquées à la transition environnementale.

Au sein du campus, des sites ont été spécifiquement sélectionnés en raison de leur diversité texturale et de leurs propriétés variées, qui en font un terrain idéal pour comparer la méthode manuelle de BEST à sa version automatisée. L'objectif est d'évaluer la reproductibilité et la performance des deux méthodes dans des conditions réelles et sur des sols aux caractéristiques hydrodynamiques contrastées, même si tous ces sites reposent sur des alluvions fluvioglaciaires du Rhône. Ainsi, quatre sites distincts ont été sélectionnés afin d'évaluer la dépendance des résultats aux conditions locales du sol et de la végétation. Ces sites, situés dans des zones enherbées avec la présence d'arbres, présentent une biodiversité marquée, notamment par la présence de vers de terre, dont l'activité peut influencer la dynamique d'infiltration de l'eau.



Figure III-1. Site2 de l'ENTPE

En complément des expérimentations sur le site ENTPE, des essais ont été réalisés sur un site suivi pour le changement climatique au Sénégal. Ce site offre un contexte pédologique extrême permettant d'évaluer la robustesse de l'infiltromètre automatisé sur un sol sableux très uniforme (granulométrie et structure homogènes). L'intégration de ce site permet d'avoir de tester un sol « simple » bien homogène spatialement, ce qui peut être considéré comme un site de référence pour la comparaison des méthodes Beerkan manuelle et automatisée.

III.1.2 Effet de la taille de l'anneau sur l'infiltration et l'activation des macropores

Les expérimentations visant à étudier l'impact de la taille de l'anneau infiltrométrique sur les flux d'infiltration et l'activation des macropores ont été menées sur plusieurs sites. Une première partie des expérimentations a été menées sur une surface d'environ 800 m² situé sur le campus de l'ENTPE. Le site est décrit dans la section précédente.

D'autres expérimentations infiltrométriques ont été réalisés sur d'autres sites, dont un parking drainant à proximité d'une tranchée drainante, sur le site de la Doua (campus de l'INSA), et sur un autre site à proximité du bassin d'infiltration de l'IUT situé aussi sur le campus de la Doua. Le parking drainant présente un sol hétérogène, relativement grossier. Le bassin de l'IUT couvre une surface totale de 900 m², dont environ 600 m² ont été utilisés pour les essais infiltrométriques. En effet, les expérimentations ont été menées en périphérie du bassin, les conditions du sol à l'intérieur n'étant pas propices à l'installation des dispositifs de mesure en raison de la présence de galets en surface. Sur cette zone périphérique, le sol est de type sable limoneux ou limon sableux. Le sol, partiellement recouvert d'herbes et parsemé d'arbres, présente une activité biologique notable (insectes, vers de terre, etc.), susceptible d'influencer les mécanismes d'infiltration. Plus de détails peuvent être trouvés dans la thèse de (Fernandes 2023).

III.1.3 Robustesse de l'infiltromètre automatisé et relation entre biodiversité et infiltration

L'évaluation de la robustesse de l'infiltromètre automatisé et son application à l'étude du lien entre biodiversité et infiltration ont été réalisées dans le cadre du projet collectifs mené sur plusieurs zones vertes de la région lyonnaise (https://collectifs-biodiversite.universite-lyon.fr/). Cette étude vise à analyser la biodiversité en ville. Un des objectifs s'est construit autour du lien entre biodiversité et caractéristiques physiques des sols, notamment leur degré d'anthropisation et leurs propriétés hydrodynamiques. L'objectif est donc ici d'examiner la capacité de l'infiltromètre automatisé à fournir des mesures précises et reproductibles sur des terrains présentant des conditions hydrodynamiques hétérogènes. Ainsi, six sites situés ont été investigués, dans le cadre de cet axe. Ces sites ont été sélectionnés pour leur diversité en termes de texture, de structure du sol et de gestion des espaces, permettant d'aborder l'impact des pratiques urbaines et environnementales sur l'infiltration de l'eau.

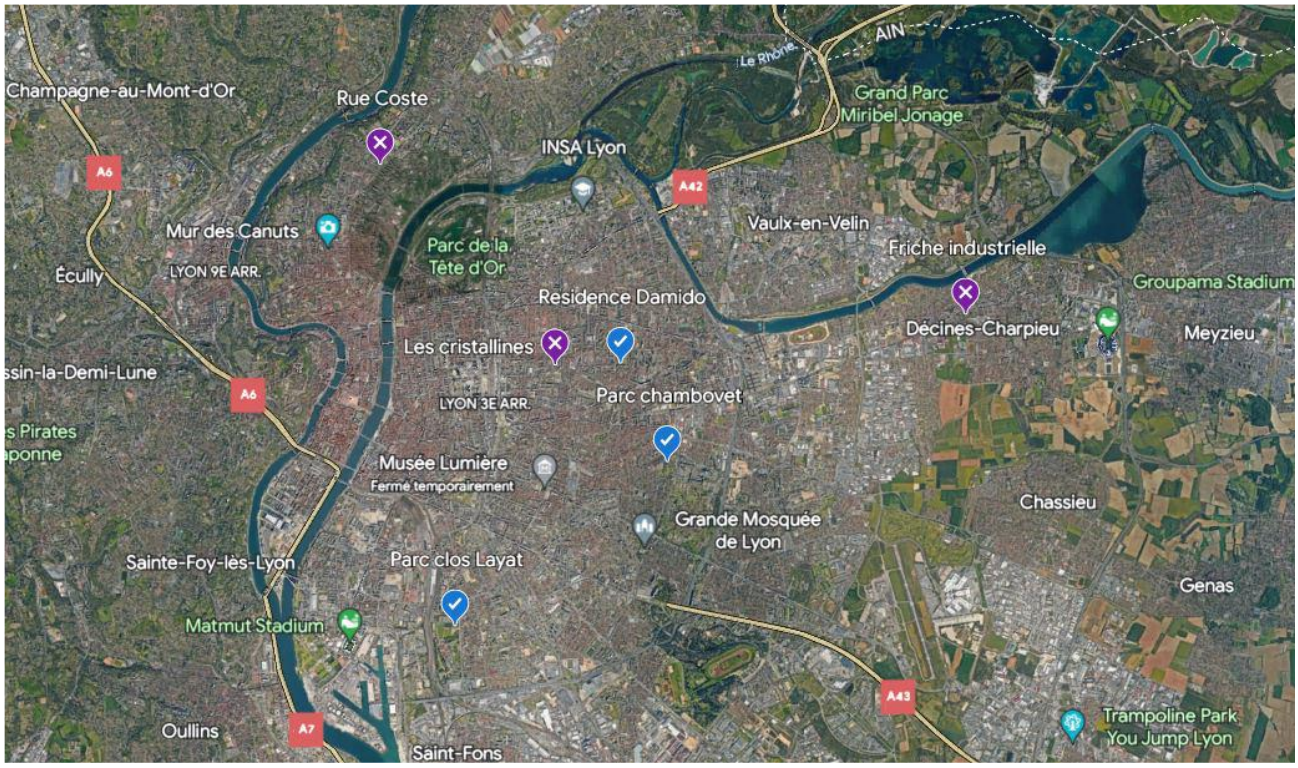


Figure III-2. Localisation des sites expérimentaux investigues en 2021 (sites en bleu) et en 2022 (sites en violet)

Le parc urbain de Chambovet est situé sur un relief relativement vallonné offre une combinaison de sols engazonnés et de zones arborées, où la présence des racines et la structure du sol influencent les dynamiques d'infiltration. L'effet du couvert végétal et des interactions avec la faune du sol constitue un élément central de l'étude sur la biodiversité et l'hydrodynamique.

Le parc Clos Layat est une ancienne friche aménagée en parc public, cette zone présente une végétation hétérogène composée d'espaces herbacés, de jeunes plantations et de bosquets plus denses.

L'infiltration y est susceptible d'être influencée par une stratification du sol résultant des aménagements récents.

La résidence Damidot est située au sein d'un ensemble résidentiel à Villeurbanne, ce site présente des sols compactés sous l'effet des circulations piétonnes et des aménagements paysagers, offrant un cadre intéressant pour analyser la dynamique d'infiltration dans des espaces urbanisés à usage mixte.
Le site résidentiel de Cristalline, situé à Villeurbanne se distingue par un aménagement plus structuré, avec des surfaces enherbées bien entretenues et des plantations maîtrisées. La dynamique d'infiltration y est influencée par l'entretien régulier et une possible modification des horizons de surface.



Figure III-3. Illustration d'expérimentation sur les sites investigués

Localisé dans un quartier périurbain, l'espace résidentiel Coste (Caluire et Cuire) présente une diversité d'occupation du sol, combinant zones engazonnées, massifs arbustifs et surfaces plus compactées.

Cette hétérogénéité offre un terrain d'étude intéressant pour évaluer l'impact de la structure du sol sur l'infiltration.

La friche urbaine de Décines-Charpieu, en transition écologique, est caractérisée par une végétation spontanée et un sol potentiellement peu anthropisé. L'étude y revêt un intérêt particulier pour comprendre le rôle des sols non aménagés dans la gestion des eaux pluviales et le maintien de la biodiversité.

III.2 Présentation des outils d'études pour la caractérisation hydrodynamique des sols

L'évaluation de l'infiltration de l'eau dans le sol repose sur l'utilisation d'outils de mesure adaptés, garantissant la fiabilité des données et la représentativité des résultats. Dans cette thèse, plusieurs dispositifs ont été mobilisés afin d'analyser les propriétés hydrodynamiques des sols en fonction des objectifs spécifiques de chaque axe de recherche. Ces instruments ont été sélectionnés en tenant compte de leur capacité à fournir des mesures précises tout en s'adaptant aux différentes configurations expérimentales.

La méthode Beerkan, introduit par (Braud et al. 2005), constitue un outil de référence pour les essais d'infiltration de surface. Elle permet une estimation efficace de la capacité d'infiltration des sols et de leurs paramètres hydrodynamiques à partir d'un protocole standardisé, basé sur l'application successive de volumes d'eau versés dans un anneau. L'infiltromètre automatisé, basé sur un dispositif qui délivre automatiquement l'eau dans l'anneau, représente une évolution méthodologique significative, intégrant un système de mesure automatisé améliorant la précision et la reproductibilité des essais (Concialdi et al. 2020; Di Prima 2015).

Dans le cadre du second axe de cette étude, qui s'intéresse à l'effet de la taille de l'anneau sur l'infiltration, le prototype d'infiltration INFILTRON (www.infiltron.org) a également été utilisé pour assurer l'infiltration au sein d'un anneau de grande taille (50 cm de diamètre au lieu des 15 cm habituels). Cet infiltromètre a été dimensionné pour suivre en même temps l'infiltration d'eau et réalisé l'injection de nano-traceurs qui sont ensuite suivis par radar géologique dans le sol (Lassabatere et al. 2020). En combinant ces différents outils, cette étude vise à investiguer différents protocoles de mesures de l'infiltration et affiner la compréhension des mécanismes d'infiltration

III.2.1 Méthode Beerkan classique

La méthode Beerkan (Braud et al. 2005) est un essai « simple anneau » et repose sur l'utilisation d'un anneau pour y verser des volumes successifs d'eau. Conçu en acier inoxydable, cet anneau possède un diamètre de 15 cm et une hauteur standard de 10 cm. Son bord inférieur est biseauté afin de faciliter son insertion dans le sol tout en minimisant la perturbation de la structure du sol environnant. Après

avoir soigneusement retiré la végétation superficielle (pour éviter toute interférence avec l'infiltration), l'anneau d'infiltration est inséré dans le sol sur une profondeur de 1 à 2 cm tout en veillant à ne pas altérer la structure du sol sous-jacent. Ensuite, le sol à proximité des bords intérieurs et extérieurs de l'anneau est tassé pour éviter les pertes d'eau latérales. L'opérateur prépare ensuite un ensemble de volumes d'eau, généralement de l'ordre de 200 ou 300 mL qui seront ensuite successivement versés au sein de l'anneau. L'infiltration de volumes d'eau est ensuite suivie par la mesure des temps d'infiltration successifs. Concrètement, la sollicitation hydraulique impose des conditions de charge hydraulique quasi nulle mais décroissante, entre le moment où le volume d'eau vient d'être versé et juste avant le versement du volume suivant.

La méthode Beerkan est largement utilisée pour sa simplicité de mise en œuvre et son adéquation aux sols présentant une hétérogénéité modérée (Angulo-Jaramillo et al. 2000, 2019). Elle permet une estimation des paramètres hydrodynamiques du sol via des approches inverses, en couplant les mesures d'infiltration avec des modèles analytiques tels que l'algorithme BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters) (Angulo-Jaramillo et al. 2019).

III.2.2 Infiltromètre automatisé

III.2.2.1 Description du dispositif

L'infiltromètre automatisé a été utilisé pour explorer les trois axes d'étude mentionnés ci-dessus. Développé initialement par Di Prima (2015) et amélioré par Concialdi et al. (2020), cet infiltromètre repose sur une bouteille de Mariotte d'un diamètre interne de 94 mm et d'une hauteur de 850 mm, offrant une hauteur d'eau utilisable de 740 mm dans son réservoir. Sa capacité maximale de 5,13 litres permet une infiltration cumulative de 280 mm lorsqu'il est utilisé avec un anneau de 150 mm de diamètre. Le système de régulation (Bouteille de Mariotte) repose sur un tube d'entrée d'air de 7 mm de diamètre, assurant un contrôle précis du niveau d'eau appliqué au niveau du sol (± 2 mm). L'ensemble du dispositif est hermétiquement scellé pour éviter toute perturbation externe. Il est monté sur un trépied ajustable conçu par découpe laser et impression 3D, permettant une adaptation aux différentes configurations de terrain. Des capteurs de pression différentielle MPXV5010DP, positionnés aux extrémités du réservoir, mesurent en continu la pression hydraulique, permettant de déterminer avec précision la hauteur d'eau résiduelle et d'en déduire les flux d'infiltration. Alimentés en 5V, ces capteurs offrent une réponse linéaire jusqu'à 1000 mm H_2O avec une compensation thermique intégrée, garantissant une précision optimale même en conditions variables. La différence de pression entre le bas et le haut de la colonne permet (après calibration) une détermination exacte de la hauteur d'eau dans le système et donc la connaissance du volume d'eau infiltré.

Le dispositif d'infiltration est relié à un data logger (prototype maison) pour le stockage des données. Le data logger inclut une carte microcontrôleur Arduino Mega, associée à un écran LCD (20 x 4 caractères) et un module de stockage micro-SD. Les données sont enregistrées au format CSV pour une analyse ultérieure et affichées en temps réel sur l'écran du dispositif afin de permettre un suivi direct sur le terrain. Grâce à ces caractéristiques, l'infiltromètre automatisé assure des mesures précises et reproductibles, apportant ainsi une meilleure compréhension des processus d'infiltration et une optimisation des méthodes de caractérisation hydrodynamique des sols.

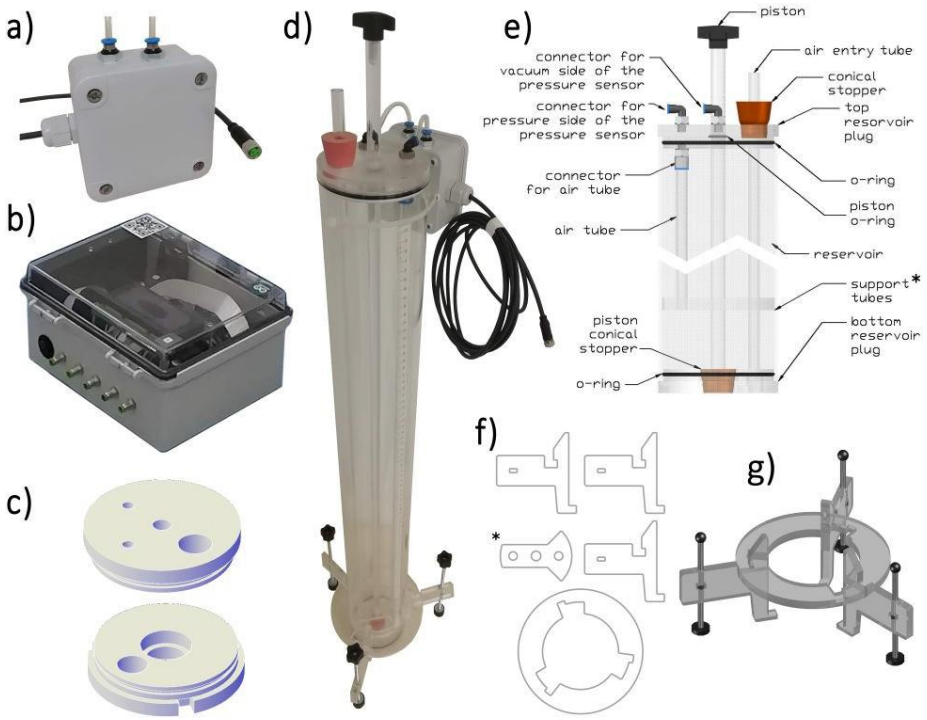


Figure III-4. Infiltromètres automatisés: a) capteur de pression différentielle, b) système d'acquisition de données, c) têtes du réservoir pour les parties haute et basse, d) infiltromètre dans son ensemble, e) détails du réservoir parties haute et basse, f-g) plan du trépied.

III.2.2.2 Déploiement sur le terrain

L'installation sur site débute par une préparation minutieuse du sol, tout comme pour la méthode Beerkan (Cf section précédente). Une fois l'anneau installé, une feuille plastique temporaire est placée à l'intérieur de l'anneau pour étanchéifier la surface du sol avant le début de l'essai. Un volume d'eau, compris entre quelques millimètres et 1 cm, est versé sur cette feuille pour stabiliser la feuille en plastique et éviter son envol (par temps venté). L'infiltromètre automatisé est ensuite positionné sur l'anneau et soigneusement ajusté. Une attention particulière est portée aux connexions des capteurs différentiels de pression, qui doivent être bien fixées et exemptes de fuites afin d'éviter toute entrée d'air pouvant fausser les mesures. Une vérification minutieuse est réalisée pour assurer la stabilité du dispositif avant le lancement de l'essai.

Au démarrage de l'infiltration, les pistons des infiltromètres sont ouverts, permettant ainsi à l'eau de s'infiltrer dans le sol et permet donc de lancer l'essai. Pendant l'essai, l'opérateur n'a rien à faire, l'infiltration suivant son cours et la donnée étant stockée automatiquement. L'opérateur peut donc prendre le temps de prélever des échantillons de sol autour des anneaux d'infiltration pour la détermination de la teneur en eau initiale du sol. Ces échantillons sont immédiatement placés dans des sacs plastiques hermétiques afin d'empêcher toute évaporation avant analyse.



Figure III-5. Déploiement des infiltromètres automatisés sur le terrain

Une fois toute l'eau infiltrée, l'infiltromètre est retiré et un échantillon de sol est prélevé au centre de l'anneau à l'aide d'un mini-cylindre pour mesurer la densité apparente. L'ensemble des échantillons recueillis avant et après l'infiltration est ensuite utilisé pour une analyse granulométrique, essentielle pour caractériser la texture du sol, affiner l'interprétation des résultats expérimentaux et appliquer la méthode BEST.

III.2.2.3 Traitement des données stockées sur la carte SD

Les fichiers CSV extraits de la carte SD du data logger de l'infiltromètre automatisé doivent être filtrées pour exploiter les mesures enregistrées. Ces fichiers contiennent l'évolution temporelle de la pression différentielle, exprimée en millivolts, entre le haut et le bas du réservoir. Ces valeurs sont ensuite converties en hauteur d'eau infiltrée grâce à une courbe d'étalonnage spécifique à chaque infiltromètre. Le traitement des données est réalisé à l'aide d'une application développée sur Scilab (https://www.scilab.org/), permettant de sélectionner les points expérimentaux pertinents et de définir les courbes d'infiltration cumulée. Ces courbes peuvent ensuite être traitées avec l'algorithme BEST, pour estimer les paramètres hydrodynamiques du sol. L'application de traitement/filtration des données peut être téléchargée sur le site web dédié à tous les détails de construction et utilisation de l'infiltromètre automatisé (https://bestsoilhydro.net/infiltrometer/).

III.2.3 Infiltromètre de grande taille INFILTRON

Le prototype d'infiltration INFILTRON est basé sur le principe de l'infiltromètre décrit ci-dessus de grande taille. Le dispositif inclut deux grandes colonnes qui servent de réservoirs et qui sont munies d'une valve pour l'eau et d'une autre valve positionnée au-dessus de la première pour l'entrée d'air. Cette dernière joue le rôle de système de Mariotte et permet de fixer le niveau d'eau. Un système de tuyau en forme de Y permet de connecter les deux réservoirs à un anneau en acier de 50 cm de diamètre. Enfin, les réservoirs sont munis d'appendices (système de tuyau transparent) permettant de suivre le niveau d'eau, de haut en bas du réservoir.

Avant mise en place du dispositif, le sol est nettoyé des branchages et autres encombrants, si besoin. L'anneau est enfoncé d'au moins 5 cm dans le sol pour empêcher toute fuite d'eau sur ses bords. Pour cela, on utilise une planche plus longue que le diamètre de l'anneau et on tape avec une massue sur les bords de l'anneau en faisant attention de taper symétriquement sur les deux bouts de la planche (correspondant aux bords opposés de l'anneau). Cela demande une certaine dextérité et force.



Figure III-6. Déploiement de l'infiltromètre INFILTRON sur le site de la Doua (droite) et à l'ENTPE (gauche)

Avant de lancer l'essai, les colonnes sont préalablement remplies d'eau. Les deux valves d'entrées d'air sont ouvertes pour initialiser les deux colonnes. Puis, une bâche est positionnée dans l'anneau de grande taille et un certain volume d'eau y est versé pour s'équilibrer avec le niveau d'eau imposé par les valves d'entrée d'air. On vérifie au préalable que les deux colonnes sont positionnées à l'horizontale de sorte à avoir des niveaux d'eau imposés équivalents entre les deux colonnes. Enfin, le dispositif

radar est préparé. Pour cette partie, non étudiée dans cette thèse, on se réfèrera au manuscrit de Fernandes (2023).

Une fois l'installation du dispositif réalisée, l'essai peut démarrer. L'opérateur ouvre la valve d'eau du premier réservoir et suit ensuite la décroissance du niveau d'eau dans le réservoir pour en déduire le volume d'eau infiltré dans l'anneau. Lorsque le niveau se rapproche du bas, l'opérateur coupe la valve de la première colonne et ouvre celle de la deuxième colonne, jusqu'à vidange de cette dernière. L'opérateur prends aussi soin de prélever les mêmes types d'échantillons que pour les petits infiltromètres ou la méthode Beerkan pour les mesures de masse volumique apparente, teneur en eau initiale et détermination de la granulométrie.

III.3 Protocole expérimental

Dans le cadre de cette thèse, chaque axe de recherche a nécessité des ajustements méthodologiques spécifiques afin d'adapter les expérimentations aux objectifs poursuivis. Nous présentons successivement les protocoles expérimentaux correspondant aux trois axes étudiés. Le premier protocole est dédié à la comparaison entre l'infiltromètre automatisé (Beerkan Automatisé, BA) avec la méthode Beerkan classique (B). Le second protocole porte sur l'étude de l'effet de la taille de l'anneau sur la donnée infiltrométrique, en comparant les résultats pour un anneau de 15 cm et de 50 cm utilisé par le dispositif INFILTRON. Enfin, le troisième protocole est consacré à l'évaluation de la robustesse de l'infiltromètre automatisé, explorant son efficacité et sa reproductibilité dans des conditions variées et pour des sites contrastés.

III.3.1 Protocole expérimental l'axe 1 : comparaison des méthodes Beerkan

Afin d'assurer une comparaison rigoureuse entre la méthode Beerkan classique et l'infiltromètre automatisé (méthode appelée Beerkan Automatisé), un protocole précis a été mis au point. Une grille de repérage a été installée afin de localiser précisément les points d'infiltration et d'assurer que les essais réalisés avec la méthode manuelle et ceux effectués avec l'infiltromètre automatisé se déroulent exactement aux mêmes emplacements. Cette approche était essentielle pour minimiser les biais liés à la variabilité spatiale du sol et assurer une comparaison directe et fiable des deux types de mesure aux mêmes points.

Ainsi, les anneaux de 15 cm de diamètre ont été installés à demeure pour la réalisation des deux types d'essais. Ces derniers ont été réalisés successivement à quelques jours d'intervalle pour limiter les interférences. Un délai de quatre jours a été systématiquement respecté avant de procéder à l'essai suivant. En cas de précipitations, une attente d'au moins quatre jours ensoleillés était imposée avant toute reprise des mesures, afin de s'assurer que l'humidité résiduelle du sol ne fausse pas les résultats.

Les expérimentations ont été réalisées sur deux transects par site, avec quatre essais d'infiltration par transect, soit un total de huit essais par méthode sur chaque site. Cependant, pour le site 1, ce même protocole a été appliqué sur 4 transects produisant au total 16 essais d'infiltration par outil, afin d'obtenir une caractérisation plus fine de ce site spécifique.

Les prélèvements pour la densité apparente et la granulométrie ont été effectués uniquement à la fin de la campagne d'essai. Cette précaution était essentielle pour préserver l'intégrité du sol en place et éviter toute altération des conditions d'expérimentation. L'ensemble de cette phase expérimentale du premier axe d'étude s'est déroulé entre le 25 mai 2023 et le 27 août 2023, couvrant ainsi une période suffisamment large pour prendre en compte d'éventuelles variations de conditions météorologiques et tester la robustesse des mesures dans des conditions climatiques variées.

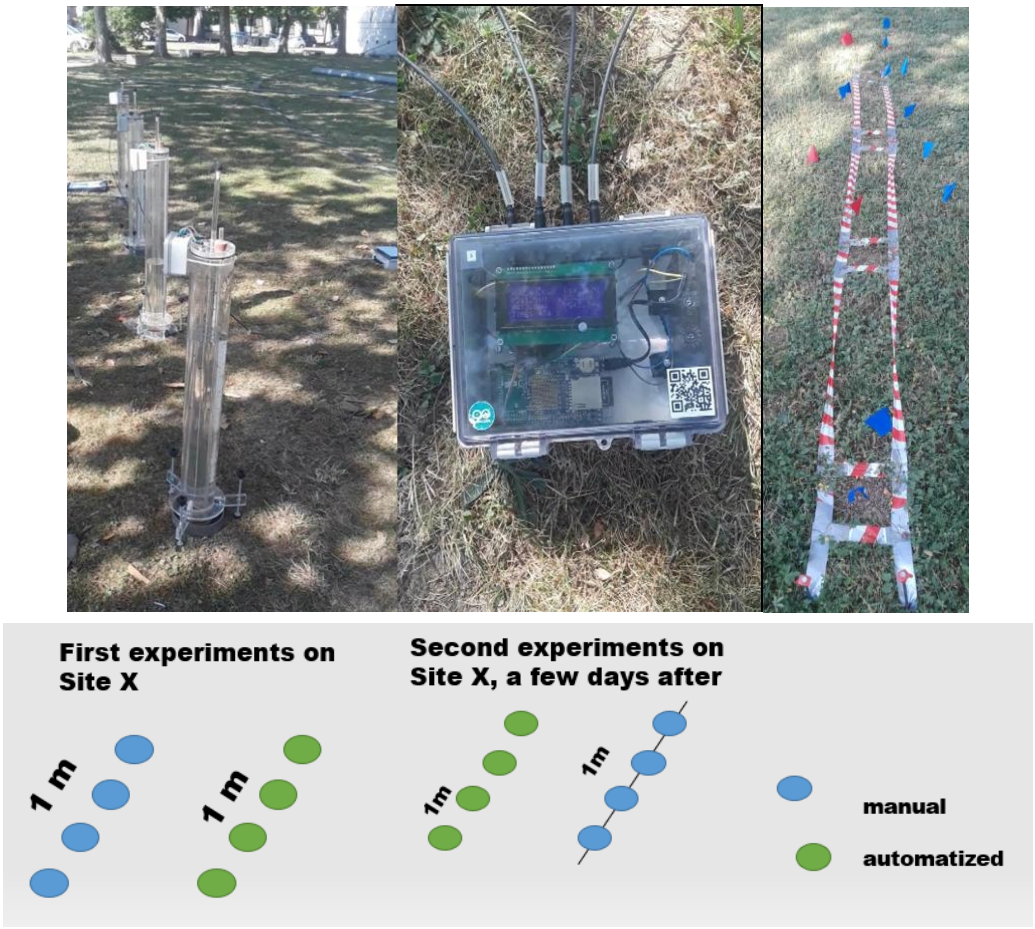


Figure III-7. Photos des infiltromètres sur le site et d'un transect avec quatre emplacements identifiés pour les infiltrations (en haut), ainsi qu'un schéma global de la méthodologie, présentant la réalisation des essais Beerkan et Beerkan automatisés sur deux transects adjacents, suivie de l'inversion des essais quelques jours plus tard.

III.3.2 Protocole expérimental de l'axe 2 : effet de la taille de l'anneau

Dans le cadre de l'axe 2, un protocole expérimental a été mis en place afin d'évaluer l'infiltration de l'eau dans le sol à pour deux anneaux : l'anneau de taille classique avec la méthode Beerkan et l'anneau

de 50 cm avec le dispositif INFILTRON. En complément, l'infiltromètre automatisé, étudié dans l'axe 1, a été employé pour la réalisation des essais avec le petit anneau. Certains des essais « petit anneau » et des essais « grand anneau » ont inclus un suivi par radar géologique. Parmi ces essais, un certain nombre a permis d'étudier l'intérêt d'injecter des nano-traceurs pour identifier les chemins de l'eau et modéliser le comportement de polluants modèle (Fernandes, 2023). Toutefois, les aspects radar et nanotraceurs ne font pas l'objet de cette étude. Ces aspects ne seront donc pas présentés et nous nous focalisons ici sur la réponse infiltrométrique.

La mise en œuvre de l'expérimentation avec l'anneau de 50 cm a nécessité une préparation rigoureuse du site afin d'assurer des conditions optimales. Le sol a été nivelé et débarrassé des débris pour garantir un contact homogène avec l'anneau, qui a été enfoncé à une profondeur de 5 cm afin de limiter les pertes latérales. Un compactage des bords a été réalisé pour améliorer l'étanchéité et prévenir toute fuite non contrôlée. L'expérience a ensuite été menée selon le protocole d'alimentation en eau décrit dans la section précédente. Le suivi de l'infiltration a été réalisé à partir de mesures régulières du niveau d'eau dans les réservoirs.



Figure III-8. Réalisation des essais grand anneau (gauche) et petit anneau (droite) sur deux sites différents. La grille installée autour des anneau sert pour la mesure au radar géologiue.

III.3.3 Protocole expérimental de l'axe 3 : déploiement à grande échelle

Dans cet axe de recherche, l'expérimentation a été réalisée exclusivement à l'aide de l'infiltromètre automatisé, sans recours à d'autres dispositifs tels que ceux utilisés dans les axes précédents. Contrairement aux protocoles des deux premiers axes, cette étude n'a pas impliqué l'utilisation d'un grillage ou d'autres éléments supplémentaires. Toutefois, la préparation du site et la mise en place de l'infiltromètre ont suivi le même protocole rigoureux afin d'assurer des conditions expérimentales optimales et des mesures fiables. Une attention particulière a été portée à l'ajustement des capteurs

pour garantir la précision des enregistrements. L'infiltromètre a été soigneusement ajusté, notamment au niveau de ses pieds, afin d'assurer une parfaite stabilité. L'eau nécessaire à l'expérience a ensuite été introduite dans l'infiltromètre, et le système a été connecté au data logger. Une vérification systématique des connexions et des ports de mesure a été réalisée avant le lancement de l'expérience afin de garantir l'enregistrement correct des données. En parallèle, des échantillons de sol ont été prélevés à proximité immédiate de l'infiltromètre afin de caractériser les propriétés hydriques du sol. Ces échantillons ont été conditionnés dans des sacs plastiques hermétiques pour préserver leur teneur en eau et permettre une analyse ultérieure. Une fois l'infiltration terminée, des prélèvements supplémentaires ont été effectués directement aux emplacements des infiltromètres à l'aide de cylindres de 5,1 cm de diamètre, afin de déterminer la densité apparente du sol et de réaliser l'analyse granulométrique.

III.4 Traitement en laboratoire

III.4.1 Masse volumique sèche et teneur en eau

Après l'expérimentation sur le terrain, on passe à l'analyse des échantillons de sol en laboratoire. La première étape consiste à mesurer la masse du sol humide à l'aide d'une balance de précision et de tares adaptées (Figure III.6). Chaque échantillon est ensuite placé dans une étuve à 105°C pendant 24 heures avant d'être pesé à nouveau, pour déterminer la masse sèche. Afin de s'assurer de la stabilisation de la masse, une seconde phase de séchage est réalisée avec la même température et durée. La masse sèche est alors contrôlée. La mesure de la teneur en eau massique est ainsi complétée. La mesure de la teneur en eau massique permet de déterminer plusieurs paramètres fondamentaux tels que la masse volumique apparente sèche, la densité apparente sèche, la porosité et la teneur en eau volumique (Angulo-Jaramillo et al., 2016).

III.4.2 Analyse granulométrique

L'étude granulométrique est ensuite réalisée en combinant le tamisage à sec et l'utilisation d'un granulomètre laser Mastersizer 3000 pour analyser les fractions sableuses, limoneuses et argileuses. Afin de déterminer les courbes granulométriques, les échantillons de sol ont été préalablement séchés, puis broyés à la main, pour casser les agrégats, avant d'être tamisés à 2 mm, permettant ainsi de séparer la fraction fine de la fraction grossière. Après homogénéisation, une quantité représentative du sol a été prélevée pour être analysée à l'aide du granulomètre laser Mastersizer 3000. Cet appareil, basé sur la diffraction laser, permet d'obtenir une distribution granulométrique précise pour des tailles comprises entre 0,01 µm et 3,5 mm, garantissant ainsi une haute résolution des fractions granulométriques (Eshel et al. 2004). Un protocole rigoureux de calibration et de nettoyage a été suivi afin d'assurer la fiabilité des résultats. Les courbes granulométriques obtenues sont ensuite utilisées

pour caractériser le sol et sa texture. Elles sont aussi déterminantes pour estimer les divers paramètres hydrodynamiques du sol.



Figure III-9. pesage des échantillons pour les mesures de teneur en eau (gauche) et granulomètre laser Mastersizer 3000 pour la détermination des distributions granulométriques (droite).

III.5 Traitement des infiltrations par les algorithmes BEST

Les données d'infiltration combinées avec la caractérisation physique du sol (porosité et granulométrie) ont été modélisées avec l'algorithme BEST. Cet algorithme considère que les propriétés hydrodynamiques des sols sont décrites par le modèle de Van Genuchten (1980) combiné à la condition de Burdine, $m = 1 - \frac{1}{n}$ et le modèle de Brooks et Corey (1964) pour la conductivité hydraulique en non saturé (Lassabatère et al. 2006). Les algorithmes BEST permettent ensuite de déterminer tous les paramètres de forme et d'échelle de ces relations en faisant un ensemble de supposition. La teneur en eau résiduelle est supposée négligeable, $\theta_r = 0$. La teneur en eau à saturation, θ_s, peut être estimée directement à partir de la porosité du sol (elle-même estimée à partir de la mesure de la masse volumique spécifique). Les paramètres de forme (n et η) ne dépendent que de la texture du sol et sont donc estimés à partir de la distribution granulométrique en intégrant des fonctions de pédotransfert spécifiques (PTF). Enfin, les deux paramètres restant, qui représentent les paramètres d'échelle pour le potentiel de pression de l'eau et la conductivité hydraulique, h_g et K_s sont estimés par ajustement de modèles analytiques aux données infiltrométriques, à savoir les courbes d'infiltration cumulée (Braud et al. 2005; Lassabatère et al. 2006).

L'algorithme BEST inclut diverses variantes qui ont été développés dans l'ordre chronologique suivant : BEST-Slope (Lassabatère et al. 2006), combinant l'analyse du régime transitoire avec une condition entre estimations basée sur la pente finale de la courbe d'infiltration en régime asymptotique ; BEST-Intercept (Yilmaz et al. 2010), utilisant l'ordonnée à l'origine de l'asymptote finale ; et BEST-Steady (Bagarello et al. 2014a) se basant exclusivement sur l'ordonnée à l'origine et la pente du régime asymptotique. Après, on trouve deux nouvelles variantes, BEST-WR communément appelée modèle à

deux termes (Di Prima et al. 2021) et BEST-WR-3T communément appelée modèle à trois termes (Yilmaz et al. 2022) qui ont été conçues pour estimer les propriétés hydrauliques des sols hydrophobes. Toutes ces variantes utilisent le même traitement des données granulométriques pour l'estimation des paramètres de forme, avec des algorithmes différents pour la modélisation des données infiltrométriques.

III.5.1 Traitement des données granulométriques

Le modèle BEST se base sur les développements suivants pour déterminer les paramètres de forme. Dans un premier temps, la distribution granulométrique est ajustée sur le modèle suivant :

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D}\right)^N\right]^{-M} \tag{66}$$

Où la fonction $F(D)$ représente la fréquence cumulée des particules dont le diamètre est inférieur à D, tandis que D_g correspond au paramètre d'échelle associé à la taille des particules. Les paramètres N et M définissent la forme de la courbe granulométrique, permettant ainsi de caractériser la distribution des tailles de particules dans le sol. Le paramètre M est défini par (Fredlund and Xing 1994) :

$$M = 1 - \frac{2}{N} \tag{67}$$

Ces paramètres permettent d'interpréter les résultats de l'analyse granulométrique en relation avec les propriétés hydrodynamiques du sol, notamment la sorptivité, la conductivité hydraulique à saturation et l'organisation des pores influençant les flux d'eau. Une fois que M et N ont été estimés, un ensemble d'équations (nommées fonctions de pédotransfert) permettent d'estimer les deux paramètres de forme, n et η. Le détail de ces équations peut être trouvée dans Lassabatere et al. (2006).

III.6 Outils de traitement des données et d'analyse statistique

Dans le cadre de cette étude, plusieurs outils statistiques ont été utilisés pour analyser les données des essais d'infiltrométrie, incluant les logiciels comme Scilab ou R et des analyses statistiques comme l'analyse de variance (ANOVA), la régression linéaire, les ajustements sur les Droites de Henry, etc. Ces outils ont permis d'évaluer le degré de significativité des différences ou tendances obtenues.

III.6.1 Outils statistiques et méthode pour le traitement des données

L'analyse des résultats repose sur une approche statistique rigoureuse permettant de confronter les données expérimentales aux hypothèses émises et d'assurer une interprétation fiable des résultats. Les outils statistiques ont été utilisés de manière analogue pour les trois axes de cette thèse.

La normalité ou log-normalité des distributions a été validée en se basant sur les figures Quantile-Quantile, représentant les quantiles expérimentaux aux quantiles théoriques (QQplots) ainsi que les droites de Henry tel que proposé par certains auteurs en physique du sol (e.g., Bagarello et al. 2014c). Les différences de valeurs entre différent groupes de valeurs (modalité des variables explicatives) ont été testées par des tests de Student (en cas de 2 groupes) ou par des ANOVA-1 pour plus de 2 groupes. Des ANOVA-2 ont été réalisées lorsque deux variables explicatives pouvaient être impliquées combinant souvent la variable d'intérêt que méthode Beerkan ou rayon de l'anneau et une variable additionnelle (variante BEST considérée ou site). Les tests d'homoscédasticité, correspondant à l'homogénéité des variances ou écart-types a été testée avec des tests e Fisher ou de Levene pour la comparaison entre groupes de valeurs.

Ainsi, les outils statistiques mobilisés jouent un rôle fondamental dans chacun des axes de cette étude, en assurant une comparaison rigoureuse des valeurs mesurées et en identifiant les tendances sous-jacentes aux variations des paramètres hydrodynamiques. Cette approche garantit la robustesse des résultats présentés et des conclusions tirées.

III.6.2 Présentation des outils et tests statistiques utilisés

Dans le cadre des analyses statistiques, nous avons utilisé plusieurs principes qui nécessitent une description théorique car ces principes sont utilisés dans les trois axes de cette thèse. Parmi ces principaux outils, on trouve les tests paramétriques tels que le test de Student, le test de Fisher et l'analyse de variance (ANOVA).

III.6.2.1 Test de Student

Pour mener à bien l'étude comparative entre les valeurs moyennes de deux échantillons de façon indépendante, le test de Student a été utilisé en se basant sur la statistique ci-dessous :

$$J = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{S_p . \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \tag{68a}$$

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1){S_1}^2 + (n_2 - 1){S_2}^2}{n_1 + n_2 - 2}} \tag{68b}$$

Avec $\overline{X_1}$ et $\overline{X_2}$ représentent les moyennes des échantillons, n_1 et n_2 leurs effectifs, et S_p la variance combinée. Dans cette expression ${S_1}^2$ et ${S_2}^2$ représentent les variances des deux groupes. Sachant que si la valeur de J excède le seuil critique de la loi de Student, l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée. Une manière équivalente consiste à considérer la probabilité critique (aussi appelée p-value). Si cette dernière est inférieure au seuil (considéré ici égal à 0.05), on peut considérer alors que les deux

groupes ont des moyennes différentes. En cas contraire, on ne peut conclure à moins de calculer la puissance du test, ce qui est plus complexe et n'a pas été fait dans cette étude.

III.6.2.2 Test de Fisher

Le test de Fisher est utilisé pour la comparaison de deux variances de deux groupes dans le but de vérifier si significativement elles sont différentes. Ce test s'appuie sur le ratio des carrés moyens des deux groupes, ces derniers correspondant à la moyenne des écarts entre les observations et la moyenne de chaque groupe. Ainsi, le test de Fisher s'appuie sur les expressions suivantes :

$$SC_i = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} \left(X_{ij} - \bar{X}_i\right)^2 \tag{69a}$$

$$F = \frac{\frac{SC_1}{n_1 - 1}}{\frac{SC_1}{n_2 - 1}} = \frac{CM_1}{CM_2} \tag{69b}$$

Avec X_{ij} la la j-ème observation du groupe i, $\bar{X}_i$ est soit la moyenne du groupe i, CM_i correspond au carré moyen de chaque groupe. En tenant compte de l'hypothèse nulle, le rapport définit par l'Equation (69b) suit une loi de Fisher-Snecdecor, dont les seuils critiques permettent de juger l'importance de l'écart observé.

III.6.2.3 Test de Levene

Le Test de Levene est l'un des tests statistiques qui teste l'égalité des variances entre plusieurs échantillons. Ce test, contrairement à certains tests d'homogénéité de variances, est plus robuste et peut être utilisé même avec des données non normales. En termes de calcul, le test de Levene se base sur l'analyse de la variabilité des écarts absolus par rapport à la médiane ou à la moyenne des données dans chaque groupe. L'objectif principal est de mesurer la dispersion des données intra-groupe et de vérifier si cette dispersion est similaire entre les différents groupes. Le test de Levene a pour expression générale :

$$Z_{ij} = \left|X_{ij} - \tilde{X}_i\right| \tag{70}$$

Avec X_{ij} la j-ème observation du groupe i, $\tilde{X}_i$ est soit la moyenne soit la médiane du groupe i. La statistique suivante est alors calculée :

$$W = \frac{(N-k)}{(k-1)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (\bar{Z}_{i.} - \bar{Z}..)^2}{\sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n_i} \left(Z_{ij} - \bar{Z}_{i.}\right)^2} \tag{71}$$

Avec k le nombre de groupes, n_i l'effectif du groupe i, N l'ensemble des observations, $\bar{Z}_{i.}$ la moyenne des Z_{ij} dans le groupe i, et $\bar{Z}..$ la moyenne globale.

III.6.2.4 Analyse de variance (ANOVA)

Le principe du test de Student de comparaison de la moyenne à plus de deux groupes est l'ANOVA. L'ANOVA repose sur la décomposition de la variance totale en variance inter-groupe et variance intra-groupe, les groupes étant définies selon les modalités des variables explicatives. On distingue les ANOVA à un ou deux facteurs.

III.6.2.5 ANOVA à un facteur

L'ANOVA à un facteur, qui correspond au cas d'une seule variable explicative, peut s'écrire :

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij} \tag{72}$$

Avec x_{ij} la j-ème observation de la variable étudiée du groupe i (correspondant à la modalité i du facteur étudié), μ la moyenne globale de la variable étudiée, α_i la différence de moyenne entre le groupe i et la moyenne globale (effet de la variable explicative sur la variable dépendante), ϵ_{ij} le terme d'erreur aléatoire, autrement dit le résidu. Pour l'ANOVA, on considère que les résidus ont une moyenne nulle et exactement les mêmes variances pour tous les groupes. On présupposer aussi que la variable dépendante suit une loi normale. Les calculs de l'ANOVA se font en considérant les grandeurs suivantes :

- Carré moyen total : rapport de la somme des carrés totale par $n-1$, n étant le nombre total d'observation : $CM_T = \frac{SC_{ET}}{n-1}$
- Carré moyen factorielle : rapport de la somme des carrés factorielles (par groupes) par $p-1$, p est le nombre de groupes ou de modalités de la variable explicative :$CM_{FA} = \frac{SC_{FA}}{p-1}$
- Carré moyen résiduel : rapport de la somme des carrés résiduels par $n-p$: $CM_R = \frac{SC_R}{n-p}$

Les sommes des carrés étant définie comme dans l'Equation (73a). L'évaluation statistique de la significativité de l'effet du facteur s'opère en comparant la variance associée au facteur et la variance résiduelle selon les étapes suivantes :

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	F de Fisher
Facteur A	SC_{FA}	$p-1$	$CM_{FA} = \frac{SC_{FA}}{p-1}$	$F = \frac{CM_{FA}}{CM_R}$
Total	SC_{ET}	$n-1$	$CM_T = \frac{SC_T}{n-1}$	
Résiduel	SC_{ER}	$n-p$	$CM_R = \frac{SC_R}{n-p}$	

Ainsi, la valeur de la statistique de Fisher F et sa comparaison au fractile donné permet de conclure. L'hypothèse nulle est ici que la variance expliquée est faible à comparer à la variance résiduelle,

indiquant aucun effet du facteur A. L'hypothèse complémentaire statue au contraire un effet. Les résultats des tests sont plus souvent présentés en termes de probabilité critique, aussi appelé p-value.

III.6.2.6 ANOVA à deux facteurs

Dans ce cas, on étudie l'influence de deux facteurs (ou deux variables explicatives). Ainsi, on teste les effets des deux variables séparées ainsi que leur potentielle interaction, ou autrement dit potentiel influence de la seconde variable sur l'effet de la première (et vice-versa). Le modèle ANOVA à deux facteurs croisés peut s'écrire :

$$x_{ijk} = \mu_{ij} + \in_{ijk} \tag{73}$$

Avec x_{ijk} la k^{ème} réalisation de la variable dépendante X, en fixant le premier facteur à la $i^{ème}$ modalité et le deuxième facteur à la $j^{ème}$ modalité et ϵ_{ijk}, les erreurs ou résidus. L'expression détaillée de ce modèle est donnée sous la forme :

$$x_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk} \tag{74}$$

Avec μ: la moyenne générale, $\alpha_i = \mu_i - \mu$ représente l'effet de A au niveau $i = 1, \dots, p$, $\beta_j = \mu_j - \mu$ représente l'effet de B au niveau $j = 1, \dots, q$, $\gamma_{ij} = \mu_{ij} - \mu_i - \mu_j + \mu$ représente l'effet de l'interaction entre A et B, et enfin $\varepsilon_{ijk} = x_{ijk} - \mu_{ij}$, $(k = 1, \dots, r)$ l'erreur avec résiduelle. Les coefficients choisis vérifient les relations suivantes :

$$\sum_{i=1}^{p} \alpha_i = 0, \sum_{j=1}^{q} \beta_j = 0, \forall k, \sum_{j=1}^{q} \gamma_{jk} = 0 \text{ et } \forall j, \sum_{k=1}^{r} \gamma_{jk} \tag{75}$$

Pour l'ANOVA à un facteur nous avons vu des conditions d'utilisation et c'est de même pour l'ANOVA à deux facteurs. L'utilisation du test de la variance à deux facteurs interpelle ces trois conditions : (i) l'indépendance des échantillons pq comparés entre eux, (ii) une loi normale pour la variable quantitative considérée pour l'étude des pq populations comparées, et enfin (iii) l'homogénéité de la variance des pq populations comparées (homoscédasticité).

Après la vérification de ces conditions, les étapes à franchir sont définies par les étapes suivantes. Cela commence par le calcul des différentes moyennes :

- Moyenne de la ligne i : $\bar{x}_i = \frac{1}{qr} \sum_{j=1}^{q} \sum_{k=1}^{r} x_{ijk}$
- Moyenne de la colonne j : $\bar{x}_j = \frac{1}{pr} \sum_{i=1}^{p} \sum_{k=1}^{r} x_{ijk}$
- Moyenne du couple (i, j) : $\bar{x}_{ij} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{r} x_{ijk}$
- Moyenne totale : $\bar{x} = \bar{x} \dots = \frac{1}{pqr} \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{q} \sum_{k=1}^{r} x_{ijk}$, Où $n = pqr$

Ensuite vient le calcul de la somme des carrés :

- Somme des carrés totales : $SC_T = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}(x_{ijk} - \bar{x})^2$
- Somme des carrés des erreurs résiduelles : $SC_R = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}\left(x_{ijk} - \bar{x}_{ij.}\right)^2$
- Somme des carrés du premier facteur : $SC_A = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{k}(x_i - \bar{x})^2$
- Somme des carrés du deuxième facteur : $SC_B = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}\left(x_j - \bar{x}\right)^2$
- Somme des carrés des deux facteurs : $SC_{AB} = \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q}\sum_{k=1}^{r}\left(\bar{x}_{i.j.} - \bar{x}_{i..} - x_j + \bar{x}\right)^2$
- Somme des carrés totale : $SC_T = SC_R + SC_A + SC_B + SC_{AB}$

Les carrés moyens sont ensuite calculés ; incluant les carrés moyens associés au facteur A, au facteur B, à leur interaction A : B, et enfin aux résidus : $MC_A = \frac{SC_A}{p-1}$, $MC_B = \frac{SC_B}{q-1}$, $MC_{AB} = \frac{SC_{AB}}{(p-1)(q-1)}$, et $MC_R = \frac{SC_E}{pq(r-1)}$.

En tenant compte de la vérification des trois conditions précédentes, avec l'hypothèse H_0 qui postule que ni A, ni B ni leur interaction n'ont un effet significatif, on obtient :

$$\frac{MC_A}{MC_R} \rightsquigarrow F\big((p-1).pq(r-1)\big) \tag{76a}$$

$$\frac{MC_B}{MC_R} \rightsquigarrow F\big((q-1).pq(r-1)\big) \tag{76b}$$

$$\frac{MC_{AB}}{MC_R} \rightsquigarrow F\big((p-1)(q-1).pq(r-1)\big) \tag{76c}$$

Sachant que F suit une loi de Fisher aux degrés de liberté définis ci-dessus.

L'évaluation statistique de la significativité de l'effet du facteur s'opère ensuite en comparant la variance propre à chaque facteur ou interaction selon les étapes suivantes :

$Variation$	ddl	SC	MC	F
$Fact.A$	$p-1$	SC_A	MC_A	$F_A = \frac{MC_A}{MC_R}$
$Fact.B$	$q-1$	SC_B	MC_B	$F_B = \frac{MC_B}{MC_R}$
$Fact.AB$	$(p-1)(q-1)$	SC_{AB}	MC_{AB}	$F_{AB} = \frac{MC_{AB}}{MC_R}$
$Résiduelle$	$pq(r-1)$	SC_R	MC_R	
$Totale$	$n-1$	SC_T		

Où on attribue aux sommes des carrés SC et aux moyennes des carrés MC les bons degrés de liberté, ddl. Une valeur du rapport F élevée indique une variabilité entre groupe nettement supérieure à la

variabilité résiduelle, ce qui entraine le rejet de l'hypothèse d'égalité des moyennes entre groupes ou modalités.

Finalement, l'utilisation de ces approches statistiques détaillées ci-dessus, permettent de tester rigoureusement les hypothèses d'égalité des variances et des moyennes, et d'identifier les différences significatives entre groupe de données.

III.6.3 Logiciels utilisés

L'analyse des données issues des essais d'infiltrométrie a nécessité l'utilisation de plusieurs logiciels de calcul. Ces outils ont permis de traiter, d'analyser et de visualiser les résultats expérimentaux, pour les trois axes.

III.6.3.1 Scilab

Scilab (www.scilab.org) est un logiciel de calcul scientifique open-source utilisé pour les calculs numériques. Dans le contexte de cette thèse, ce logiciel a été mobilisé pour la filtration des données brutes produites par les infiltromètres automatisés. Après chaque expérimentation, les données brutes recueillies sur les cartes SD sont traitées avec Scilab afin de sélectionner les points expérimentaux pertinents parmi toutes les données enregistrées pour construire les courbes d'infiltration cumulées. Ce même logiciel est également utilisé pour exécuter les variantes de l'algorithme BEST. Les codes développés par Laurent Lassabatere sont disponibles à la demande. L'utilisation de Scilab et de scripts permet une gestion efficace des données et l'automatisation des calculs, réduisant ainsi le risque d'erreurs humaines.

III.6.3.2 R/Rstudio

R est un logiciel statistique dédié aux statistiques, largement utilisé en sciences de l'environnement pour le traitement et l'analyse de données expérimentales. Son utilisation a été facilitée par Rstudio, un environnement de développement intégré qui offre une interface plus ergonomique et des outils graphiques avancés.

Dans cette étude, R/Rstudio a été employé pour réaliser des analyses statistiques, telles que les tests de normalité (*QQplots*), les analyses de variance (*ANOVA*) et les autres tests permettant d'évaluer la significativité des différences entre « traitements ». La capacité de R à manipuler des données volumineuses et à produire des visualisations graphiques détaillées a été particulièrement précieuse pour comparer les résultats obtenus.

Des scripts préalablement développés par Laurent Lassabatère ont été utilisés pour automatiser ces analyses. Ces scripts sont disponibles sur demande. En complément, les courbes d'infiltration cumulative et les taux d'infiltration ont été initialement visualisés sous Excel. Toutefois, afin d'obtenir

des représentations graphiques plus structurées et scientifiquement exploitables, des courbes et *boxplots* ont été réalisés avec R, offrant une meilleure clarté et une présentation plus rigoureuse des tendances observées.

IV Résultats et discussions

Ce chapitre est structuré autour de trois axes d'analyse complémentaires. Le premier s'attache à confronter les performances de la méthode infiltrométrique classique Beerkan à celles de sa version automatisée, dans l'objectif d'évaluer la concordance des estimations et de valider l'intérêt de l'automatisation pour la caractérisation hydrodynamique des sols. Le deuxième axe porte sur l'impact de la dimension de l'anneau d'infiltration sur les processus d'écoulement, notamment sur l'activation des macropores, à partir de dispositifs de 15 cm et 50 cm de diamètre. Ces expérimentations s'inscrivent dans le cadre du projet ANR INFILTRON (infiltron.org), prolongeant les travaux menés notamment par Fernandes (2023) et Traullé (2022). Enfin, le troisième axe vise à interroger la robustesse du dispositif automatisé à travers une série de mesures conduites sur une diversité de sites urbains, représentatifs de contextes pédologiques variés, afin de juger de la reproductibilité et de la fiabilité des résultats obtenus.

Les résultats relatifs à chacun de ces axes sont présentés de manière séquentielle, discutés à la lumière des connaissances existantes et des références méthodologiques, et donnent lieu à une synthèse partielle permettant de dégager les enseignements principaux à chaque étape.

IV.1 Comparaison des méthodes Beerkan manuelle et automatisée

L'estimation des propriétés hydrodynamiques des sols s'appuie traditionnellement sur des techniques infiltrométriques permettant de déduire, entre autres, la conductivité hydraulique à saturation et les caractéristiques de rétention en eau. La méthode Beerkan, en association avec l'algorithme BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters), s'est imposé comme une référence dans ce domaine, notamment grâce à sa simplicité de mise en œuvre et à son coût réduit. Cependant, son caractère manuel rend les mesures sensibles aux conditions d'opération et à la variabilité inter-opérateurs. Afin d'en améliorer la fiabilité, une version automatisée a été développée par Di Prima (Di Prima 2015), puis perfectionnée par Concialdi (Concialdi et al. 2020).

Cette étude vise à comparer ces deux approches, afin d'en évaluer les performances respectives sur le terrain. L'hypothèse retenue est que l'automatisation permet d'obtenir des résultats comparables à ceux du protocole classique, tout en limitant les incertitudes liées aux manipulations humaines. Les expérimentations ont été réalisées sur plusieurs sites où les infiltrations ont été mesurées successivement à l'aide des deux dispositifs. Quatre sites ont été investigués sur le campus de l'ENTPE avec des sols limono ou sablo argileux, avec une certaine variabilité spatiale. Un autre site a été investigué au Sénégal avec des sols sableux très homogènes, pour servir de référence.

Les courbes d'infiltration ont été extraites, les variations du taux d'infiltration analysées, et les paramètres hydrodynamiques estimés via les algorithmes BEST. Une analyse texturale des sols a également été conduite afin d'examiner l'éventuel impact de la granulométrie sur les résultats. Les comparaisons portent notamment sur les courbes cumulées $I(t)$, les écarts entre dispositifs, les valeurs initiales et finales de $q(t)$, ainsi que les paramètres hydrodynamiques dérivés, en particulier K_s (conductivité hydraulique à saturation) et h_g (pression capillaire d'entrée d'air).

Une analyse statistique a été conduite afin d'identifier les effets propres à la méthode (effet outil), les effets liés aux caractéristiques des sites (effet site), et les éventuelles interactions entre les deux (effet site-outil). Une attention particulière a été portée à la variabilité intra-site, aux biais liés à la méthode de mesure, et à la capacité d'ajustement des modèles. Les résultats sont présentés sous forme de comparaisons graphiques et analytiques, afin de mettre en évidence les divergences potentielles et de situer la pertinence de chaque approche selon les conditions rencontrées.

La discussion finale s'efforcera de dégager les avantages et les limites spécifiques de l'infiltromètre automatisé, en fonction des types de sol et des conditions d'expérimentation, en confrontant ses performances à celles du protocole manuel.

IV.1.1 Caractérisation physique des différents sites à l'ENTPE

Dans un premier temps, nous rappelons les caractéristiques du site d'étude ayant servi pour la réalisation des mesures. Les résultats des analyses texturales ont été synthétisés à l'aide du triangle des textures, qui permet de classifier les sols selon la proportion de ces trois fractions. Les échantillons issus des quatre sites présentent une texture globalement sablo-limoneuse, avec une variation allant de limon argileux à sablo-limoneux (Figure IV.1d).

De façon plus détaillée, le site S1 se distingue par une teneur en argile légèrement supérieure à celle du site S2, traduisant une capacité potentiellement plus importante de rétention en eau (Saxton and Rawls 2006). Le site S4 présente également une proportion d'argile plus élevée que le site S3. Concernant la fraction limoneuse, les sites S1 et S2 en affichent les valeurs les plus élevées, suivis du site S4, qui dépasse légèrement le site S3 (Figure IV.1, Tableau IV.1). Le limon, de par sa granulométrie intermédiaire, confère au sol une bonne capacité de rétention tout en maintenant une certaine perméabilité, ce qui en fait une fraction particulièrement influente dans les dynamiques hydriques (Lal and Shukla 2004). Enfin, la fraction sableuse, qui favorise l'infiltration rapide et le drainage, est la plus représentée au site S3, suivi du site S4, puis du site S2. Le site S1 enregistre la proportion de sable la plus faible. Ainsi, l'hétérogénéité texturale observée entre les sites d'étude en les groupant en deux groupes, sablo-limoneux et limon-argileux reflète une variabilité significative des conditions pédologiques locales, ce qui conditionne directement les comportements d'infiltration et de

transfert d'eau. Cette variabilité devra être prise en compte dans l'interprétation des mesures infiltrométriques réalisées ainsi que des paramètres hydrodynamiques estimés par les algorithmes BEST (Bagarello et al. 2014a; Lassabatère et al. 2006).

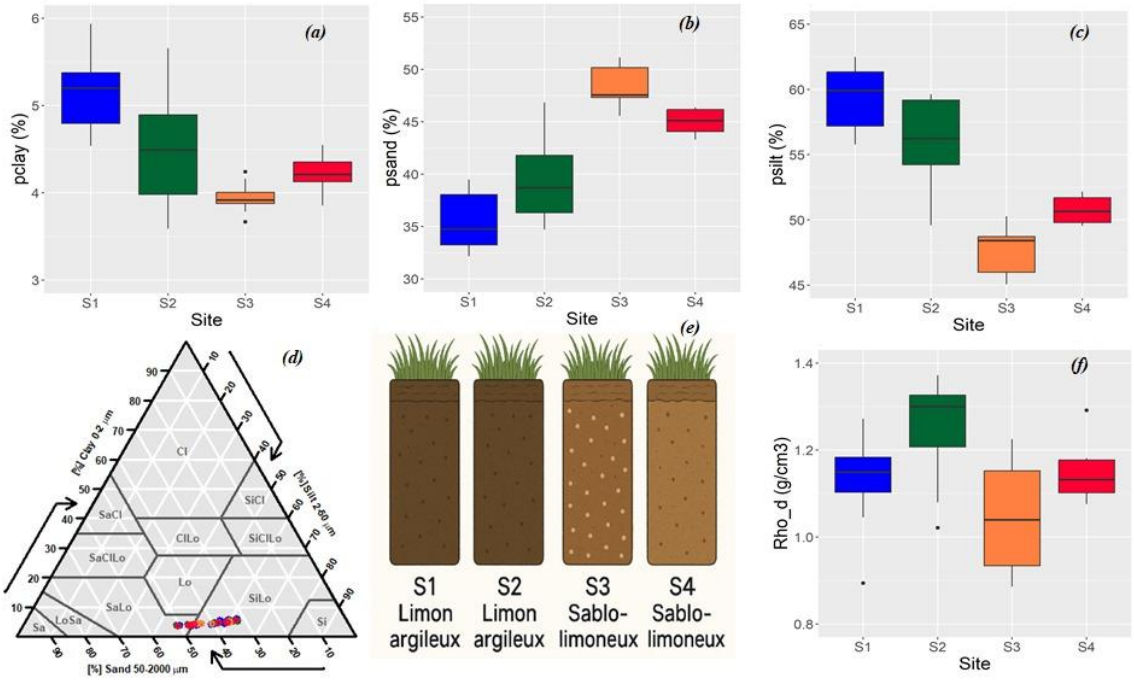


Figure IV-1. Teneurs en argile a), silt b), et sable c), triangle des textures d), représentations des différentes textures e), et masses volumiques apparentes f).

Les autres paramètres mesurés sont la masse volumique apparente et la teneur en eau initiale. La densité apparente, ρ_d, fait partie des variables fondamentales à mettre en ligne de compte car elle joue un rôle crucial dans l'estimation des propriétés hydrodynamiques. Elle informe sur le niveau de compactage et le volume de pores présents dans le sol, et forme un paramètre indispensable de la porosité fonctionnelle. Pour les quatre sites, nous avons remarqué que le S2 présente une densité plus importante que les trois autres sites et suivi des S1 et S4 avec des valeurs quasiment égales, et S3 présentant la plus faible densité (Figure IV.1,f et Tableau IV.1).

La teneur en eau initiale, θ_i, mesurée sur place avant chaque essai d'infiltration, a une influence déterminante sur la dynamique des flux non saturés. On note que les valeurs de la teneur en eau initial est relativement faible, notamment pour les sites S3 et S4, ce qui présage de risque d'hydrophobicité (Tableau IV.1).

La teneur en eau initiale est une variable d'entrée indispensable pour l'application des algorithmes BEST. Elle influence la forme de la courbe d'humidification et la différence d'humidité et donc de conductivité hydraulique entre les régimes de départ et permanent. Des études ont mis en lumière

l'importance sur la précision lors de la mesure estimée de θ_i afin d'assurer la qualité des paramètres inversés par l'algorithme BEST (Bagarello et al. 2014a; Lassabatère et al. 2006; Yilmaz et al. 2010).

Tableau IV-1. Pourcentages granulométriques, incluant l'argile (pClay), le limon (pSilt), et le sable (pSand), densité apparente, ρ_d, et teneur en eau initiale, θ_i.

Site	pClay (%)	pSilt (%)	pSand (%)	ρ_d (g/cm^3)	θ_i (cm^3/cm^3)
S1	5.17	59.38	35.45	1.1394	0.1912
S2	4.54	55.84	39.61	1.2473	0.1671
S3	3.94	47.71	48.34	1.0425	0.1540
S4	4.22	50.76	45.02	1.1481	0.1109

IV.1.2 Teneur en eau à saturation et paramètres de forme

Tous les algorithmes BEST fonctionnent de manière identique pour la détermination des paramètres hydrodynamiques que sont les teneurs en eau résiduelle, θ_r, et à saturation θ_s, ainsi que les paramètres de forme *n* et *l* de la fonction de van Genuchten (1980). Par hypothèse, les algorithmes BEST assument que la teneur en eau résiduelle θ_r est fixée à zéro et la teneur en eau à saturation est égalisée à la porosité. Les paramètres de forme *n* et *l* sont déduits des courbes granulométriques par un ensemble de fonction de pédotransfert (Cf. chapitre Matériel et Méthodes). Nous présentons ci-dessous les valeurs estimées de ces différents paramètres.

La teneur en eau à saturation θ_s, est un paramètre qui varie sensiblement avec les sites (Figure IV.2a et Tableau IV.2). Le **S3** présente les valeurs les plus élevées avec une médiane proche de 0,62, révélant une porosité importante. Ce résultat peut être associée à une texture plus grossière (avec une teneur sable de 48,3 %) induisant une densité apparente faible (1,04 g/cm³). En revanche, le **S2** présente la plus faible teneur en eau à saturation θ_s soit une médiane ≈ 0,51, qui ne reflète pas vraiment sa texture relativement fine (teneurs en limon et en argile de 55,8 % et 4,54 %, respectivement). Pour les autres sites comme **S1** et **S4**, les médianes prennent des valeurs intermédiaires (Figure IV.2). La variabilité intra-site sur **S1** et **S3**, dans une moindre mesure, indique une hétérogénéité de structure.

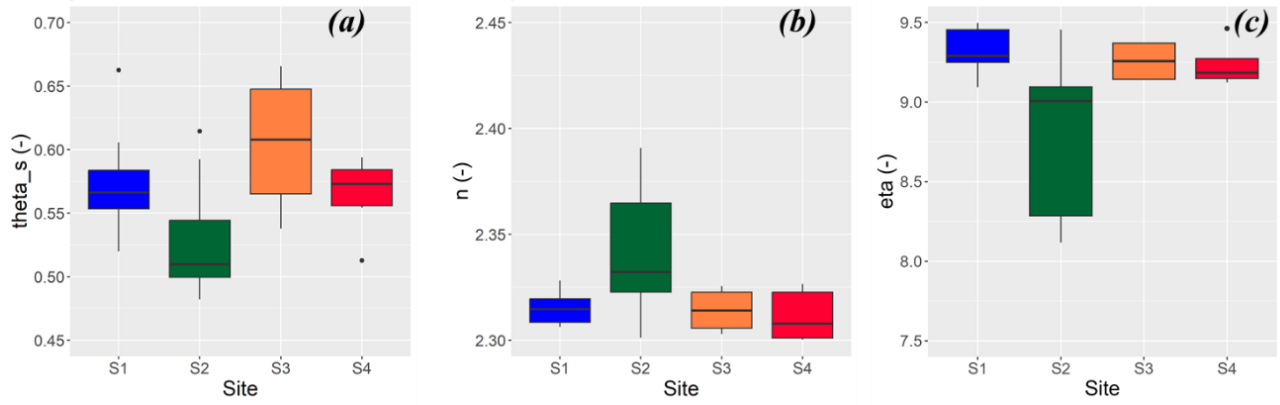


Figure IV-2. Boîtes à moustaches des paramètres hydrodynamiques pour chaque site : teneur en eau à saturation θs (a), paramètres de forme n (b), et paramètre η (c). Chaque boîte s'étend du premier au troisième quartile, la ligne centrale indique la médiane, les moustaches couvrent l'intervalle typique des données, et les points isolés signalent des valeurs atypiques.

Tableau IV-2. Valeurs moyennes des paramètres de teneur en eau à saturation, θ_s, et de paramètres de forme n et η des différents sites.

Sites	θ_s (cm³/cm³)	n	η
S1	0.5700	2.3129	9.3990
S2	0.5293	2.3421	8.8927
S3	0.6066	2.3001	9.6762
S4	0.5667	2.3114	9.4299

Le paramètre n montre également une uniformité entre les sites avec de très faibles différences et des valeurs élevées typiques de sols à texture plus grossière. Ces valeurs suggèrent une transition plus abrupte entre les états saturé et non saturé dans les courbes de rétention d'eau (Lassabatere et al. 2021, 2023). Le site **S2** présente des valeurs légèrement plus élevées. Les sites **S3** et **S4** présentent des valeurs comparables, légèrement en dessous. Enfin, le site **S1** affiche des valeurs proches de celles de **S3–S4**, mais avec une dispersion plus faible, traduisant une plus grande homogénéité du sol à ce niveau. Le paramètre η est globalement plus élevé sur les sites **S1**, puis **S3** et **S4** (Figure IV.2,c et Tableau IV.2). Le site **S2** se distingue par des valeurs significativement plus faibles comparativement aux autres. La dispersion de η est plus marquée sur S2 (Figure IV.2c) , ce qui rejoint les tendances observées sur θs et *n*, témoignant d'une forte hétérogénéité locale. Le paramètre η qui correspond à la puissance dans la formulation de la conductivité hydraulique non saturée, traduit la chute de conductivité lors de la saturation du sol. Cette chute est importante, en lien avec la granulométrie grossière des sols étudiés et leurs comportements drainants.

IV.1.3 Courbes d'infiltration cumulées selon les méthodes

Dans cette section, on compare donc les données infiltrométriques obtenues en chaque point entre la méthode Beerkan manuelle (B) et la méthode automatisée (AB pour « Automated Beerkan). On se base sur les courbes d'infiltration cumulée représentent le volume d'eau infiltré ramené à une hauteur d'eau en fonction du temps pour chaque site et chaque méthode. Ces courbes constituent un outil essentiel pour comparer les performances des deux méthodes et comprendre leurs différences entre ces deux méthodes. L'analyse se base aussi sur la forme des courbes d'infiltration (concavité, convexité), la vitesse d'infiltration (taux d'infiltration calculé à partir des courbes cumulées par dérivation), et les erreurs relatives entre les deux méthodes. L'erreur relative entre les courbes d'infiltration est définie par l'équation suivante :

$$Er = \frac{I_{AB} - I_B}{I_B} \quad (77)$$

Où I_{AB} représente l'infiltration mesurée avec l'infiltromètre automatisé et I_B celle obtenue avec la méthode Beerkan. L'erreur relative est souvent quantifiée en pourcentage. Cette mesure permet d'évaluer les écarts entre les deux approches et d'identifier les sources potentielles de divergence.

Nous analysons ensuite les résultats par site. Pour rappel, les essais ont été réalisés sur quatre sites distincts. Sur le site 1, quatre transects ont été effectués, tandis que sur les sites 2, 3 et 4, deux transects ont été réalisés. Chaque transect a comporté quatre points sur lesquels on a réalisé successivement les essais Beerkan manuel et automatisé.

IV.1.3.1 Analyse des courbes d'infiltration du site S1

Les quatre transects du site S1 (S1T1 à S1T4) ont permis de confronter les mesures d'infiltration réalisées selon les méthodes Beerkan classique (B) et automatisée (AB). Ces comparaisons sont fondées sur une analyse croisée du flux infiltré, de l'erreur relative (Er), ainsi que des notions de correspondance de forme, de correspondance de l'ordre de grandeur et de correspondance totale.

Pour S1T1, les deux méthodes montrent une très bonne correspondance d'ordre de grandeur, les courbes étant superposées sur une grande partie du temps d'infiltration, exception faite du point 2 avec une donnée B significativement supérieure. Les formes des courbes sont également très proches, montrant une progression continue avec une légère concavité, traduisant une dynamique cohérente. L'erreur relative (Er) reste inférieure à 25% (en valeur absolue), suggérant une excellente correspondance totale. Ce cas constitue une validation robuste de l'équivalence entre les deux protocoles pour ce point d'expérimentation (Di Prima et al. 2016; Lassabatère et al. 2006).

Pour le transect S1T2, on note que le faisceau de courbes AB se distinguent nettement des courbes B, avec des valeurs bien au-dessus. Cette différence est confirmée par une erreur relative élevée, qui dépasse localement 25% et peuvent même atteindre des valeurs de 200%. La forme des courbes diverge également : alors que les courbes B suivent une progression plus linéaire, les courbes AB présentent une pente plus raide avec une concavité plus importante. Cette absence de correspondance de forme réduit la correspondance totale, visible par une courbe Er significativement éloignée de zéro, avec des valeurs élevées en début de parcours avant de décroitre.

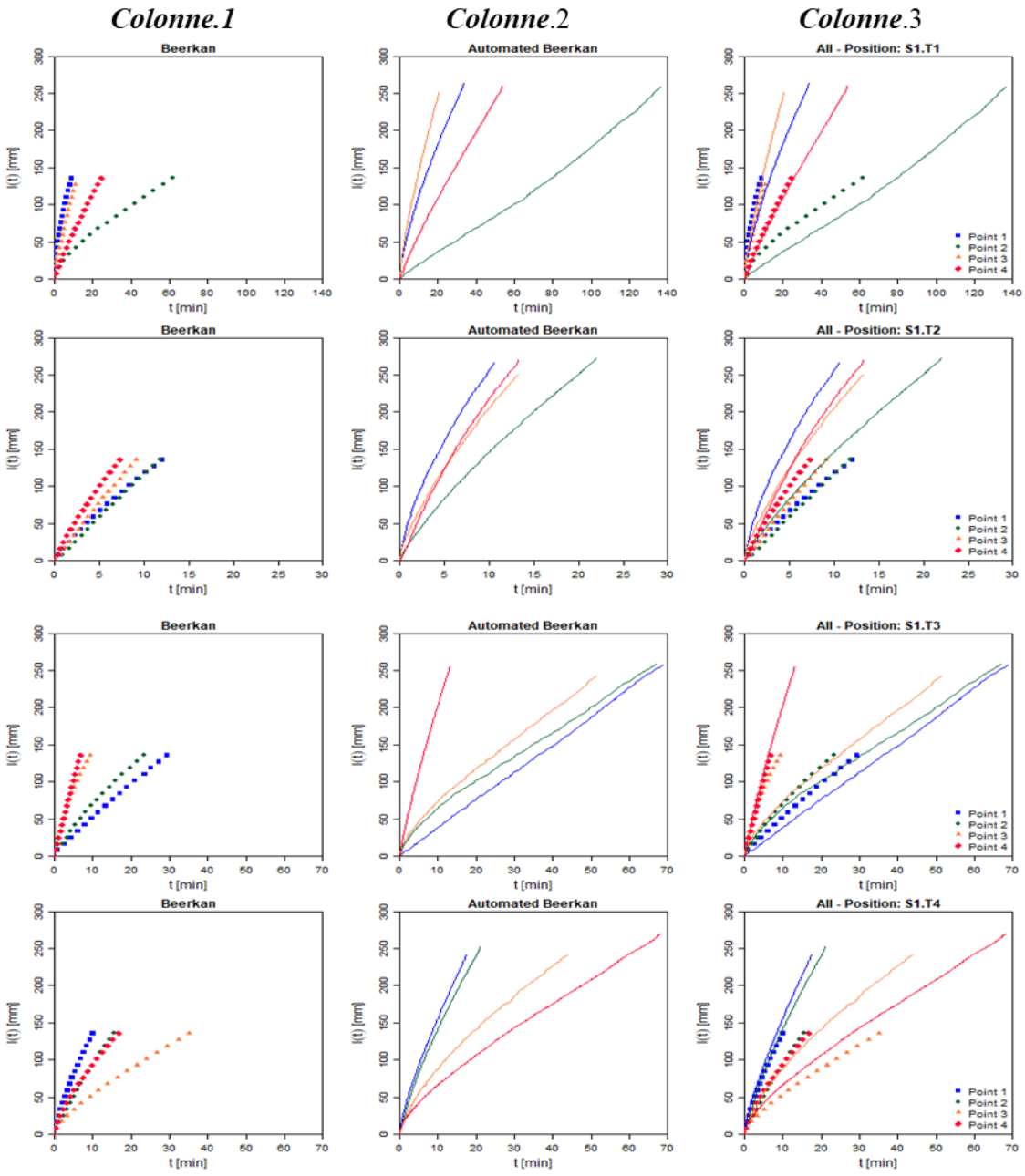


Figure IV-3. Données pour le site S1 avec les courbes d'infiltration obtenues avec la méthode Beerkan, B (colonne 1), Beerkan Automatisée, AB (colonne 2) et superposition des données (colonne 3).

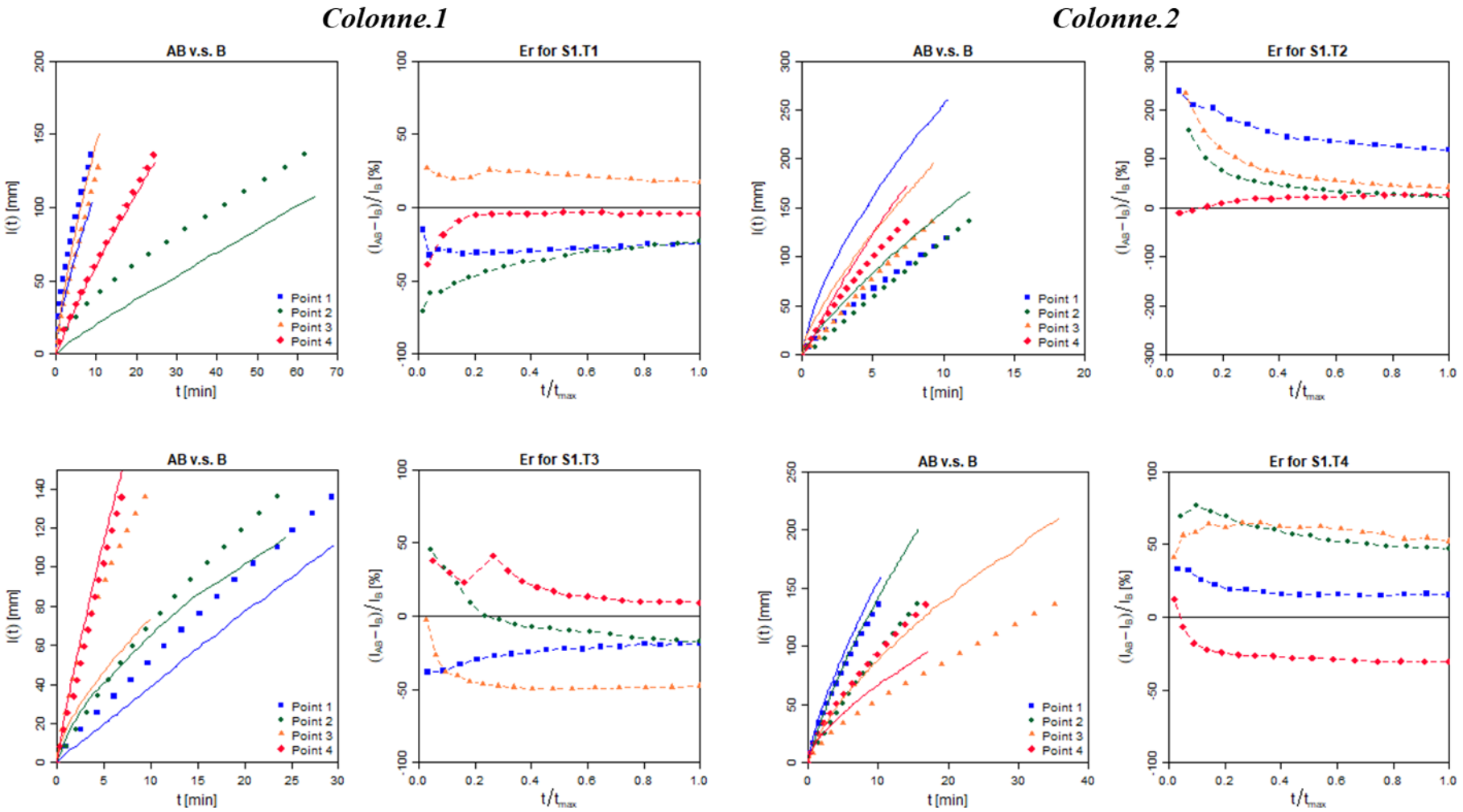


Figure IV-4. Superposition des données et estimation des valeurs pour les deux types d'infiltration aux même temps (colonne 1), erreur relative (colonne 2), pour les quatre transects du site 1.

Pour le transect S1T3, plusieurs apparaissent avec des coïncidences entre données AB et B (Points 2 et 4) et des divergences (points 1 et 3), dont une divergence importante au point 3. Néanmoins, pour le point 2, la forme des courbes diverge, même si l'ordre de grandeur reste le même. La forme des courbes diverge sensiblement, avec une pente initiale plus forte côté AB, suivie d'un ralentissement marqué, alors que la rupture de pente est moins marquée pour la courbe B. La valeur de l'erreur relative monte jusqu'à près de 50%, révélant que la correspondance entre AB et B n'est pas si bonne. Pour le point 3, une grande différence d'ordre de grandeur est observée. La méthode B enregistre un flux nettement plus important, probablement lié à une perturbation du profil ou à une mauvaise mise en place de l'anneau. Ce comportement peut signaler une anomalie locale comme une hydrophobicité ou une macroporosité (Bachmann and van der Ploeg 2002; Doerr et al. 2000). Enfin, le point 1 montre une donnée Beerkan (B) au-dessus de la méthode automatisée, mais une différence qui reste raisonnable.

Enfin, pour le transect S1T4, les deux faisceaux de courbe se superposent relativement bien avec néanmoins des courbes AB légèrement positionnées au-dessus des courbes B, exception faite du point 4. Les erreurs relatives suivent la tendance, avec des erreurs positives de l'ordre de 25-75% pour les points 1, 2 et 4 et une erreur relative de l'ordre de -10 à -25%et pour le point 4. Ce transect traduit une correspondance globale acceptable. Ce résultat confirme l'efficacité de la méthode automatisée pour reproduire fidèlement les dynamiques mesurées par la méthode classique pour certains cas.

IV.1.3.2 Analyse des courbes d'infiltration du site S2

Le site S2 comprend deux transects. Comme précédemment, l'analyse se fonde sur la comparaison graphique des courbes d'infiltration cumulée ainsi que de l'évolution de l'erreur relative (Er), en s'appuyant sur la forme des courbes, leur ordre de grandeur, et leur correspondance point par point (correspondance totale).

Pour le transect S2T1, les courbes d'infiltration obtenues par la méthode automatisée sont nettement au-dessus de celles de la méthode classique (Figure IV.5). Cette différence importante témoigne d'une divergence d'ordre de grandeur marquée, possiblement liée à un biais systématique dans la procédure automatisée ou à des conditions locales très favorables à l'infiltration conditionnée par l'infiltromètre automatisé (macroporosité, texture grossière). La forme des courbes diffère également : la méthode AB montre une progression rapide avec une pente croissante, tandis que les courbes issues de la méthode B présentent une croissance plus modérée. Ce décalage se reflète directement dans la courbe d'erreur relative, qui reste très éloignée de zéro, avec des valeurs excédantes fréquemment 100 %, voire 200 % pour certains points (Figure IV.6). Ces écarts témoignent d'une absence de correspondance totale, c'est-à-dire d'un désalignement point à point. Ce type de résultat peut indiquer une mauvaise

mise en œuvre de la méthode automatisée ou une influence non maîtrisée des conditions de surface (cf. (Bachmann and van der Ploeg 2002; Lassabatère et al. 2006)).

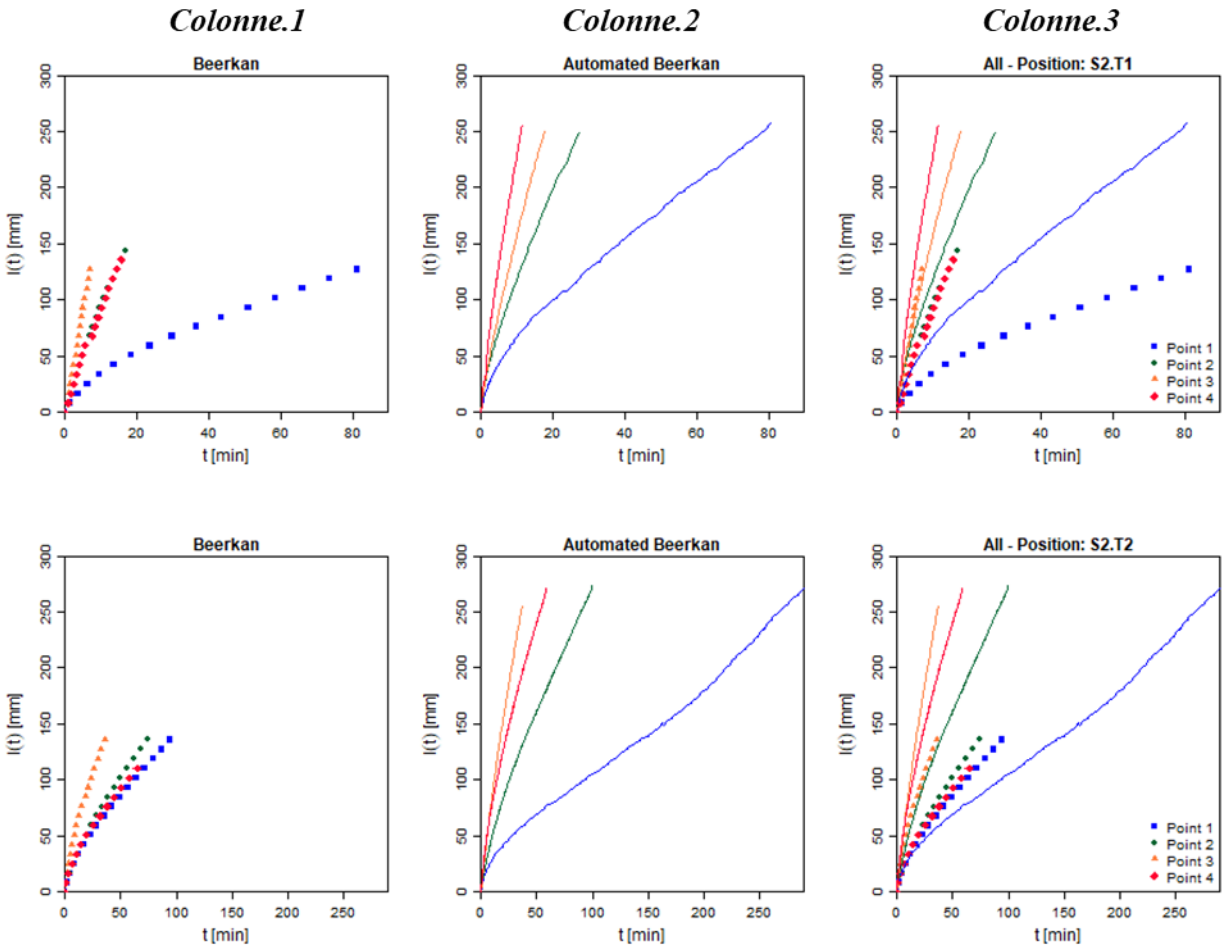


Figure IV-5. Données pour le site S2 avec les courbes d'infiltration obtenues avec la méthode Beerkan, B (colonne 1), Beerkan Automatisée, AB (colonne 2) et superposition des données (colonne 3).

Le transect S2T2 présente également une tendance claire à la surestimation du flux par la méthode AB, exception faite du point 1 (Figure IV.5 et IV.6). Bien que l'écart initial soit modéré pour certains points, l'écart augmente nettement au fil du temps, traduisant une dégradation progressive de la correspondance d'ordre de grandeur. On note qu'en terme d'erreur relative, on obtient une stabilisation (Figure IV.6), ce qui signifie que l'erreur est globalement proportionnelle à la valeur de l'infiltration cumulée de référence (ici les données de la méthode Beerkan, B). En ce qui concerne la forme, on observe une divergence croissante : les courbes AB présentent des pentes plus raides, ce qui indique une infiltration beaucoup plus rapide, non reproduite par la méthode classique. Cette différence de forme empêche d'établir une dynamique commune, ce qui limite la correspondance de forme entre les deux méthodes. La courbe Er illustre cette divergence : pour plusieurs points, l'erreur dépasse 100 % de manière persistante. Cela indique une mauvaise correspondance totale, où les deux méthodes ne

décrivent pas les mêmes processus, point par point. On note aussi que le point 1 transect 2 fait exception avec une donnée Beerkan légèrement au-dessus de la donnée obtenue avec la méthode Beerkan automatisée. Néanmoins, l'écart relatif reste modéré avec une valeur absolue inférieure à 25%.

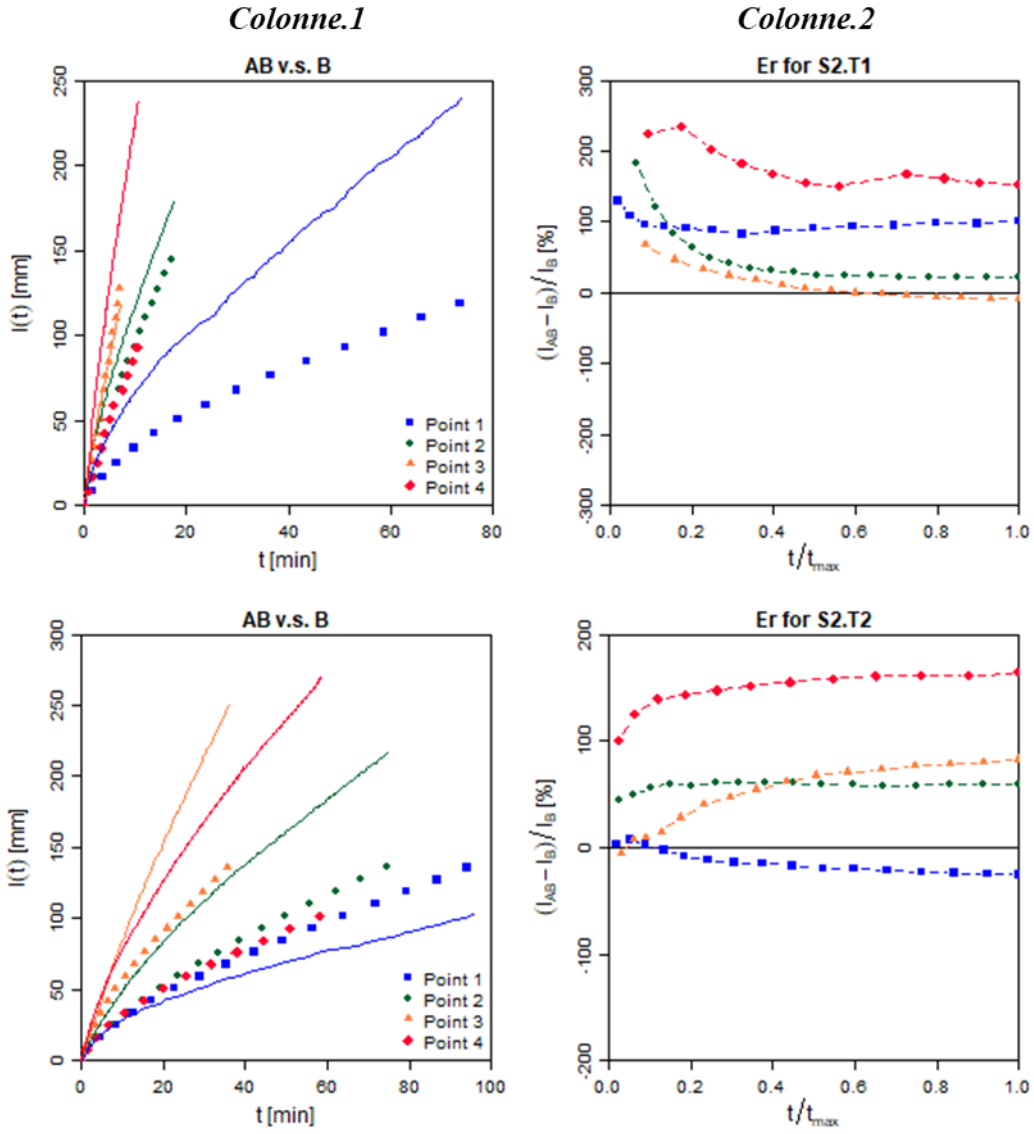


Figure IV-6. Superposition des données et estimation des valeurs pour les deux types d'infiltration aux même temps (colonne 1), erreur relative (colonne 2), pour les deux transects du site 2.

IV.1.3.3 Analyse des courbes d'infiltration du site S3

Dans le cas du transect S3T1, une divergence importante est observée entre les deux méthodes (Figure IV.7). Les courbes issues de la méthode automatisée (AB) sont largement au-dessus de celles de la méthode classique (B), indiquant une surestimation significative du flux infiltré. Cette différence se traduit une mauvaise correspondance avec une inadéquation visible au niveau des différentes paires de courbes. La forme des courbes diverge aussi sensiblement : les courbes AB montrent une croissance plus abrupte, souvent quasi linéaire sur certains points, tandis que les courbes B présentent une

dynamique plus atténuée, avec des formes de courbes convexes. Cette absence de parallélisme ou de similitude de pente exclut toute correspondance de forme valable.

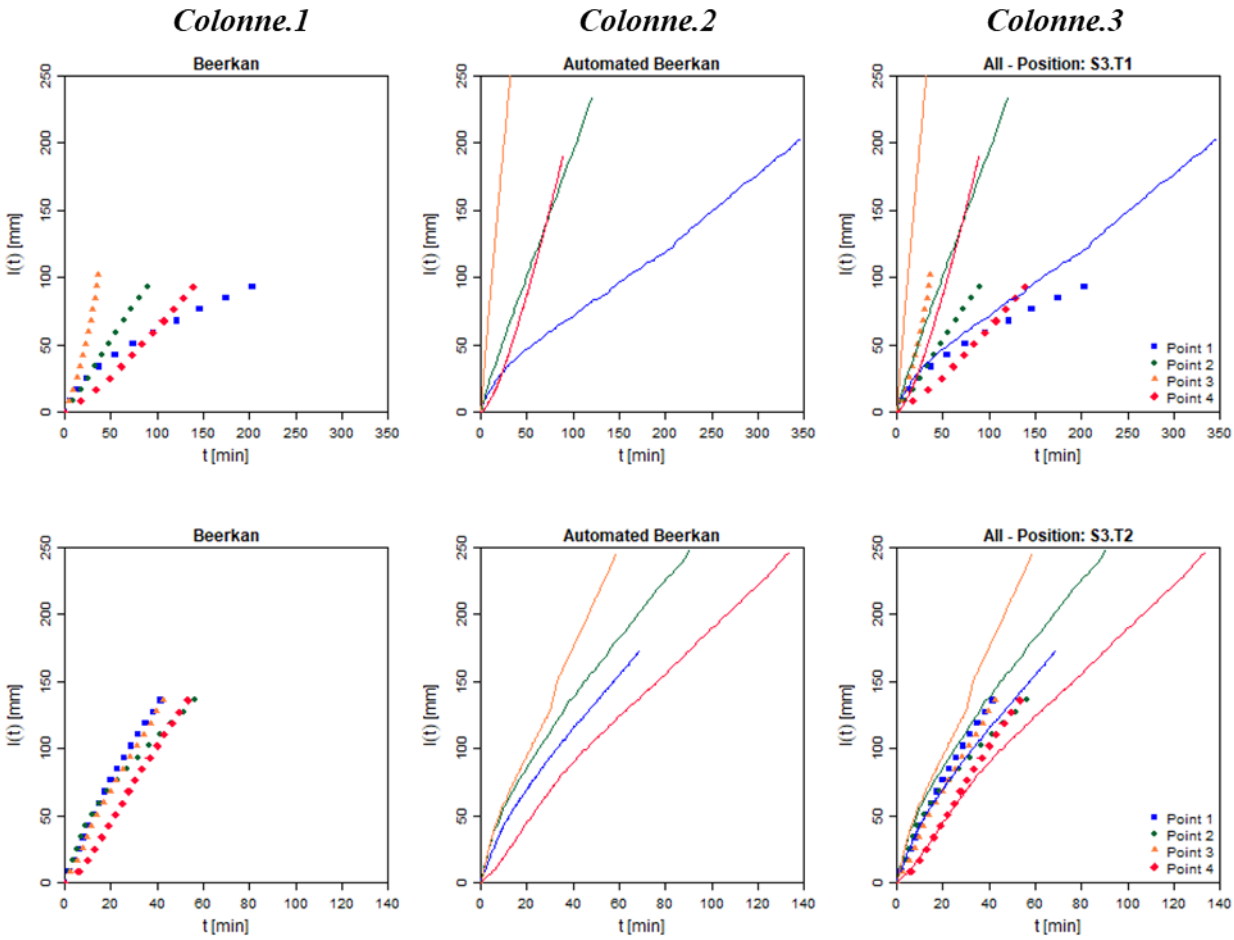


Figure IV-7. Données pour le site S3 avec les courbes d'infiltration obtenues avec la méthode Beerkan, B (colonne 1), Beerkan Automatisée, AB (colonne 2) et superposition des données (colonne 3).

La courbe d'erreur relative (Er) le confirme : les écarts dépassent fréquemment les 200 %, traduisant une absence totale de correspondance point par point. Ce type de comportement peut résulter d'une configuration locale présentant des hétérogénéités fortes du sol, d'une mauvaise calibration du dispositif automatisé, ou plus simplement de la différence en termes de sollicitation hydraulique entre les deux types de méthode Beerkan. Ces points seront discutés ultérieurement. Une convexité initiale marquée, comme observée ici, pourrait également évoquer un effet d'hydrophobicité de surface (Doerr et al., 2000).

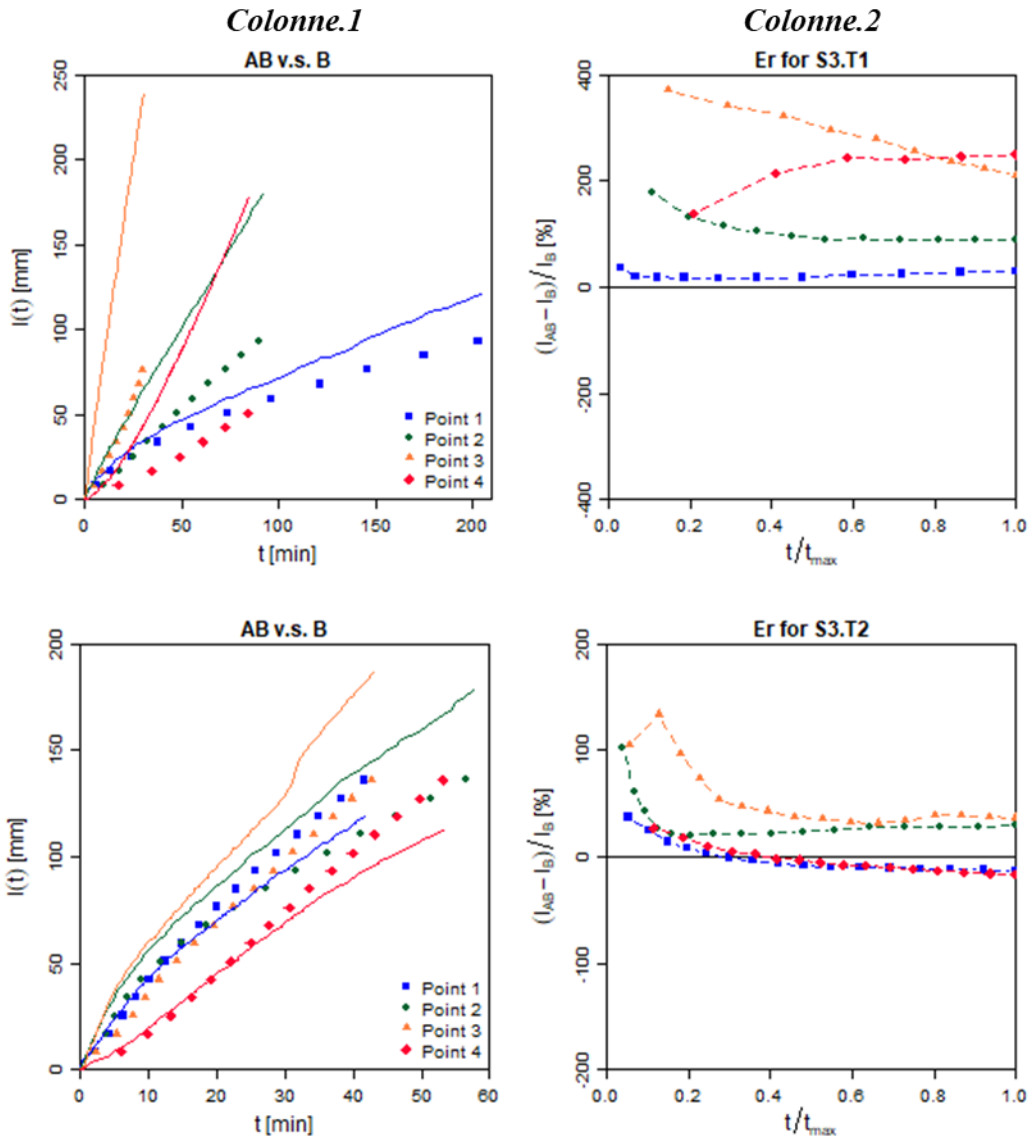


Figure IV-8. Superposition des données et estimation des valeurs pour les deux types d'infiltration aux même temps (colonne 1), erreur relative (colonne 2), pour les deux transects du site 3.

Pour le transect S3T2, la situation est plus favorable. Les courbes AB et B présentent une bonne superposition pour plusieurs points (notamment les points 1 et 2). Bien que certains écarts soient visibles, notamment pour le point 3 avec un écart plus manifeste, la dynamique générale des courbes est similaire : les pentes et les courbures suivent des trajectoires comparables, traduisant une correspondance de forme satisfaisante.

L'analyse de la courbe d'erreur relative confirme cette interprétation : pour la majorité des points, Er reste inférieure à 50 %, et même proche de 0 % pour les courbes les mieux ajustées (Figure IV.7). Ces faibles valeurs d'Er sont le signe d'une correspondance totale, particulièrement valable pour les points 1 et 2, où les courbes sont quasiment superposées. De tels ajustements renforcent la robustesse de la

méthode automatisée dans ce contexte, en ligne avec les observations de Bagarello et al. (2014) sur la validité des approches automatisées dans des milieux peu perturbés.

IV.1.3.4 Analyse des courbes d'infiltration du site S4

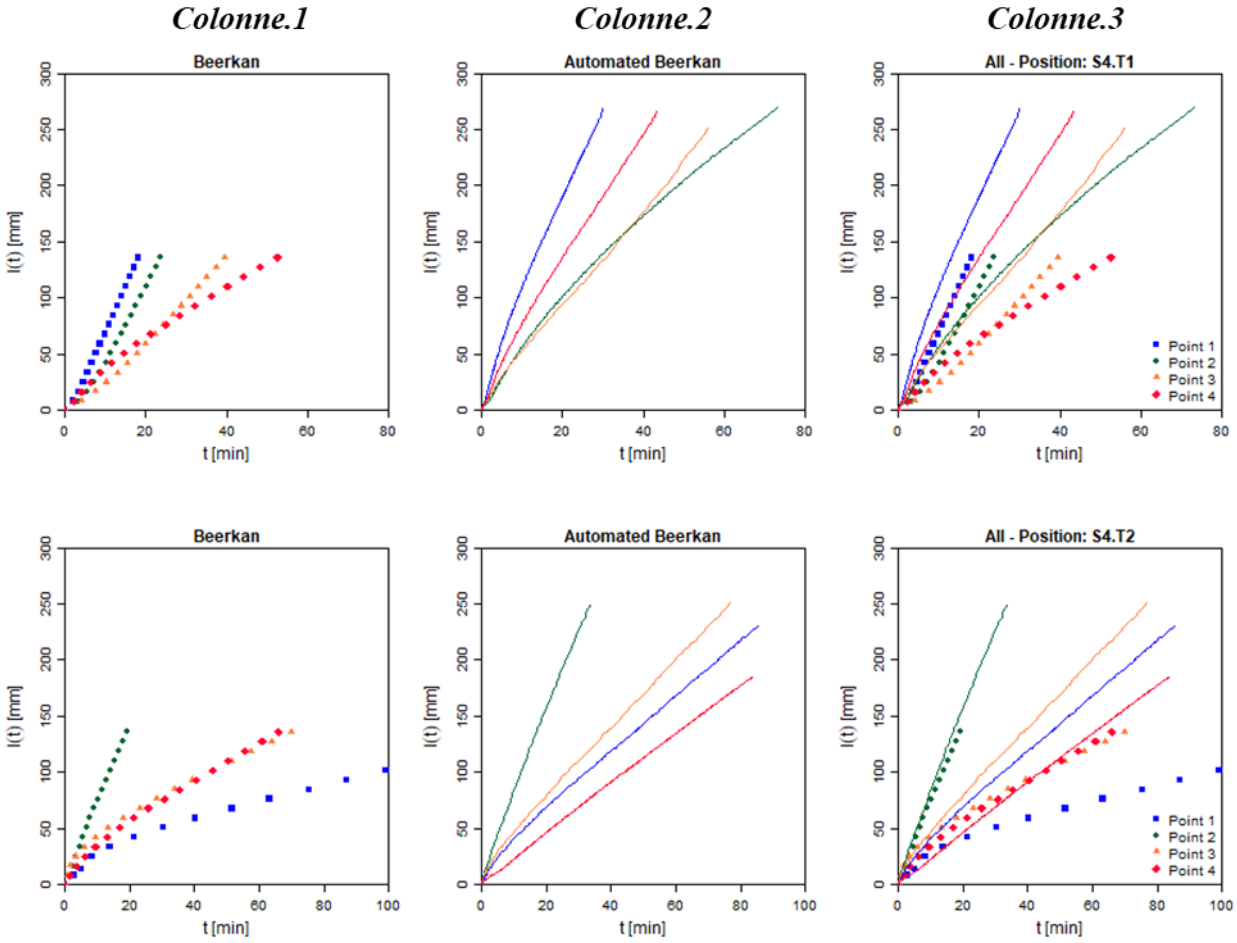


Figure IV-9. Données pour le site S4 avec les courbes d'infiltration obtenues avec la méthode Beerkan, B (colonne 1), Beerkan Automatisée, AB (colonne 2) et superposition des données (colonne 3).

Sur le transect S4T1, les courbes obtenues par la méthode automatisée (AB) sont, pour la majorité des points au-dessus de celles issues de la méthode classique (B), indiquant une surestimation générale du flux infiltré par le système automatisé (Figure IV.9). La seule exception est le point 2 avec au début la méthode classique au-dessus avant un croisement des courbes et une inversion de la tendance. L'écart d'ordre de grandeur est donc bien visible, notamment sur les points 3 et 4, avec des différences pouvant atteindre près de 200 mm d'infiltration cumulée. Malgré cela, certaines courbes conservent une forme parallèle. Cette correspondance de forme partielle indique que la dynamique du processus d'infiltration est approximativement conservée, même si la magnitude varie. Cela se reflète dans la courbe d'erreur relative (Er) : les valeurs d'Er dépassent fréquemment les 100 %, surtout pour les courbes les plus éloignées, ce qui signifie une absence de correspondance totale sur ces points. Cependant, pour certains

points, Er tend vers zéro au fil du temps, suggérant une convergence tardive entre les deux méthodes, possiblement liée à la stabilisation du flux infiltré (Figure IV.10.b, 1^{iere} ligne).

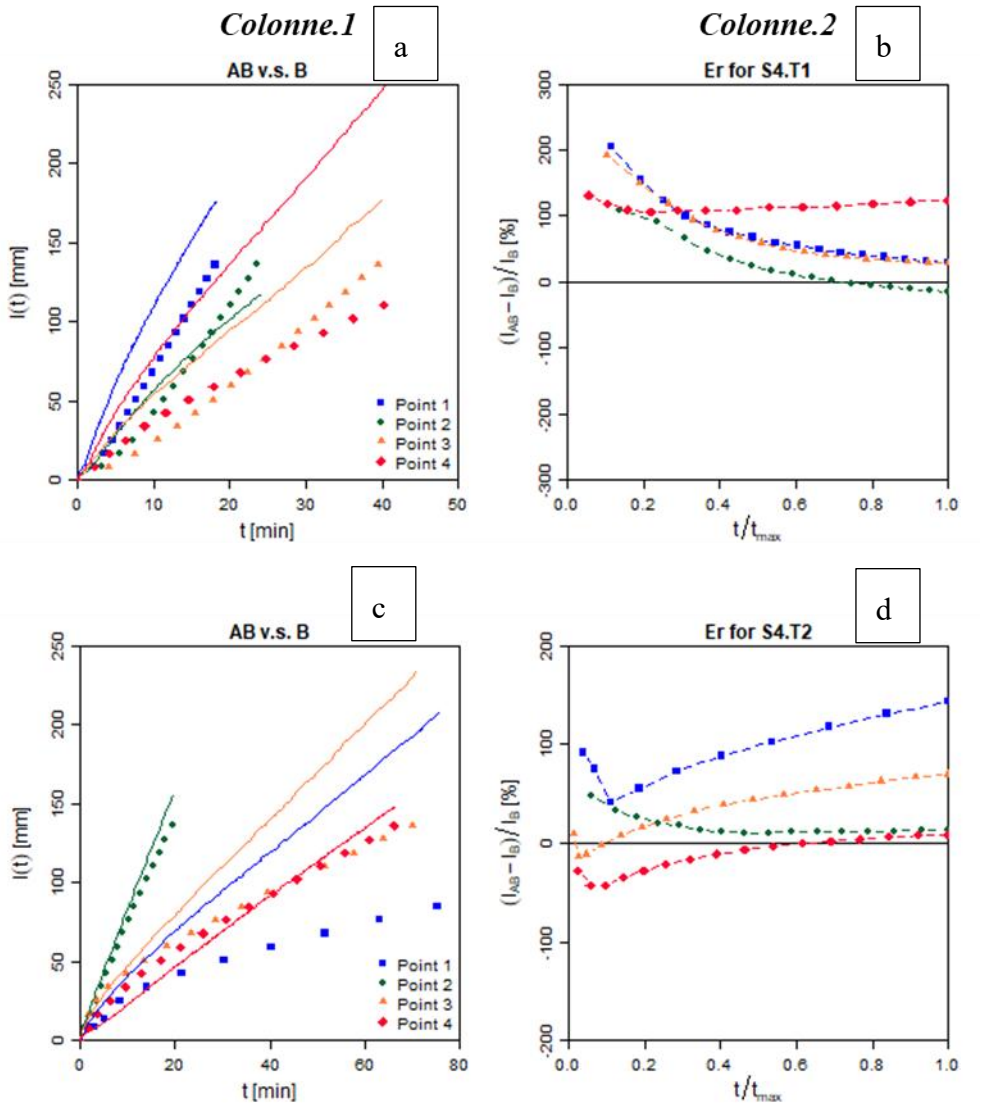


Figure IV-10. Superposition des données et estimation des valeurs pour les deux types d'infiltration aux même temps (colonne 1), erreur relative (colonne 2), pour les deux transects du site 4.

Le transect S4T2 présente des résultats plus cohérents entre les deux méthodes, en particulier pour les points 1 et 4. Les deux autres points ont une correspondance correcte, mais avec une divergence des courbes dans le temps (Figure IV.10.c). Les courbes AB et B suivent des trajectoires proches, avec une bonne correspondance de l'ordre de grandeur observable sur presque tous les points. Les écarts restent relativement restreints, et les infiltrations mesurées restent dans des plages comparables. Du point de vue de la forme, les courbes présentent une concavité et une pente similaires, ce qui traduit une bonne correspondance de forme : les dynamiques d'infiltration semblent bien capturées par les deux techniques. La courbe d'erreur relative confirme cette impression : pour plusieurs points (notamment

les points 2 et 4), Er reste proche de 0 % tout au long de l'essai (Figure IV.10.d), ce qui atteste d'une correspondance excellente. Seuls certains points présentent des Er légèrement plus élevés, mais sans jamais atteindre des valeurs critiques (>100 %). Cela témoigne d'une bonne reproductibilité de la méthode automatisée dans ce contexte.

IV.1.4 Analyse ces courbes d'infiltration

Jusqu'ici, nous avons comparé directement les données infiltrométriques, c'est-à-dire les infiltrations cumulées obtenues par les deux méthodes. Nous avons pu voir que la comparaison directe montrait une multitude de cas différents, avec dans certains cas une donnée AB au-dessus de la donnée B, d'autres fois nettement en dessous, et enfin présentant un alignement très correct sur la donnée Beerkan. Il n'y a donc pas de tendance unique et d'effet systématique. Une synthèse est donc proposée pour identifier dans un premier temps les sources de cette inadéquation. Puis, dans un second temps, nous essayons de définir une métrique (indicateur) permettant de résumé toutes les courbes d'infiltration à une variable permettant la réalisation d'une analyse de variance pour identifier statistiquement l'effet du dispositif, l'effet du site et de savoir si l'effet du dispositif dépend par du site (et vice-versa). On a vu en effet que les sites S3 et S4 pouvaient présenter des résultats différents des tendances observées dans les sites S1 et S2.

IV.1.4.1 Première synthèse des données infiltrométriques

L'analyse comparative des courbes d'infiltration entre la méthode Beerkan classique (B) et l'infiltromètre automatisé (AB), appliquées sur les mêmes points d'expérimentation pour les sites S1 à S4 de l'ENTPE, révèle une variabilité significative dans la qualité de l'ajustement selon les contextes. Sur le site S1, les transects S1T1 et S1T3 montrent une excellente correspondance de forme (pentes et concavités similaires) et une correspondance d'ordre de grandeur avec des flux infiltrés très proches, traduisant une correspondance totale satisfaisante (Er < 20% pour la majorité des cas). À l'inverse, S1T2 présente une divergence notable des courbes (valeurs AB systématiquement plus élevées). Pour le site S2, le contraste est fort dépendamment des points choisis sur les transects avec des cas où l'on observe une mauvaise correspondance de forme et des écarts d'ordre de grandeur importants (Er > 100 %), et des cas où, au contraire, la dynamique est similaire entre les deux méthodes. Sur le site S3, le transect S3T1 montre des écarts marqués tant en forme qu'en valeur, traduisant une faible convergence des méthodes et une absence de correspondance totale**,** tandis que S3T2 révèle des courbes étroitement alignées avec une excellente correspondance globale**,** confirmée par une erreur relative très faible. Enfin, le site S4 présente des comportements contrastés, avec une forte divergence des courbes pour certains points (Er > 100 %), avec une mauvaise correspondance de forme d'une part, et une bonne correspondance de pente et d'ordre de grandeur pour d'autres points de ces sites, d'autre part. On note

aussi que les sites 3 et 4 présentent des courbes convexes au lien de la concavité usuellement observée, évoquant l'effet de hydrophobicité (Doerr et al. 2000). Ces résultats confirment que si la méthode automatisée tend globalement à bien reproduire les dynamiques d'infiltration décrites par la méthode classique, sa performance reste dépendante des points investigués et des divergences importantes peuvent apparaître dans certains cas.

La divergence entre les deux méthodes peut être reliée à deux options. Soit les deux méthodes sont réellement différentes du fait de leur mode d'application spécifique de l'eau à la surface du sol, soit les conditions ont changées entre les deux essais. Concernant la deuxième option, les essais sont réalisés successivement, ce qui fait que la seconde infiltration s'opère sur un sol potentiellement humidifié du fait du premier essais. C'est la raison pour laquelle un temps de latence d'au minimum 3 à 5j est respecté pour limiter cette influence, mais le risque ne peut être exclu complètement. En complément, la première infiltration pourrait modifier localement la structure du sol, en cas de sensibilité à l'eau. Par exemple, certains sols fins peuvent évoluer en terme de structure en surface avec un effet sur les infiltrations cumulées (Di Prima et al. 2018). En supplément, les différents modes opératoires (mise en place de l'anneau, versement des échantillons d'eau, etc.) peuvent être un facteur de perturbation du sol et donc de la modification de leurs propriétés. Enfin, la réalisation des essais ne se fait pas au même jour et avec les mêmes conditions initiales, alors que l'on sait que la teneur en eau initiale impacte les données infiltrométriques (Angulo-Jaramillo et al. 2016). Cet aspect pose donc la question de la stabilité des conditions locales (structure du sol, teneur en eau initiale, contact sol-capteur), soulignant l'importance d'un étalonnage site-spécifique et d'une vérification qualitative des courbes, comme recommandé dans les travaux de (Bagarello et al. 2014a; Di Prima et al. 2016).

Les différences entre les deux méthodes peuvent aussi provenir de la différence intrinsèque entre les deux méthodes. La première différence résulte de l'automatisation qui empêche toute erreur humaine ou toute influence d'une évaluation objective. Nous rappelons que la méthode Beerkan classique demande à un opérateur de gérer successivement un ensemble de volumes d'eau. Néanmoins, le versement du volume suivant est très dépendant de l'opérateur. Pour une même situation, certains opérateurs vont attendre que toute l'eau soit infiltrée sur la surface, alors que d'autres vont verser plus rapidement, dès que la surface occupée par l'eau sera inférieure à admettons 20% de la surface. Ainsi, deux opérateurs ne produiront probablement pas la même donnée. En supplément, la méthode Beerkan est communément appliquée en attendant la désaturation du sol quasi complète au sein de l'anneau d'infiltration. Ceci résulte en une désaturation superficielle du sol et donc l'introduction d'air entre eux volumes successifs. On peut craindre que le piégeage d'air ne ralentisse l'infiltration en comparaison avec l'infiltromètre qui assure tout le temps une lame d'eau au-dessus du sol (Loizeau et al. 2017).

Enfin, l'infiltromètre utilisé pour la méthode AB assure une lame d'eau constante en surface, ce qui facilite sans doute l'infiltration pour le cas des sols hydrophobes (Abou Najm et al. 2021).

IV.1.4.2 Analyse du taux d'infiltration des sites ENTPE

Jusqu'ici nous avons comparé deux à deux les réponses pour les méthodes B et AB. Tel qu'explicité ci-dessus, cette section vise à définir une métrique pour synthétiser la réponse infiltrométrique dans une variable et tester la significativité des effets du dispositif et du site. Nous avons considéré en première approche le taux d'infiltration moyen comme métrique de caractérisation des courbes d'infiltration cumulées. Le taux d'infiltration (IR) se définit simplement comme le rapport entre l'infiltration cumulée totale et le temps total d'infiltration. Sur la plateforme expérimentale de l'ENTPE, où quatre sites ont été investigués, trois facteurs ont été examinés : l'effet du dispositif de mesure (ou méthode), l'effet du site investigué et leur interaction. L'investigation de l'interaction revient à regarder si l'effet méthode dépend du site investigué ou si on peut considérer que l'effet méthode est relativement indépendante des sites. Cela permet en même temps de tester l'effet site dépendamment de la méthode considérée (Beerkan versus Beerkan automatisée). En effet, dans un contexte d'analyse de la variance, l'interaction méthode : site est équivalente à l'interaction site : dispositif (du fait de la symétrie des calculs de la variance). Tous les tests statistiques ont été effectués en considérant un niveau de signification de 5 %, ou encore un risque de première espèce de 5%. Cela permet d'évaluer en fonction de la valeur de p-value le degré de significativité de l'hypothèse.

On a donc effectué une série d'ANOVA à un facteur (méthode de mesure appelé aussi « device » dans les figures) et des ANOVA à deux facteurs incluant donc les effets des variables « méthode », « site » et aussi de l'interaction « méthode : site ». Pour cela nous avons en premier lieu calculé le taux d'infiltration moyen ($IR = I_{tot} / t_{tot}$) a fait l'objet d'une analyse de variance à deux facteurs ANOVA-2 à l'aide des fonctions et packages proposés dans R. Les résultats de l'ANOVA-2 sont synthétisés dans le Tableau IV.3. Nous avons accompagné les résultats de représentations graphiques permettant d'illustrer les résultats des ANOVA-2 (Figure IV.11).

Tableau IV-3. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour le taux d'infiltration avec les différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

IR	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p-value
méthode	1	53689	53689	0.5543	0.459
site	3	3088939	1029646	10.63	7.220E-06
méthode : site	3	49943	16647	0.1718	0.9151
résidus	72	6973973	96860		

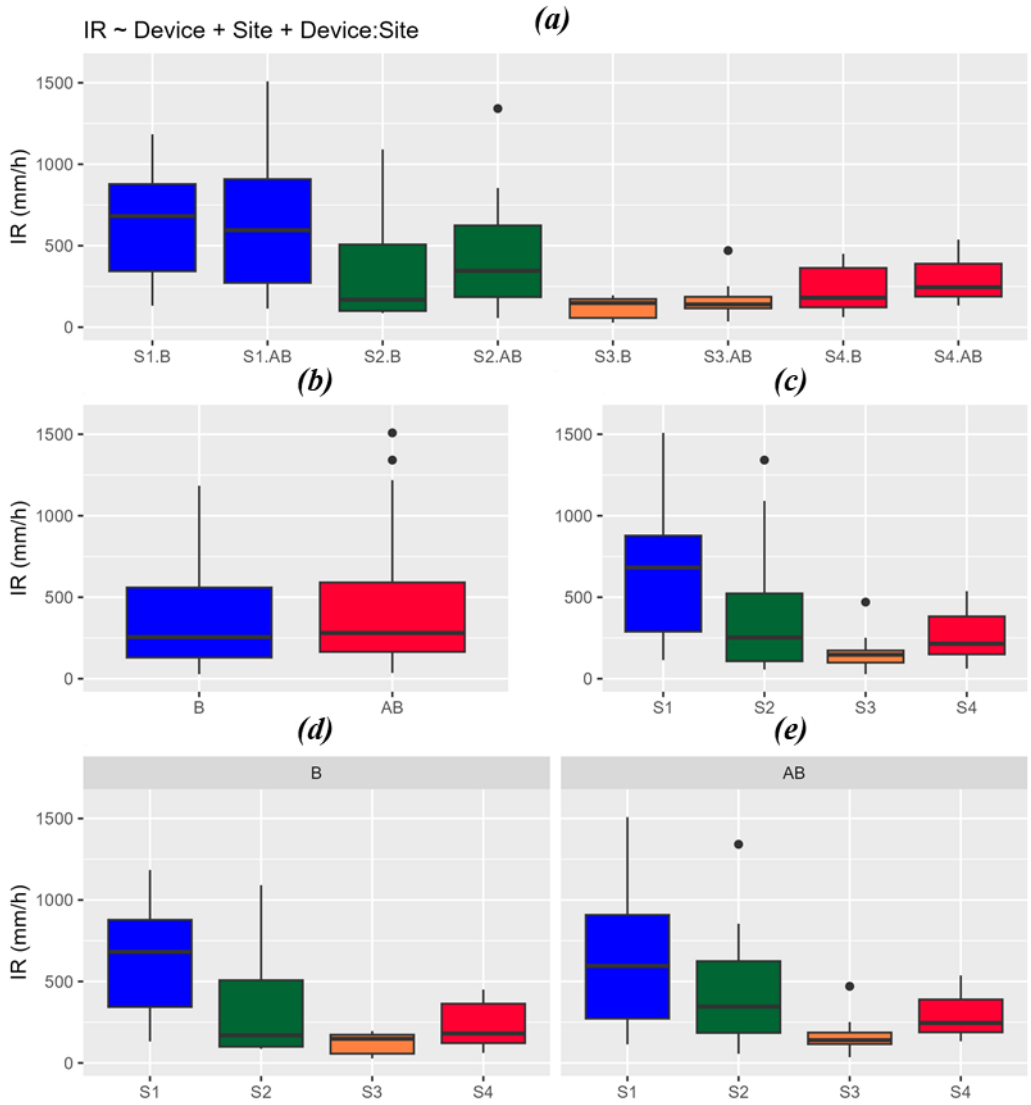


Figure IV-11. Boxplots du taux d'infiltration pour les différents facteurs, avec l'effet dispositif (b), l'effet site (c), l'interaction méthode : site illustrant l'effet site lorsqu'on utilise la méthode Beerkan et ce même effet lorsqu'on utilise la méthode AB.

L'analyse de variance à deux facteurs met en évidence un effet site avec une valeur de probabilité critique (p-value) bien inférieure au seuil choisi de 0.05 (Tableau IV.3, p-value = $7.22\ 10^{-6}$). L'effet « site » est donc très significatif, avec des médianes qui s'étendent de moins de 100 mm h^{-1} (S3) à plus de 600 mm h^{-1} (S1). Ceci révèle une hétérogénéité pédologique marquée. En revanche, les valeurs sont bien au-dessus du seuil pour les autres variables explicatives, à savoir la méthode et l'interaction méthode : site. On en conclut que les deux méthodes délivrent des estimations statistiquement équivalentes sur l'ensemble du gradient d'IR ($\approx 50 - >600$ mm h^{-1}). De plus, une interaction non significative atteste que le modèle est bien linéaire et que le site a un effet indépendant de la méthode et vice versa. Ainsi, l'absence d'interaction significative montre que la performance de l'outil

automatisé reste stable quelles que soient les conditions locales. Sa capacité à restituer fidèlement les variations spatiales, tout en demeurant comparable à la méthode de référence, le rend particulièrement adapté aux campagnes de cartographie de la conductivité hydraulique ou aux diagnostics agro-hydrologiques à grande échelle.

La figure IV.11 permet d'illustrer les résultats obtenus avec le test d'ANOVA-2. Les données sont regroupées par méthode pour tous les sites (Figure IV.11a), puis uniquement par méthode (Figure IV.11b) ou par site (Figure IV.11c). La partie basse de la figure agrège les données par site pour les données Beerkan classique (Figure IV.11.d) et pour les données Beerkan automatisé (Figure IV.11.e). Il est clair que la différence de valeur médiane du taux d'infiltration reste modérée par rapport à la dispersion autour des médianes (Figure IV.11b), ce qui justifie le caractère non significatif de l'effet méthode. En revanche, les écarts de médianes sont nettement plus importants pour les 4 sites, même au regard de la dispersion de la médiane, ce qui justifie du caractère significatif de ce facteur (Figure IV.11c). Enfin, on note sur la distribution des médianes entre sites est totalement cohérent entre la donnée Beerkan (Figure IV.11.d) et Beerkan automatisée (Figure IV.11.e), attestant d'une interaction nulle. On peut regarder l'effet de la méthode en fonction du site pour évaluer aussi cette interaction (Figure IV.11a). On note aucun effet significatif de la méthode, indépendamment du site. On peut noter néanmoins quelques différences en termes de position de médiane, avec des médianes légèrement supérieures pour la méthode Beerkan pour les sites S1 et S3, et la tendance inverse pour S2 et S4.

En conséquence, ces résultats statistiques basés sur le taux d'infiltration porteraient à statuer que les deux méthodes B et AB sont équivalentes et que les données sont essentiellement structurées par une forte variabilité spatiale. Néanmoins, avec cet indicateur, nous avons regardé essentiellement l'infiltration moyenne, relative à la comparaison des infiltrations cumulées en termes d'ordre de grandeur. Nous avons pu voir que à ordre de grandeur équivalent les courbes infiltrométriques pouvaient présenter des formes totalement différentes et pointer vers des processus physiques différents. En outre, la comparaison directe du taux d'infiltration souffre de la même inexactitude que la comparaison directe des courbes d'infiltration cumulées lorsqu'elles ont été obtenues pour des conditions initiales différentes. Ainsi, dans ce qui suit, nous traitons les courbes infiltrométriques avec les variantes de l'algorithme BEST pour comparer les paramètres hydrodynamiques qui sont des paramètres intrinsèques indépendants des conditions d'expérimentation en termes de conditions initiales. Si les méthodes B et AB sont équivalentes, elles devraient donner les mêmes estimations de paramètres hydrodynamiques.

IV.1.5 Estimation des paramètres BEST Sites-ENTPE

Pour l'estimation des paramètres BEST, nous allons regrouper cette partie en deux groupes à savoir les trois anciennes variantes de BEST (BEST-Slope ; BEST-Intercept et BEST-Steady) et les deux variantes BEST récemment ajoutées pour traiter le cas des courbes convexes typiques des sols hydrophobes (BEST-WR et BEST-WR-3T).

IV.1.5.1 Variantes classiques de BEST

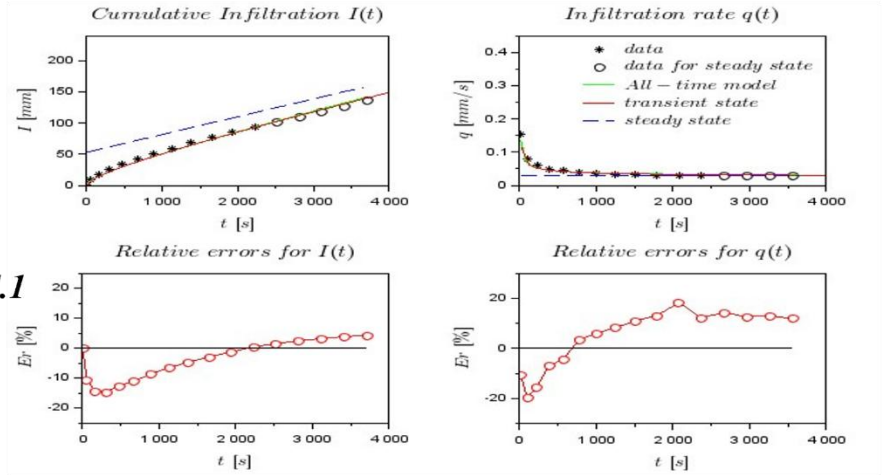
Dans cette section, nous comparons les résultats issus des trois variantes de l'algorithme BEST appliquées à un essai représentatif pour chacun des quatre sites, en utilisant les données des deux méthodes Beerkan (classique et automatisée). Les trois algorithmes considérés sont : **BEST Slope**, basé sur la pente de l'asymptote finale décrite par l'infiltration cumulée pour déduire une relation entre la sportivité, S, et la conductivité hydraulique à saturation, K_s, (Lassabatere et al., 2006) ; **BEST Intercept**, en se basant sur l'ordonnée à l'origine de cette asymptote (Yilmaz et al., 2010) ; et **BEST Steady**, qui utilise la pente et l'ordonnée à l'origine pour fonder un système à deux équations et déterminer directement S et K_s (Bagarello et al., 2014). Les courbes issues de la méthode Beerkan classique sont représentées dans la colonne de gauche, et celles de la méthode automatisée dans la colonne de droite pour chaque figure. Ces résultats serviront de base à une analyse statistique comparative des paramètres estimés pour chaque site. On décrit quelques exemples typiques pour chaque site.

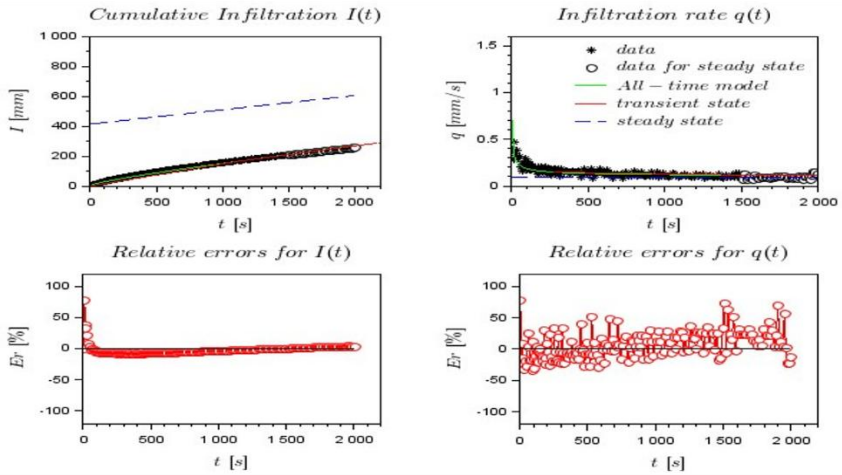
IV.1.5.1.1 BEST-Slope

Pour l'analyse des graphes issus de l'algorithme BEST-Slope, on révèle des contrastes significatifs entre les quatre sites (S1 à S4) et les deux méthodes d'acquisition (Beerkan classique - B, et automatisée - AB), en lien avec des phénomènes physiques tels que le colmatage, l'hydrophobicité ou encore la dynamique de stabilisation du flux (atteinte du régime permanent). Les figures présentent toujours les mêmes variables avec l'ajustement sur l'infiltration cumulée $I(t)$ (en haut à gauche) et le taux d'infiltration $q(t)$ (en haut à gauche) et les erreurs relatives correspondantes (en bas). Sur le site 1, on note que l'infiltration cumulée et le taux d'infiltration sont bien ajustés par le modèle, avec des erreurs relatives inférieures à 25% en value absolue. À l'inverse, la méthode automatisée (AB) présente une forte variabilité du taux d'infiltration et une dispersion marquée des résidus et des erreurs relatives importantes, notamment au début. On note aussi que l'asymptote est nettement plus éloignée des observations que dans le cas de la méthode B.

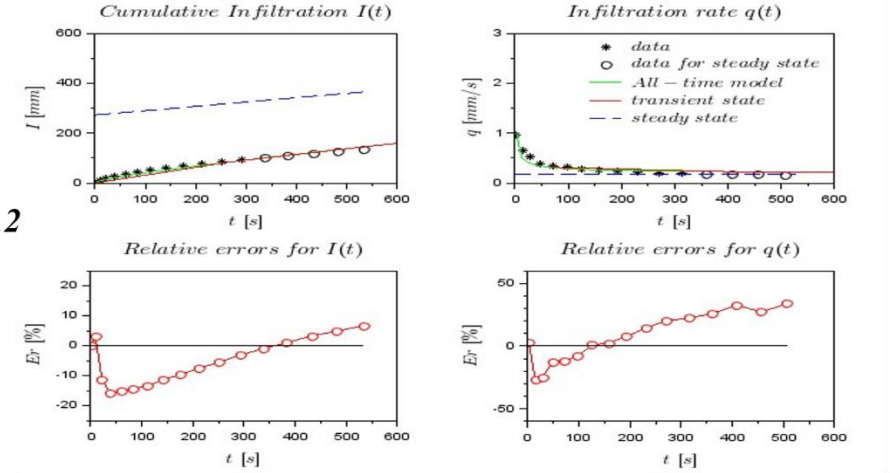
BEST-Slope (méthode classique) ***BEST-Slope (méthode automatisée)***

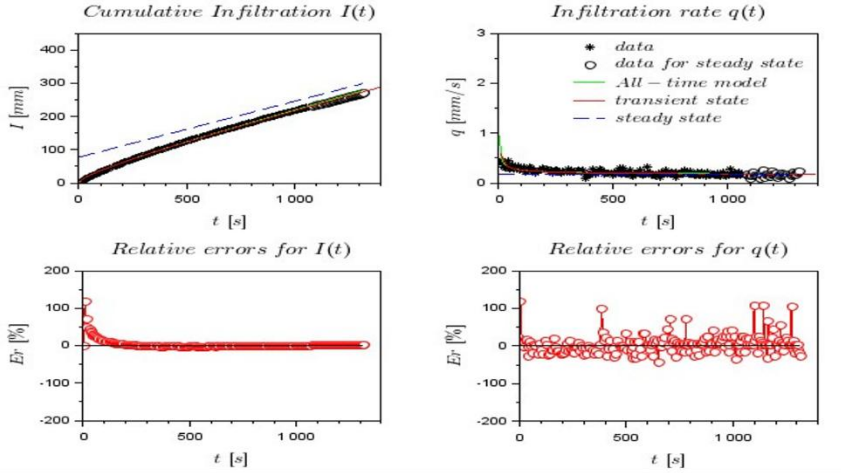
S.1





S.2





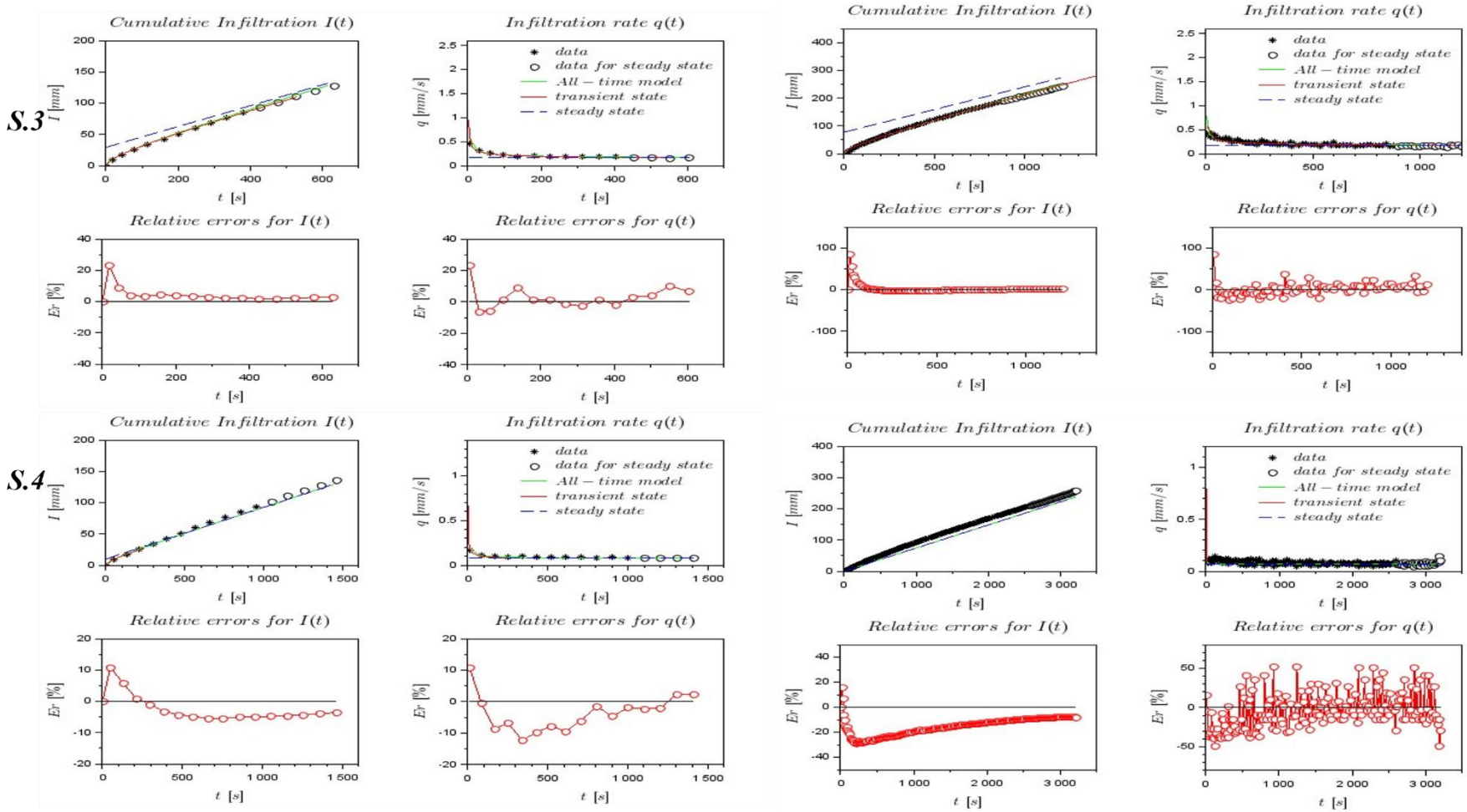


Figure IV-12. Résultats de BEST-Slope pour un point de chaque site (S1, S2, S3 et S4) ; chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

Sur le site 2, les résultats issus de la méthode classique conservent un bon ajustement sur les observations avec une erreur relative modérée. En revanche, l'asymptote finale est éloignée de l'infiltration cumulée observée. La méthode automatisée y montre une amélioration notable par rapport à S1 : les données expérimentales restent proches du modèle avec une diminution des fluctuations sur le taux d'infiltration, bien que quelques erreurs persistent. L'asymptote est aussi mieux positionnée. Sur le site 3, la convergence entre les deux méthodes devient évidente : la superposition des données expérimentales avec le modèle est très bonne dans les deux cas, les résidus sont peu dispersés, et l'erreur relative est minimale. Enfin, sur le site 4, le modèle s'ajuste bien sur les courbes d'infiltration cumulée et les taux d'infiltration, avec des erreurs relatives faibles. Toutefois, dans le cas de la méthode automatisée (AB), un léger décalage apparaît dans la phase intermédiaire de l'essai, avec une sous-estimation systématique (les données expérimentales se situent au-dessus du modèle après une phase initiale bien ajustée). Enfin, les deux données sont quasi-linéaires et ne correspondent plus à des courbes concaves.

En somme, cette analyse met en lumière que l'efficacité de l'algorithme BEST-Slope peuvent propose des ajustements corrects pour les deux types de données, acquises avec les méthodes B ou AB. Toutefois, certains décalages observés entre modèle et données expérimentales et notamment pour les courbes convexes observées dans les sites S3 et S4 soulignent la pertinence de développements comme BEST-WR (Di Prima et al. 2021) et BEST-WR3T.

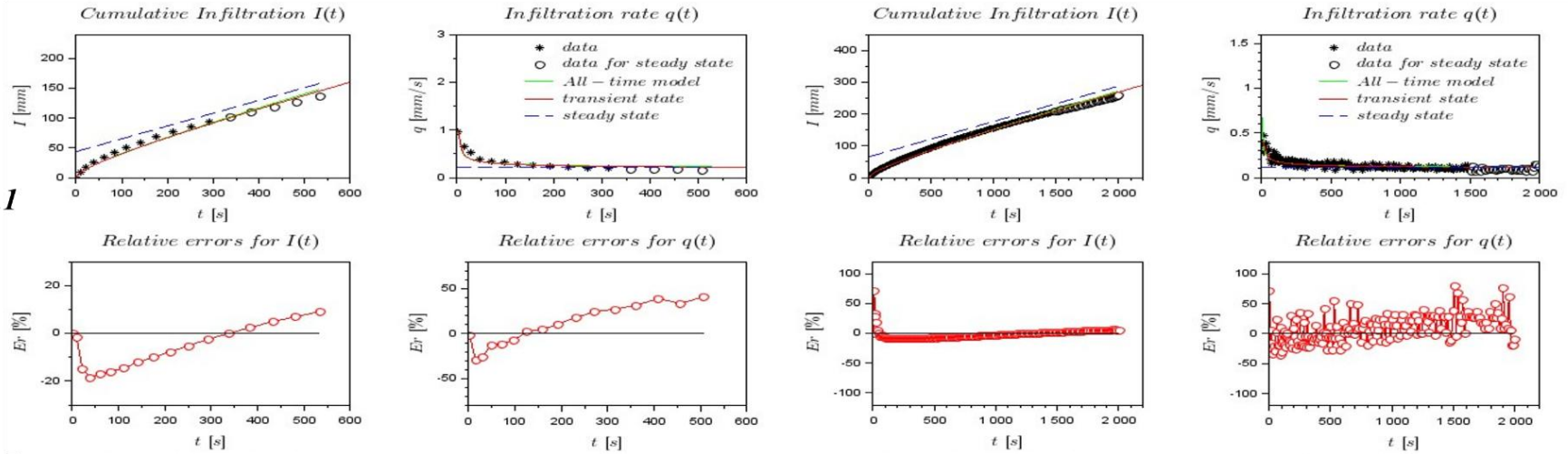
IV.1.5.1.2 BEST-Intercept

L'analyse des graphes issus de l'algorithme BEST-Intercept met en lumière des performances variables selon les sites (S1 à S4) et les méthodes appliquées (classique B vs automatisée AB), reflétant la sensibilité du modèle à la stabilité de l'infiltration. Cet algorithme est réputé pour mieux capter les effets de sorption initiaux et la composante transitoire du flux (Yilmaz et al. 2010), bien qu'il soit plus sensible aux bruits de mesure et aux perturbations du signal (Bagarello et al. 2014b).

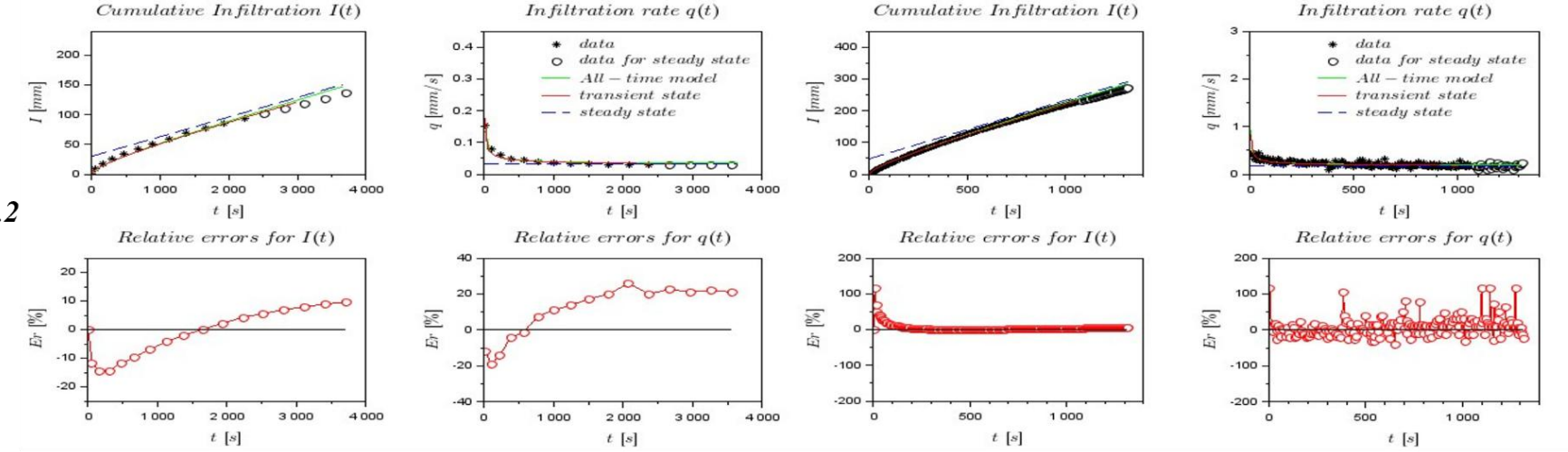
Sur le site 1, à texture fine, la méthode classique (B) montre une bonne superposition des points expérimentaux à la courbe théorique dans la phase initiale et un taux d'infiltration relativement stable. L'erreur relative reste modérée, indiquant un ajustement correct. En revanche, la méthode automatisée (AB) montre ici des signes d'instabilité : les données présentent une dispersion accrue autour du modèle, surtout au niveau des taux d'infiltration avec des erreurs relatives oscillant 50% et 100% d'erreur (en valeur absolue).

BEST-Intercept (méthode classique) ***BEST-Intercept (méthode automatisée)***

S.1



S.2



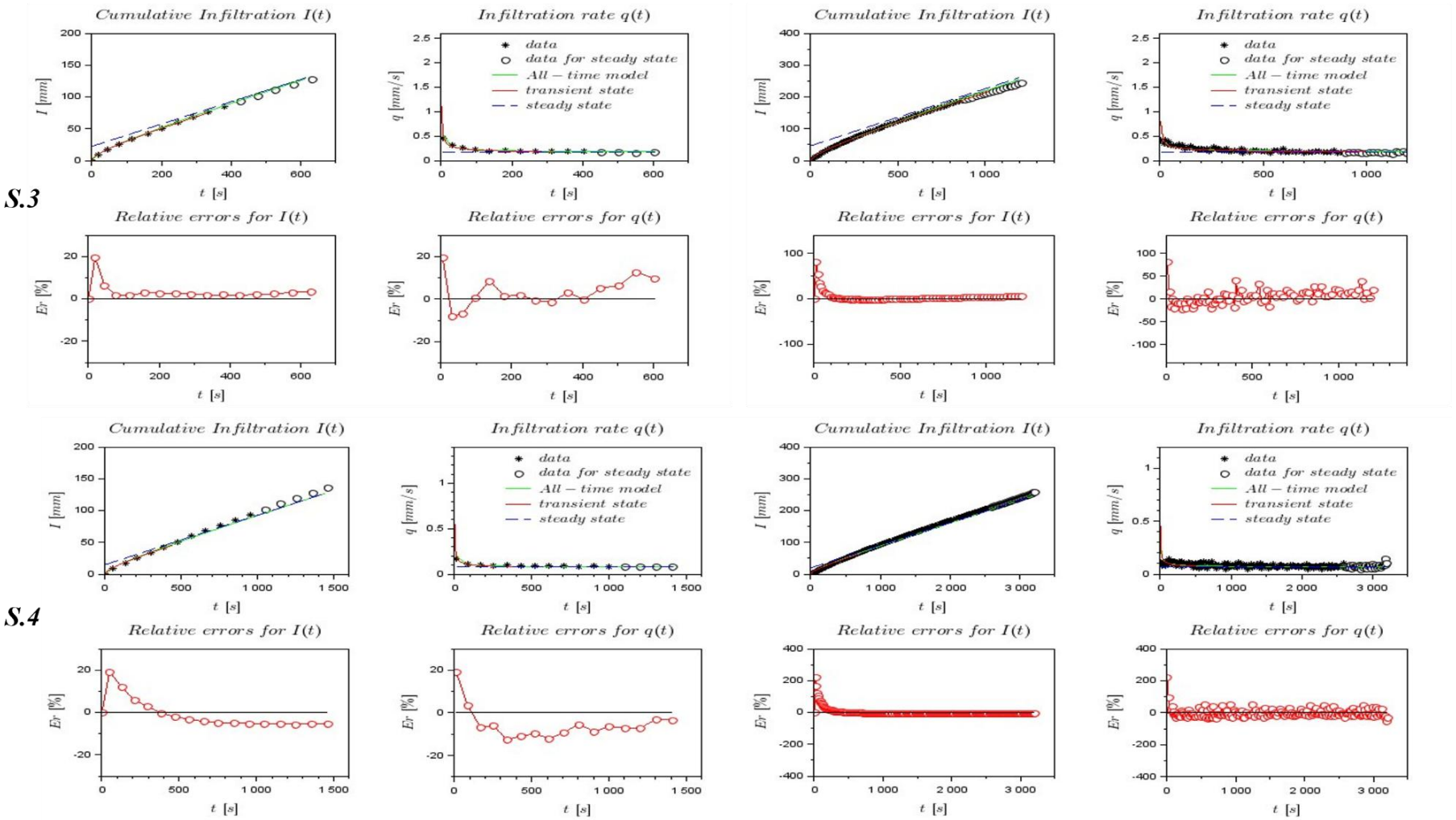


Figure IV-13. Résultats de BEST-Intercept pour un point de chaque site (S1, S2, S3 et S4) ; chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

Sur le site 2, l'algorithme s'adapte mieux avec de meilleurs ajustements pour les deux méthodes. La méthode classique reste bien ajustée (forme conforme, erreurs faibles), tandis que la méthode automatisée, bien que présentant plus de bruit que la classique pour le taux d'infiltration, présente des données alignées au modèle sur l'ensemble de l'essai, avec des erreurs relatives stables et peu de résidus systématiques. Sur le site 3, la qualité de l'ajustement devient très bonne pour les deux méthodes. Les données sont bien superposées au modèle vert ; les taux d'infiltration sont stables et les résidus faibles, avec une quasi-symétrie des erreurs entre B et AB. Cela reflète une bonne perméabilité de BEST-Intercept, quelles que soient les conditions opératoires. Sur le site 4, enfin, les courbes montrent également une forte cohérence entre les deux méthodes, bien que quelques fluctuations intermédiaires apparaissent avec la méthode AB, comme observé avec BEST-Slope. La phase initiale est parfaitement ajustée, mais des écarts modérés surgissent en cours de mesure, traduisant soit une variation progressive de la conductivité, soit une transition texturale localisée. Néanmoins, les erreurs relatives restent très faibles, confirmant la pertinence de l'algorithme BEST-Intercept pour ce type de sol.

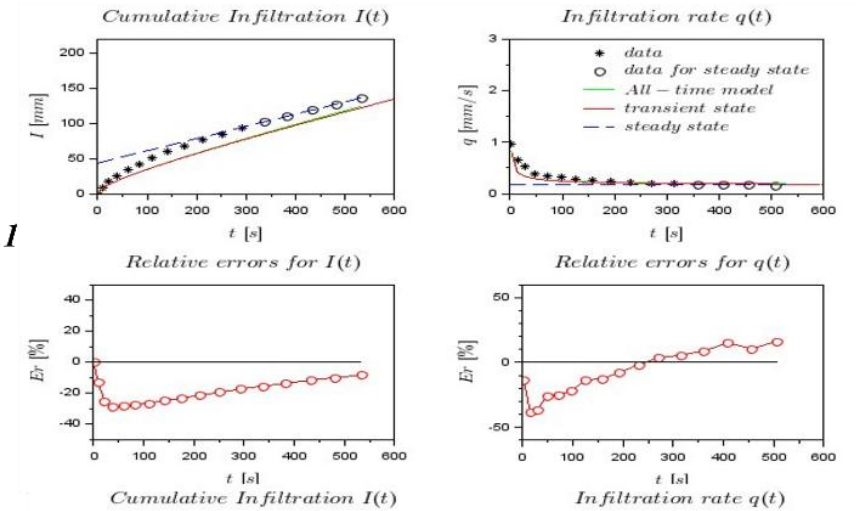
Pour l'ensemble des exemples illustrés, BEST-Intercept s'avère performant, notamment lorsque on obtient une stabilisation du flux en fin d'essai. L'automatisation, bien qu'occasionnant plus de bruit pour certains cas, notamment pour le taux d'infiltration donne aussi des ajustements corrects.

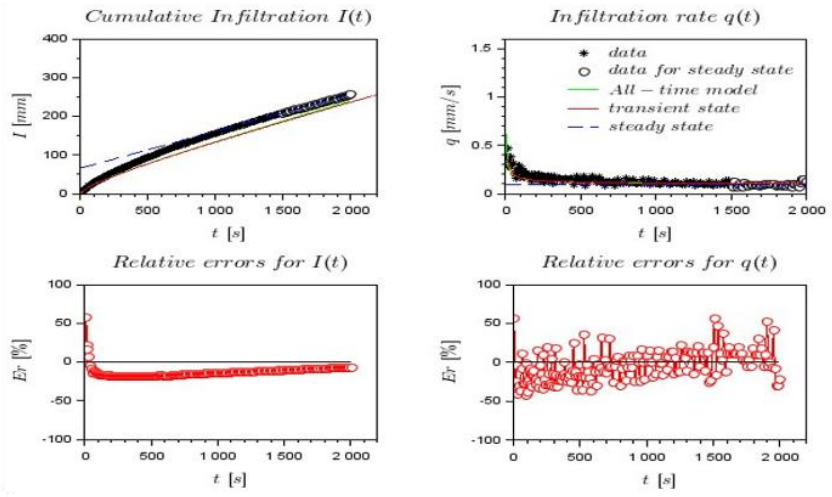
IV.1.5.1.3 BEST-Steady

L'algorithme BEST-Steady étant fondé sur l'ajustement du régime permanent d'infiltration, montre une performance globalement satisfaisante sur l'ensemble des sites étudiés. Toutefois, nous constatons des nuances importantes selon les sites considérés. Sur le site 1, caractérisé par une texture fine et une perméabilité réduite, les données expérimentales issues de la méthode classique (B) présentent un léger décalage vis-à-vis du modèle théorique, en particulier dans la phase intermédiaire. Ce phénomène s'amplifie avec la méthode automatisée (AB), où l'on observe une dispersion accrue des points expérimentaux autour du modèle, notamment pour le taux d'infiltration. Selon certains auteurs, cette observation suggère que le régime permanent, condition préalable à la validité de BEST-Steady, n'a peut-être pas été atteint (Bagarello et al. 2014a). À l'inverse, les sites S2 à S4, donnent lieu à de meilleurs ajustement, notamment pour les deux derniers sites S3 et S4. Dans ces cas, les courbes d'infiltration cumulée et de taux d'infiltration sont quasi parfaitement superposées au modèle, avec des erreurs relatives faibles (< 5 %). La régularité des résidus observés sur ces sites appuie également la qualité de l'ajustement, en particulier avec la méthode automatisée.

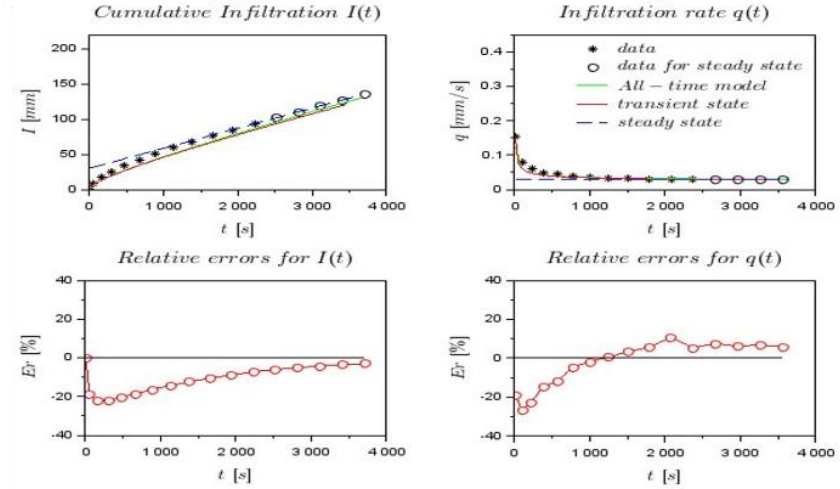
BEST-Steady (méthode classique) ***BEST-Steady (méthode automatisée)***

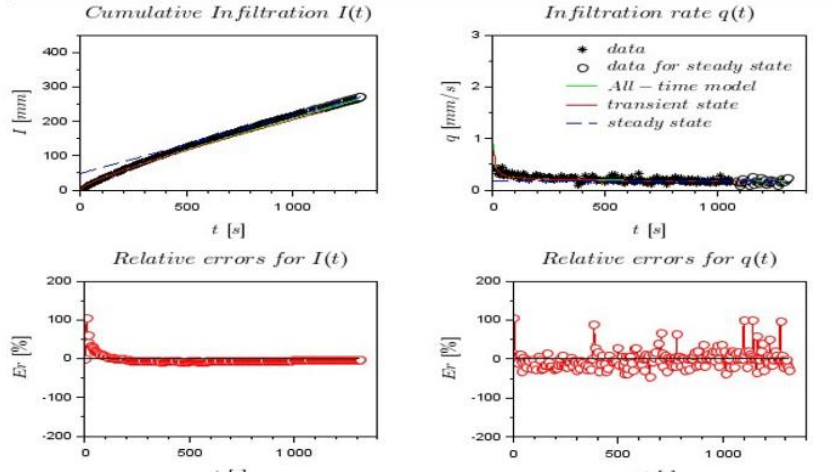
S.1





S.2





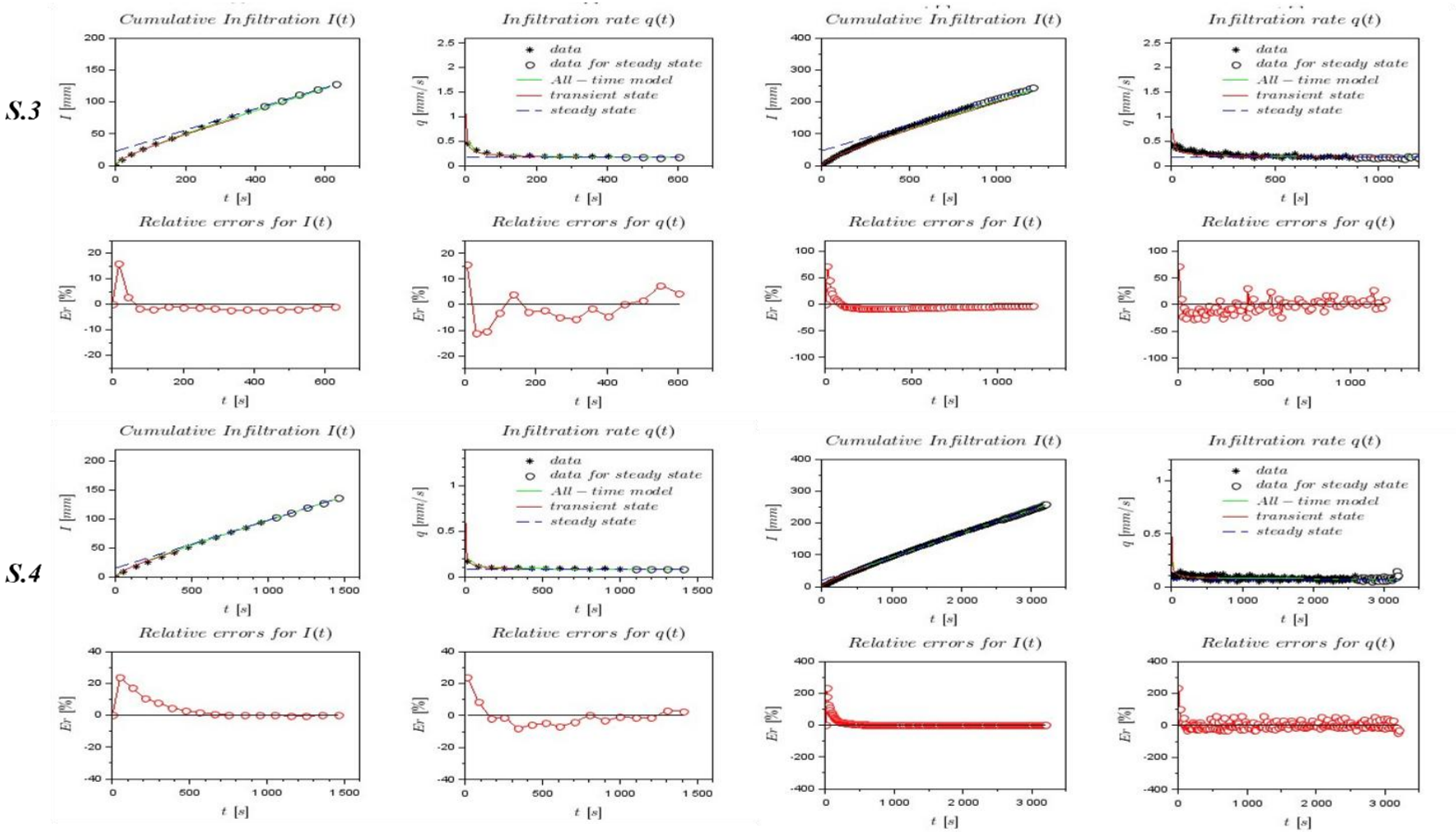


Figure IV-14. Résultats de BEST-Steady pour un point de chaque site (S1, S2, S3 et S4) ; chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

La fiabilité de l'algorithme BEST-Steady repose fondamentalement sur la vérification effective du régime permanent. Si cette condition est remplie, comme c'est le cas sur les sites S2 à S4 l'ajustement est excellent, pour les deux méthodes. En revanche, sur les sols à faible perméabilité (ex. : S1), il devient impératif d'interpréter les résultats avec prudence dans la mesure où le régime permanant requiert une attente trop longue et donc n'est pas forcément atteint. La combinaison d'un examen graphique rigoureux et de la vérification des résidus s'avère essentielle pour garantir la validité des paramètres estimés. L'analyse critique des valeurs doit aussi être effectuée. Ces constats confirment les recommandations formulées par Bagarello et al. (2014a), qui soulignent l'importance d'adapter les algorithmes de type BEST aux caractéristiques spécifiques des sols étudiés.

En conclusion pour les algorithmes classiques, l'analyse graphique des trois algorithmes BEST révèle une certaine correspondance entre les données issues des deux méthodes B et AB. Néanmoins, certaines différences entre les deux méthodes ont été rencontrées. Néanmoins, certains ajustements ont manqué de précision. Notamment pour l'infiltromètre automatisé, l'enregistrement d'un jeu de donné important avec des incréments en temps très courts se traduit par un bruit dans l'estimation du taux d'infiltration obtenu par dérivation des courbes cumulées. Ainsi, quelle que soit la méthode utilisée, la méthode AB se traduit par des oscillations autour du modèle avec des erreurs relatives importantes. Hormis ce résultat, les méthodes tour à tour proposent de meilleur ou de moins ajustements, sans conclusion claire. Enfin, dans certains cas, aucune des deux méthodes B ou AB ne convient, avec l'exemple illustratif de l'algorithme BEST-Steady pour les sites S1 et S2. (Figure IV.14).

Pour finir, Les exemples choisis dans cette section étaient interprétables avec les trois algorithmes BEST classiques du fait de leur concavité. Néanmoins, tous les sites présentent des courbes avec des formes complexes à modéliser avec les algorithmes classiques. Dans la partie suivante, nous montrons l'utilisation des algorithmes BEST-WR et BEST-WR3T dédiés aux courbes convexes typiques des infiltrations sur sols hydrophobes.

IV.1.5.2 Nouvelles variantes BEST-WR et BEST-WR3T

Suite avec certaines limites que présentent les trois premières variantes BEST, deux autres variantes ont été ajoutées question de répondre à aux limitations observées. En effet, dans certain cas, nous avons rencontré des sols présentant de l'hydrophobicité avec des courbes convexes, notamment tout au début des essais d'infiltration. Les ajustements avec les trois variantes BEST-Slope, BEST-Intercept et BEST-Steady n'ont pas été satisfaisant avec des ajustements uniquement linéaires et des valeurs douteuses pour les paramètres estimés. Avec ces deux variantes BEST-WR et BEST-WR3T, nous avons réussi à avoir une estimation plus rigoureuse et à mieux déterminer les paramètres BEST.

IV.1.5.2.1 BEST-WR

Les courbes présentées ici pour L'algorithme BEST- WR, présentent de très bonnes estimations qui sont différentes avec les trois autres variantes BEST. Nous avons présenté en effet les exemples qui proposaient une amélioration des ajustements. L'algorithme BEST-WR n'a pas toujours permis une amélioration des résultats, notamment pour les courbes concaves classiques. Nous avons trouvé des exemples de courbes convexes avec de bons ajustement par les versions BEST-Slope, BEST-Intercept et BEST-Steady avec des ajustements qui ne sont pas acceptables pour l'algorithme BEST-WR.

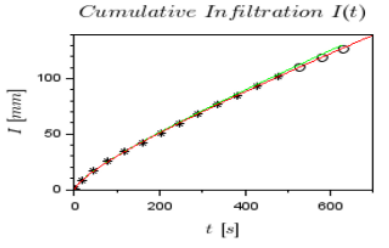
Les exemples sont assez représentatifs des 4 sites. Néanmoins, la convexité des courbes d'infiltration est nettement plus marquée sur les sites 3 et 4. L'hydrophobicité est aussi plus marquée pour la méthode B par rapport à la méthode AB. Donc, pour chaque cas d'infiltration convexe obtenue avec la méthode B on présente l'alter égo obtenu avec la méthode AB. Ainsi, cela permet de voir en même temps la capacité du modèle BEST-WR à ajuster les données et le changement de forme induit par la méthode AB versus B.

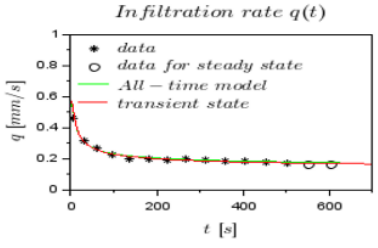
On note en premier lieu que le changement de méthode change drastiquement la forme de la courbe pour ces cas. Ainsi, hormis le premier cas (Figure IV.15, première ligne), les formes des autres courbes sont changées avec des courbes nettement moins convexes et même quasi concave lorsque l'infiltromètre automatisé est utilisé (Figure IV.15, toutes les lignes sauf la première). On passe ainsi d'une forme quasi linéaire avec une légère hydrophobicité à une courbe clairement concave (Figure IV.15, ligne 2). Pour les cas suivants, l'hydrophobicité est plus marquée, avec des courbes clairement convexes avec la méthode B. Pour autant, l'infiltromètre produit toujours des données concaves (avec des infiltrations plus rapide). On met ici en évidence le fait que l'augmentation du potentiel de pression imposé est plus important, sans jamais désaturer la surface, favorise factuellement l'infiltration. On s'attend donc à avoir aussi une influence sur les paramètres hydrodynamiques, ce qui sera discuté par la suite.

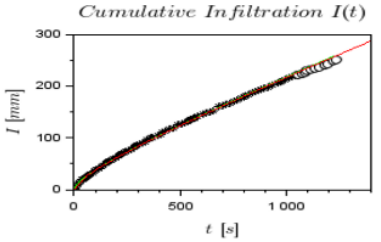
Concernant la qualité d'ajustement, on note que l'algorithme BEST-WR fonctionne pour ces cas. Il fonctionne bien mieux que les algorithmes classiques pour les courbes convexes (Figure IV.15, première colonne) avec des ajustements parfaits et des valeurs tout à fait plausibles. On note aussi que l'algorithme ajustement aussi correctement les courbes concaves sur les mêmes points Figure IV.15, première colonne. Néanmoins, certaines courbes ont produit un ajustement nettement moins bon sur les courbes concaves ou avec des valeurs non plausibles (valeur de K_s négative par exemple).

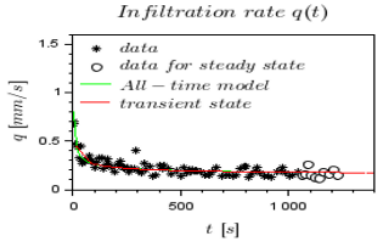
BEST-WR (méthode classique) **BEST-WR (méthode automatisée)**

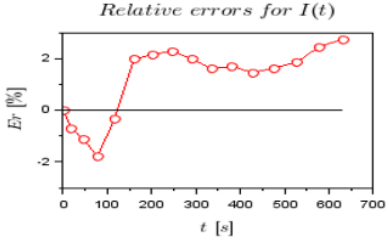
S.1

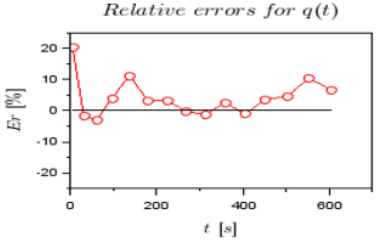


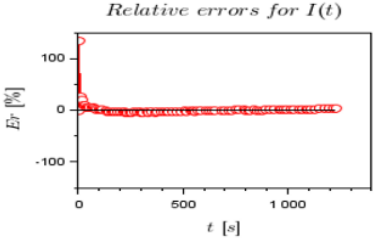


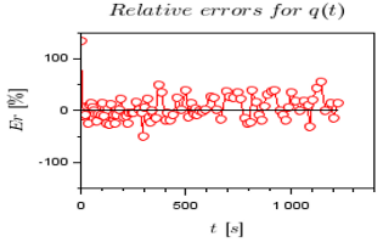




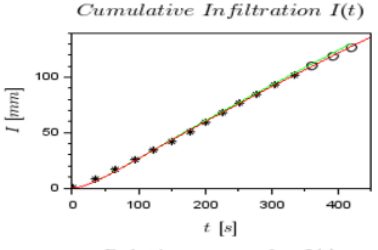


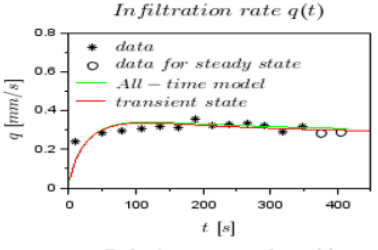


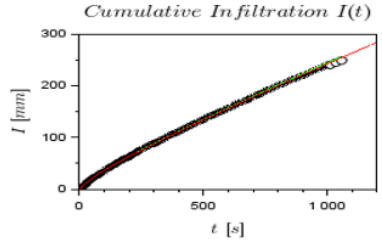


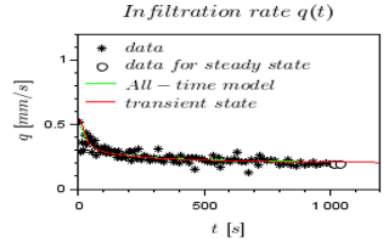


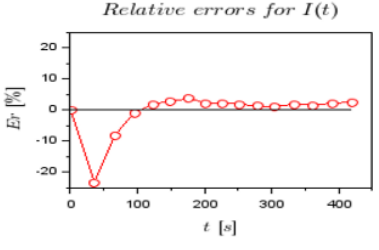
S.2

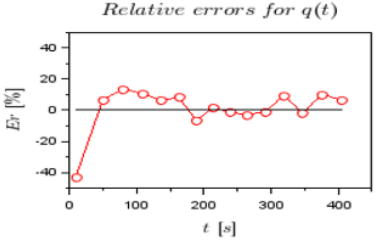


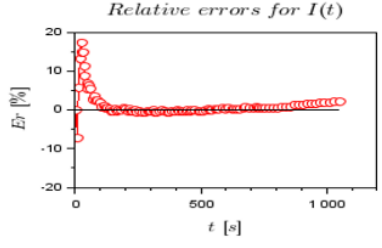


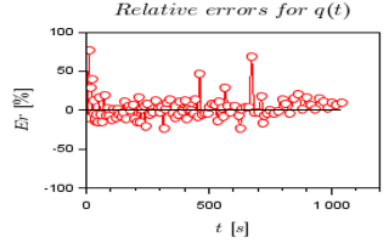












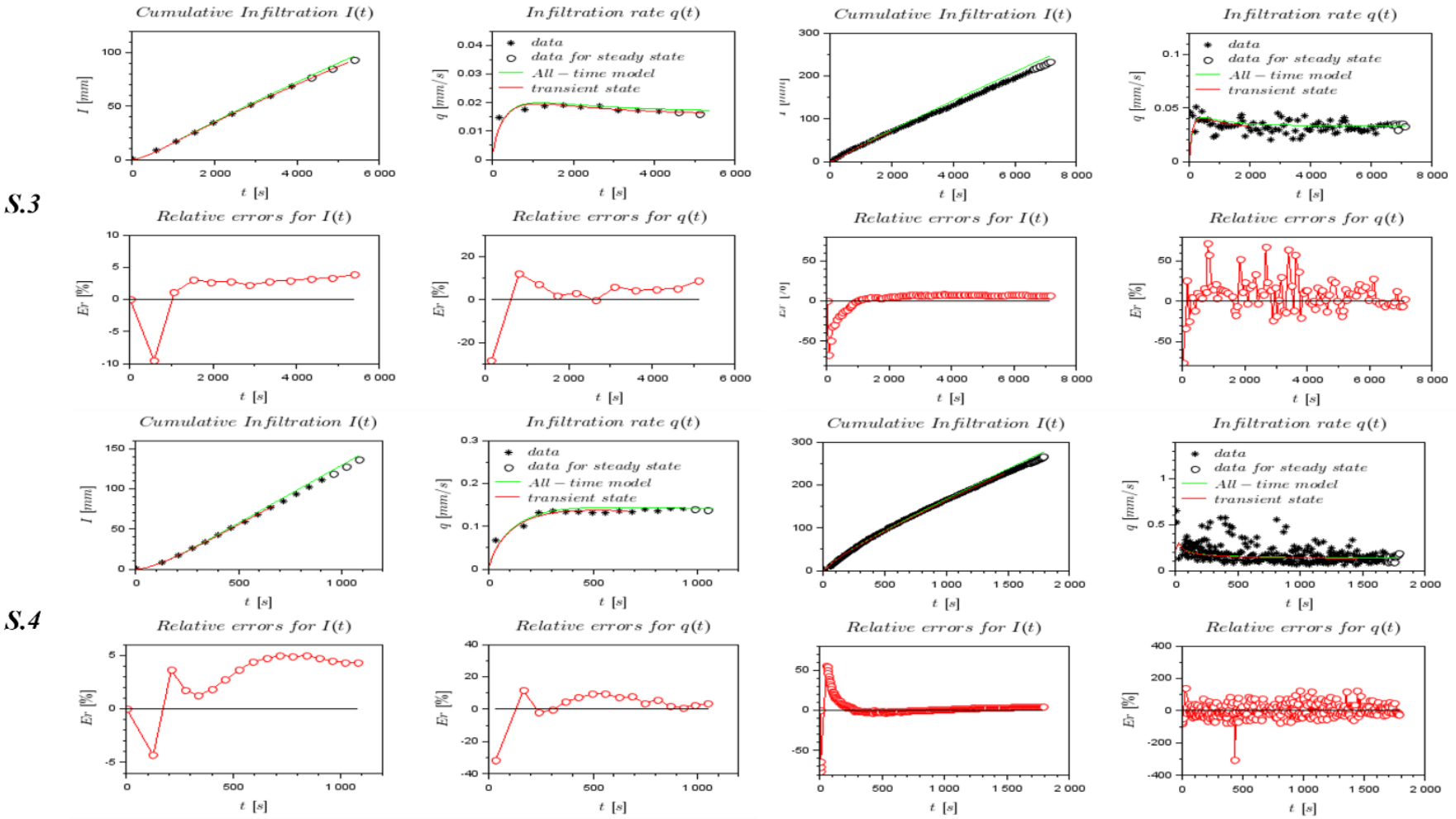


Figure IV-15. Résultats de BEST-WR pour un ensemble de points présentant des données convexes nécessitant l'utilisation des algorithmes BEST-WR. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

IV.1.5.2.2 BEST-WR-3T

Le dernier algorithme à être utilisé est BEST-WR3T. Comme pour l'algorithme précédent, on présente des cas de courbes concave, quasi-linéaires ou convexes. On associe aussi les données obtenues aux mêmes points avec les deux méthodes B et AB. On note comme précédemment que l'emploi de la méthode AB (infiltromètre automatisé) minimise l'hydrophobicité et favorise l'infiltration, ce qui pourrait s'expliquer par la condition d'application de l'eau (avec un potentiel de pression constant et plus élevé que pour la méthode Beerkan.

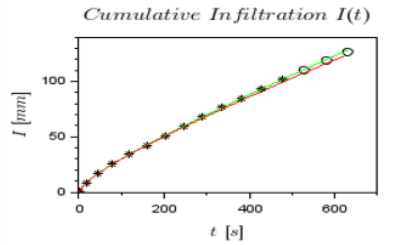
En termes de potentiel d'ajustement, la données BEST-WR3T produit de très bons ajustements dans les cas illustrés (Figure IV.16). On note tout de même de ajustements de moins bonne qualité (Figure IV.16, première ligne, méthode AB). Sinon, cet algorithme est tout aussi efficace et complète BEST-WR.

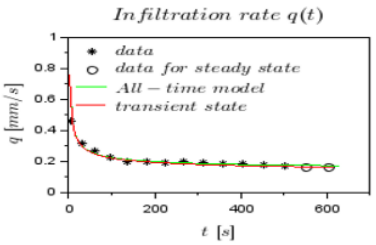
Il est important de noter que les algorithmes BEST-WR et BEST-WR3T ont vraiment permis d'améliorer les ajustements sur les données expérimentales, notamment pour les courbes convexes. On illustre ce point avec quelques illustrations, ci-dessous. L'exemple détaillé est celui du point P3 du transect T1 sur le site S3.

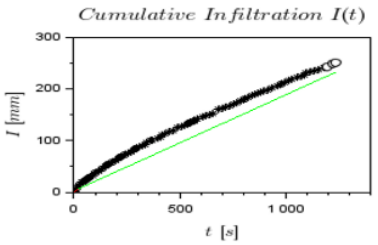
On note clairement que pour cette courbe convexe aucune modélisation proposée par les algorithmes classiques BEST-Slope, BEST-Intercept et BEST-Steady ne conviennent. Même en choisissant tous les points pour définir le régime permanent, astuce usuelle pour forcer les algorithmes à représenter une droite et à se rapprocher d'une forme moins concave, ne permet d'avoir un ajustement suffisant. En revanche, les modélisation BEST-WR et BEST-WR3T permettent d'aboutir à des ajustements corrects avec des valeurs de paramètres cohérentes. La discussion des valeurs s'effectuera au sein des sections suivantes.

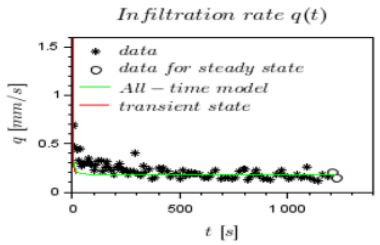
BEST-WR-3T (méthode classique) **BEST-WR-3T (méthode automatisée)**

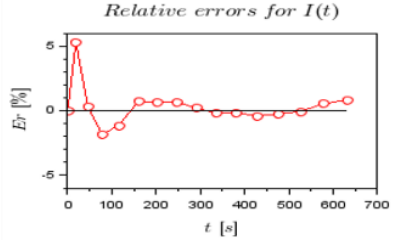
S.1

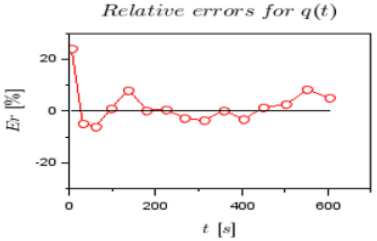


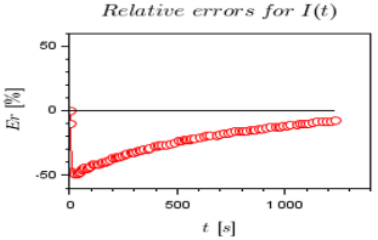


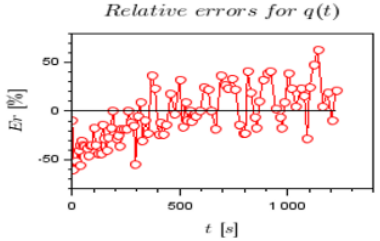




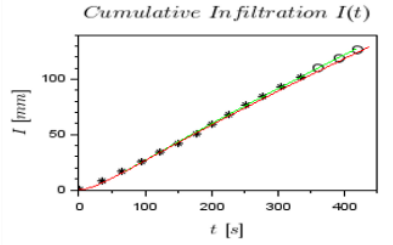


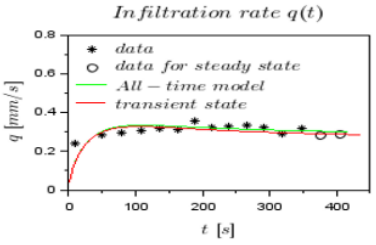


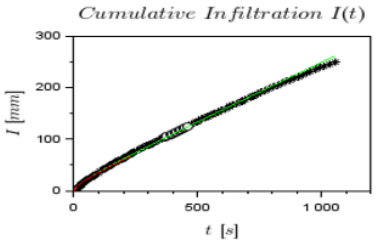


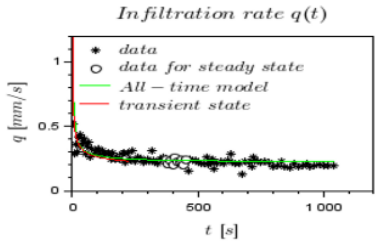


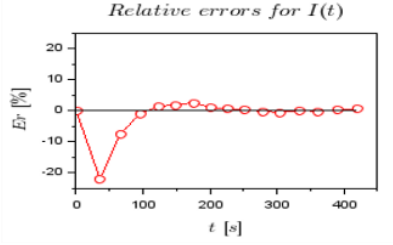
S.2

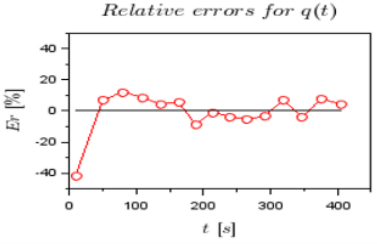


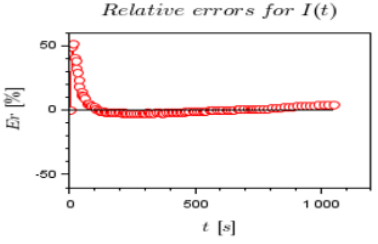


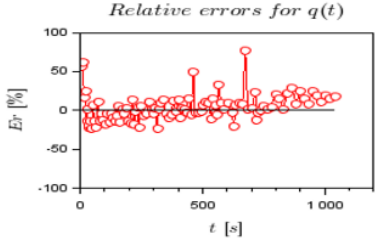












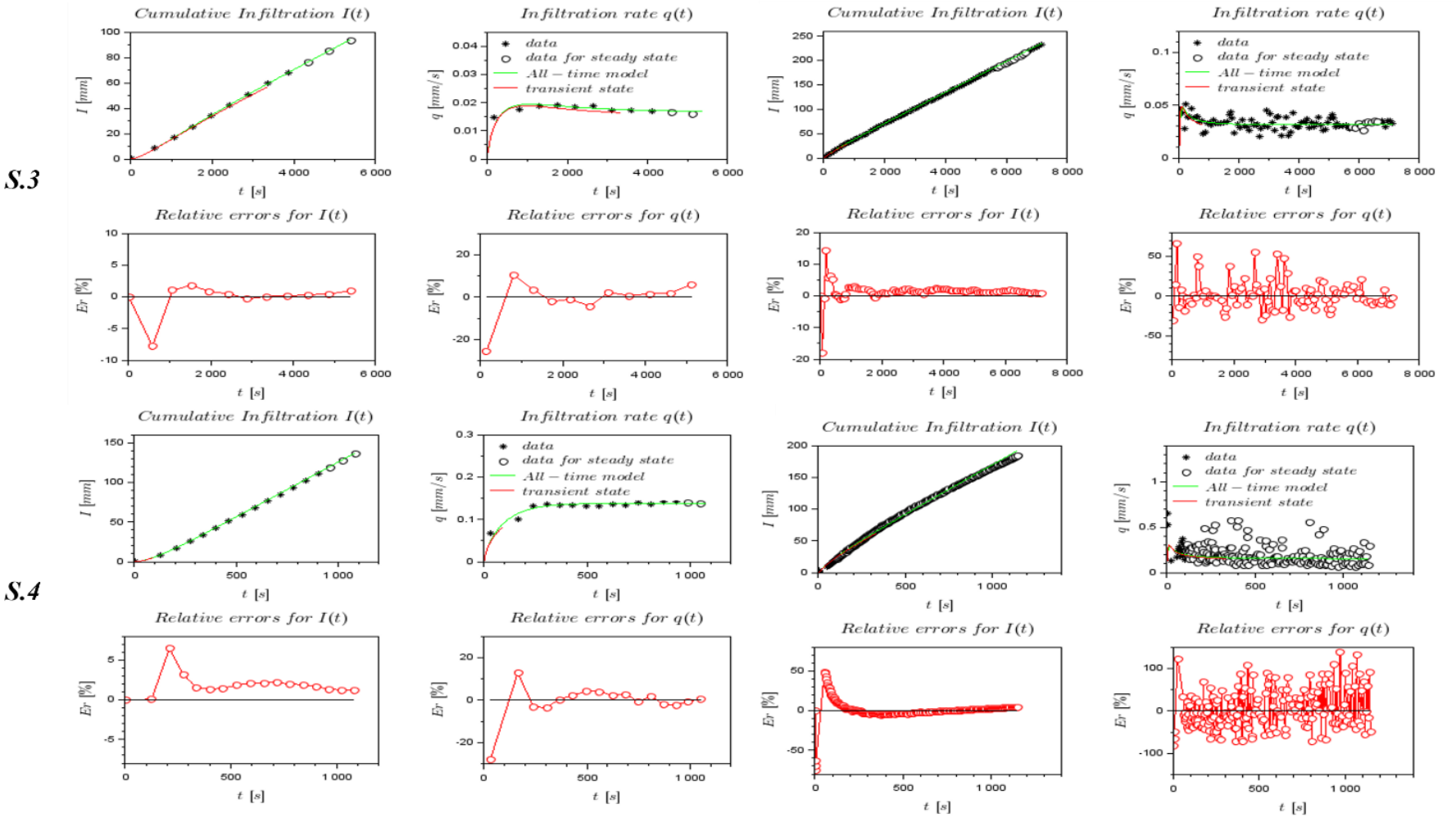


Figure IV-16. Résultats de BEST-WR3T pour un ensemble de points présentant des données convexes nécessitant l'utilisation des algorithmes BEST-WR. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

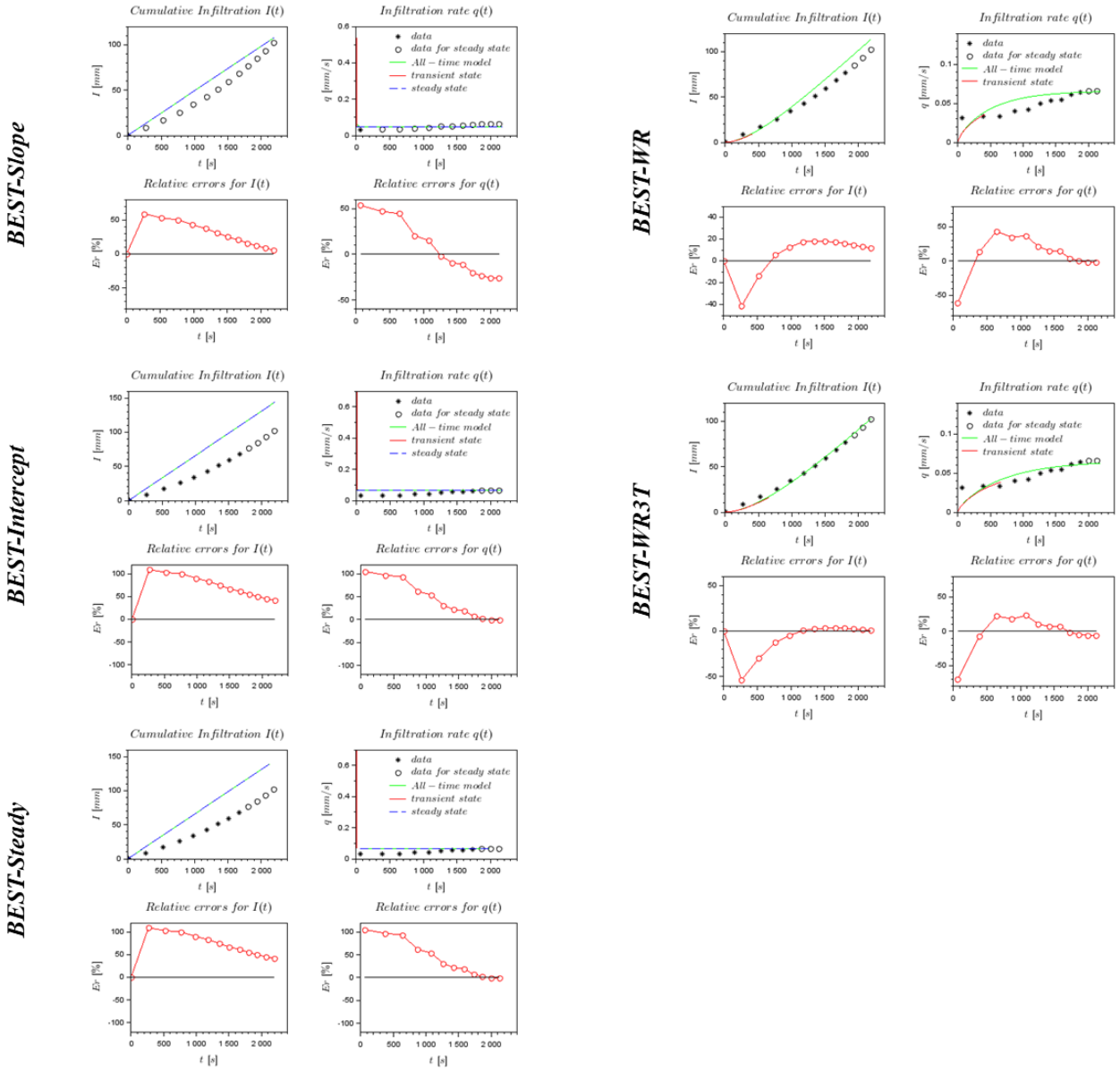


Figure IV-17. Résultats de toutes les méthodes BEST pour le cas du point 3 du transect T1 du site S3. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

IV.1.5.3 Etude des estimations BEST

La présentation des résultats des algorithmes BEST montre bien la dépendance des résultats vis-à-vis des versions utilisées à l'échelle ponctuelle, c'est-à-dire pour une donnée traitée. Il en est de même des estimations déduites par l'application des différentes versions. Nous avons donc analysé les jeux de paramètres estimer et caractériser l'écart d'estimation en fonction des versions utilisées. Nous rappelons que toutes les versions de l'algorithme BEST estiment de manière identique tous les paramètres de forme n et η ainsi que les paramètres d'échelle que sont les teneurs en eau résiduelle et à saturation, θ_r et θ_s. Les versions diffèrent uniquement de par l'estimation des deux paramètres d'échelle restant h_g et K_s.

Pour comparer les jeux de données entre eux, nous avons défini, dans un premier temps, les valeurs de référence pour les paramètres h_g et K_s pour toutes les données infiltrométriques. Pour cela, nous avons considéré uniquement les ajustements corrects donnant lieu à des valeurs plausibles avec un sens physique. Ainsi, les traitements donnant lieu à des valeurs positive de potentiel de pression (h_g>0) et négatives de conductivité hydraulique à saturation (K_s<0) ont été écartés. De telles configurations ont notamment été retrouvées pour l'application des algorithmes BEST-WR et BEST-WR3T. Ces valeurs de référence seront considérées pour la caractérisation hydrodynamique finale des différents sols avec les deux types de méthodes B et AB.

Une fois définie ces valeurs de références, toutes les estimations obtenues avec tous les algorithmes ont été tracés en fonction des valeurs de référence, pour déterminer l'écart entre chaque version et la valeur supposée des paramètres estimés (cible). En supplément, les régressions linéaires entre les estimations de toutes les versions et les données de référence ont été effectuées. Cette première étape permet de situer chaque version par rapport à la référence et donc, par comparaison, de comparer les versions entre elles. Pour compléter, nous avons réalisé une analyse de variance à deux facteurs, à savoir l'algorithme utilisé et les sites investigués pour déterminer l'effet « algorithme », l'effet « site » et enfin l'interaction « algorithme : site » qui permet de déterminer si l'effet algorithme dépend du site.

IV.1.5.3.1 Estimation de la conductivité hydraulique K_s

L'analyse portant sur la régression linéaire du paramètre K_s en tenant compte des différents algorithmes BEST permet de révéler les biais systématiques contrastés. Notamment, la comparaison avec la droite 1 : 1 permet de mettre en évidence les surestimations ou sous-estimations par les algorithmes investigués (Figure IV .18). Globalement, les points sont bien distribués autour de la droite 1 : 1 pour toutes les versions, sauf pour BEST-WR qui sous-estime les valeurs pour la majorité des points. On note aussi que certaines estimations de Ks sont négatives pour cette version, ainsi que pour BEST-WR3T. Les droites de régression présentent des ordonnées à l'origine quasi nulles et des pentes proche de 1 pour toutes les versions. Ainsi, toutes les droites de régression sont relativement proches de la droite 1 : 1. L'algorithme BEST-Slope est celui qui se situe le plus proche de la droite 1 : 1, attestant de la qualité de ses estimations. Enfin, pour toutes les versions, on note quelques points qui sont à contrario très éloigné des données de référence, attestant du fait que toutes les versions ont proposé pour certains cas des données incohérentes. Ainsi, l'utilisation de tous les algorithmes a permis d'avoir des estimations dans tous les cas et pour toutes les situations. Par exemple, les estimations proposées par BEST-Slope, Intercept et Steady pour les courbes convexes sont hors propos et nous nous sommes donc appuyés sur les estimations produites par les algorithmes BEST-WR et BEST-WR3T.

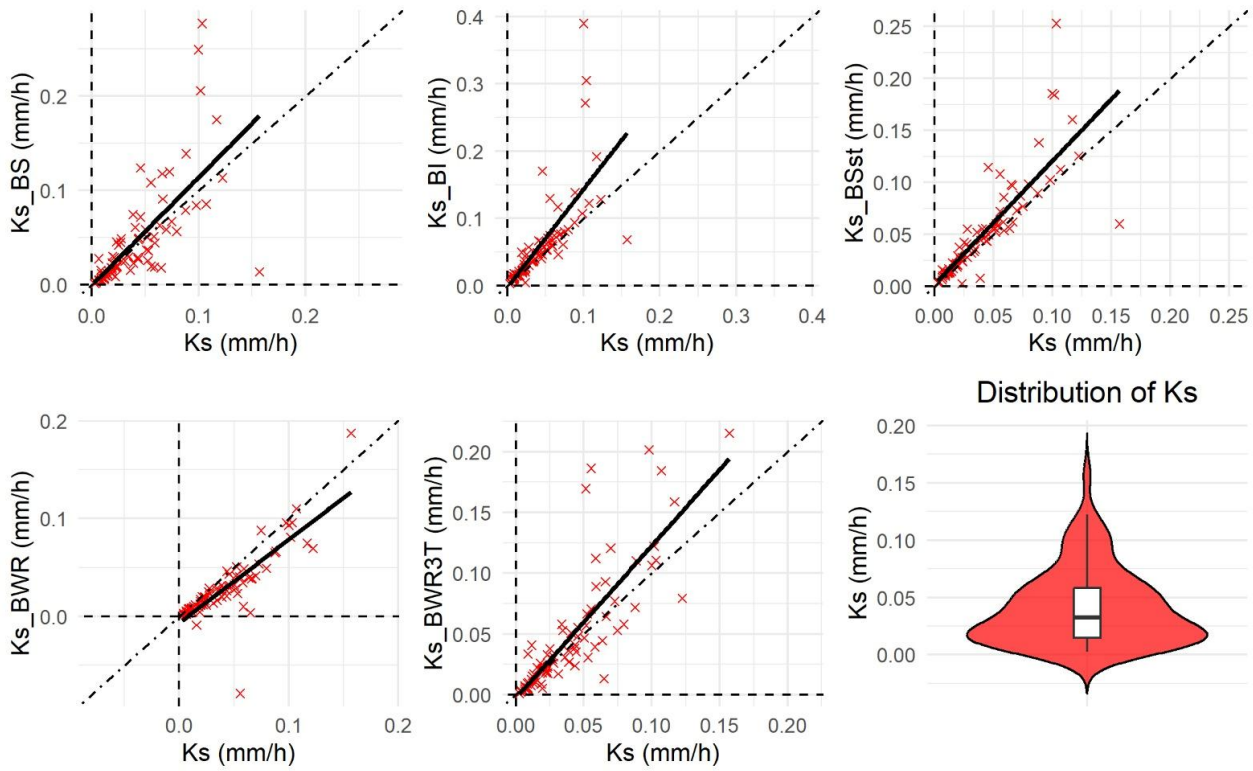


Figure IV-18. Valeurs de K_s obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence K_s.et droites de régression.

Nous avons ensuite procédé à une ANOVA pour caractériser l'effet de l'algorithme utilisé, du site et de l'interaction algorithme : site. Les résultats statistiques sont détaillés dans le tableau IV.5 et les données sont illustrées dans la Figure IV.18.

Tableau IV-4. Ordonnée à l'origine (b, mm/h) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre K_s. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro.

Ks_reg	b	a
_BS	-0.000858	**1.145**
BI	-0.002115	**1.459**
BSst	0.002163	**1.187**
BWR	-0.006493	**0.8495**
BWR3T	-0.002921	**1.255**

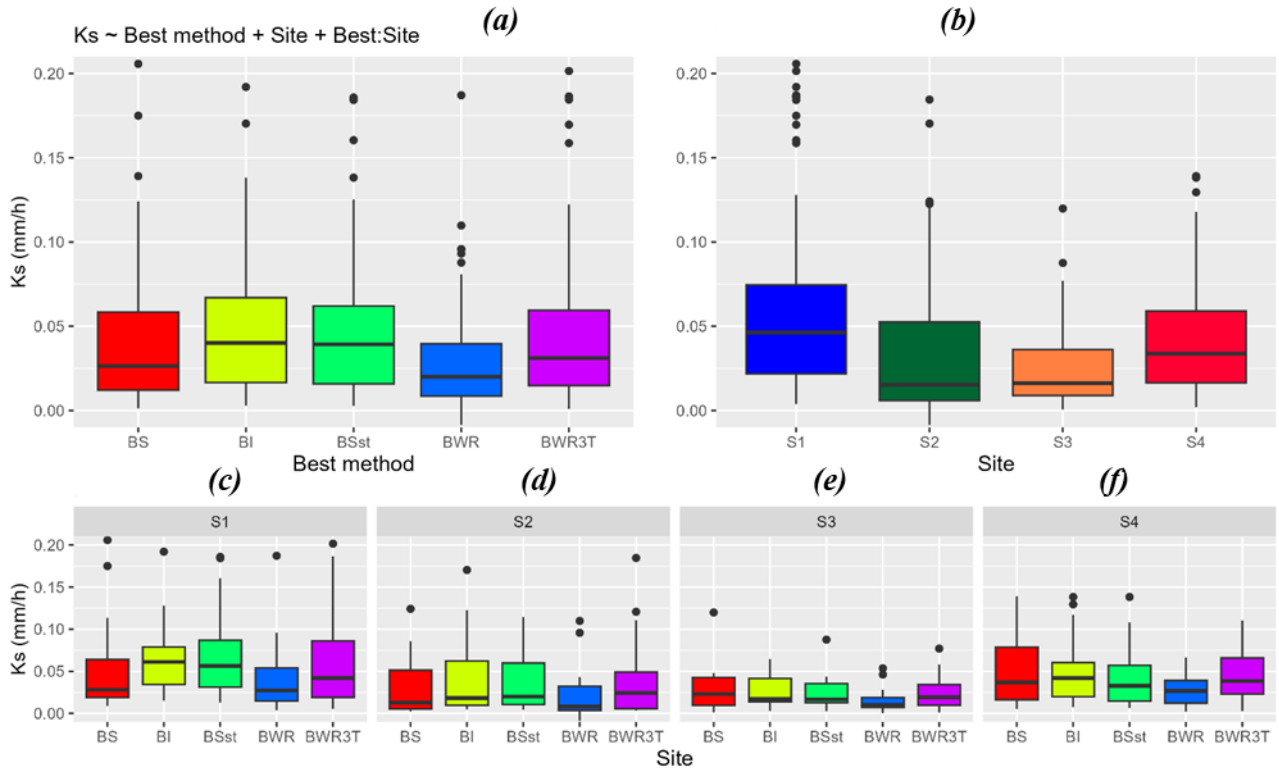


Figure IV-19. Valeursde Ks en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites).

L'ANOVA 2 fait état d'une valeur de probabilité critique bien inférieure à 0.05 pour les facteurs « algorithme » et « site ». En revanche, l'interaction « algorithme : site » ne semble pas être significative (Tableau IV.5). L'analyse de la figure IV.19 montre en effet que les valeurs de Ks varient avec l'algorithme, avec des valeurs supérieures pour BEST-Intercept et BEST-Steady par rapport à BEST-Slope. Les algorithmes BEST-WR et BEST-WR3T prennent des valeurs de même ordre de grandeur avec des valeurs supérieures pour BEST-WR3T. BEST-WR semble présenter globalement des valeurs comparables à BEST-Slope et BEST-WR3T des valeurs comparables aux algorithmes BEST-Intercept et BEST-Steady. L'effet site est clair aussi avec un site plus perméable S1, suivi de S4, puis S2 et S3. Ce point sera discuté ultérieurement (Cf section suivante). Concernant l'interaction algorithme : site, on voit bien en effet des tendances identiques sur tous les sites en termes de comparaison inter-algorithme, ce qui est cohérent avec les résultats statistiques (Tableau IV.5, interaction algorithme : site non significative).

Tableau IV-5. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour K_s en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

AOV2_Ks	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p-value
algorithme	4	0.03849	0.00962	3.817	0.00467
site	3	0.07082	0.02360	9.364	5.503E-06
algorithme:site	12	0.008520	0.000710	0.2815	0.9919
résidus	380	0.9579	0.002521		

IV.1.5.3.2 Estimation du paramètre h_g

L'analyse des régressions linéaires met en évidence biais systématiques contrastés (Figure IV.20). On a tracé ici -h_g pour simplifier la représentation. En effet, le paramètre h_g doit être négatif dans la mesure où la désaturation est obtenue pour une valeur négative de potentiel de pression. Néanmoins, les lectures graphiques sont facilitées pour des axes non inversés. Par ailleurs, l'emploi de la fonction valeur absolue aurait été erronée dans la mesure où certaines valeurs positives pour h_g, et donc négatives pour -h_g, doivent être clairement distinguées des valeurs cohérentes de signe négatif.

En analysant les algorithmes BEST-Intercept et Steady, on constate une sous-estimation significative, avec une majorité de points situés sous la droite 1 : 1. Les droites de régressions ont clairement des pentes inférieures à 1 (Tableau IV.6). La tendance inverse est trouvée pour la version BEST-Slope, avec une majorité de points situés au-dessus de la droite 1 : 1, indiquant une surestimation. La pente de la droite de régression est proche de 2 (Tableau IV.6). Les deux versions restantes, BEST-WR et BEST-WR3T ont des tendances opposées. La majorité des points sont au-dessus de la droite 1 : 1, révélant une surestimation pour BEST-WR, avec pente de la droite de régression proche de 2 alors que la majorité des points sont au-dessous de la droite 1 : 1 pour la version BEST-WR3T avec une pente bien inférieure à 1. Pour ces deux versions, on note aussi des valeurs très significativement positives pour hg (Figure IV.20), ce qui bien sûr n'a pas de cohérence physique.

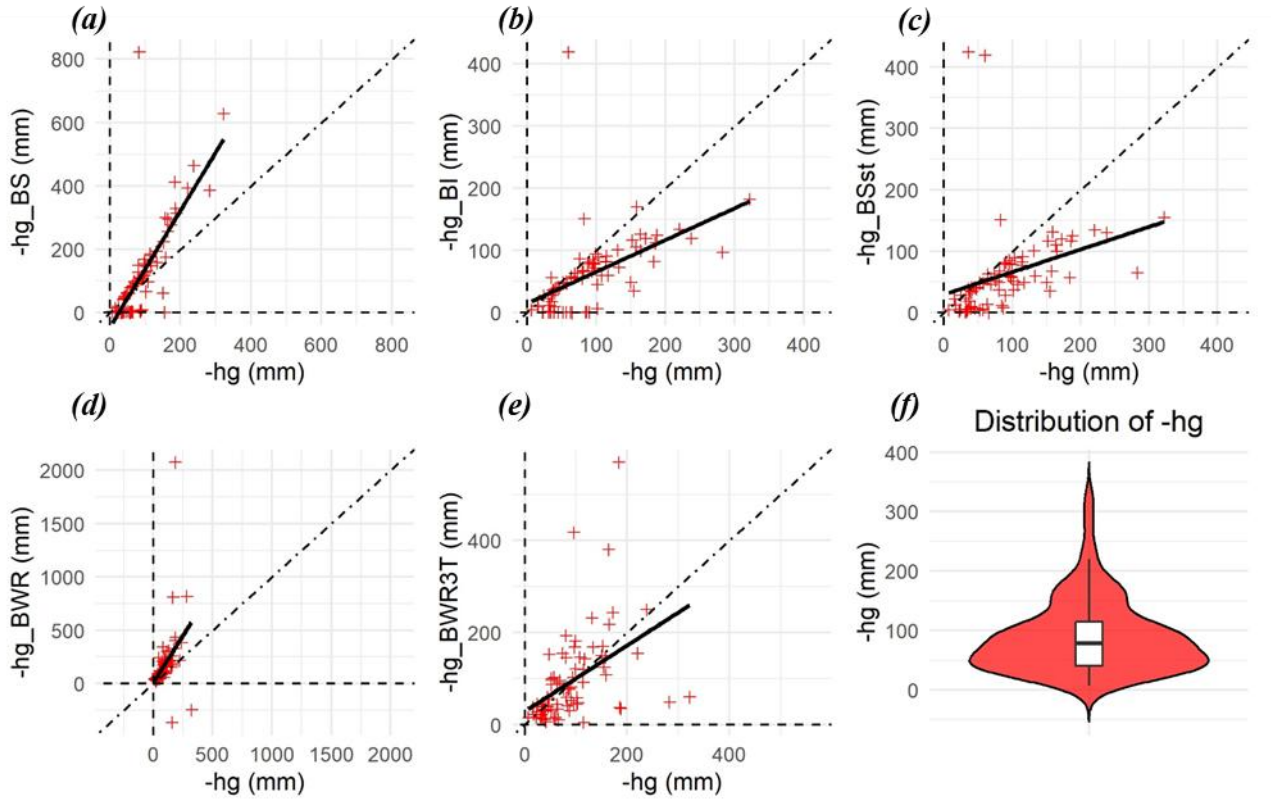


Figure IV-20. Valeursde h_g en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR, et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites).

Tableau IV-6. Ordonnée à l'origine (b, mm/h) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre h_g. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro.

hg_reg	b	a
BEST-Slope	**45.3**	**1.84**
BEST-Intercept	-14.9	**0.511**
BEST-Steady	**-29.9**	**0.367**
BEST-WR	-9.37	**1.759**
BEST-WR3T	-28.6	**0.718**

La Figure IV.21 illustre les valeurs de h_g regroupées par version, par site et enfin par version pour tous les sites. On voit bien des différences de valeurs en fonctions des divers algorithmes. La version BEST-Slope donne des valeurs supérieures (en valeur absolue) à la version BEST-Intercept et BEST-Steady. Pour les deux versions restantes, BEST-WR et BEST-WR3T, nous retrouvons l'alignement de BEST-WR sur BEST-Slope et de BEST-WR3T sur BEST-Intercept et BEST-Steady. Globalement, on note

une tendance opposée à celle observée pour les valeurs de K_s. Les versions qui donnent lieu au plus fortes valeurs absolues de h_g (ou de $-h_g$) donnent aussi lieu aux plus faibles valeurs de K_s. Cela s'entend dans la mesure où ces deux paramètres ont des effets qui se compensent quant au taux d'infiltration moyen, ou, autrement dit, quant à l'ordre de grandeur de l'infiltration cumulée. Une augmentation de K_s peut être compensée par une diminution de hg (en valeur absolue) et vice-versa. C'est plutôt la forme de la donnée infiltrométrique qui permet de distinguer les deux paramètres. Un couple (h_g, K_s) de valeurs plus faibles pour hg et plus importante pour Ks donnera lieu à une forme moins concave et plus linéaire. Ainsi, nous ne sommes pas surpris de voir cette relation entre tendance pour h_g et K_s.

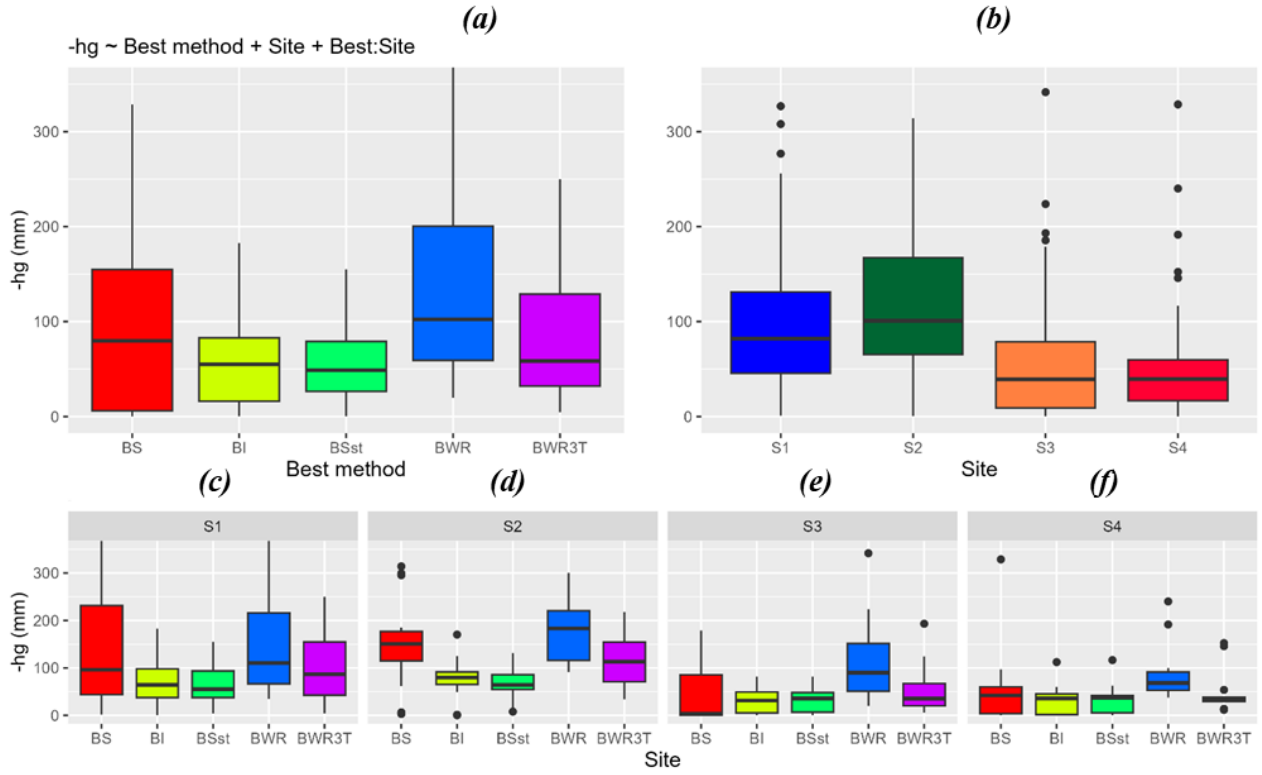


Figure IV-21. Valeursde h_g en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites).

L'ANOVA met aussi en évidence l'importance du facteur « site », ce qui est logique avec les résultats obtenus pour K_s. Enfin, le tracé des données h_g en fonction des versions séparément pour tous les sites fait apparaitre de fortes similitudes en termes de comparaison inter-algorithme. Toutes les données montrent la même structure que les données agrégées incluant tous les sites. Ce résultat est en total accord avec l'effet non significatif de l'interaction algorithme : site. Autrement dit, la différence inter-algorithme reste la même et inhérente aux différences algorithmiques.

Tableau IV-7. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour h_g en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

AOV2_Ks	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p-value
algorithme	4	623095	155774	7.216	1.310E-05
site	3	415449	138483	6.415	0.000301
algorithme :site	12	189737	15811	0.7324	0.720
résidus	380	8202678	21586		

IV.1.5.3.3 Analyse de la normalité des distributions de hg et Ks

Jusqu'ici nous avons réalisé des analyses de variance pour tester l'influence de tel ou tel facteur sur les différentes variables, notamment h_g et K_s. De même, la comparaison inter site a été effectué sur la base des statistiques (moyennes et écart-types). Néanmoins, cela requiert la normalité des distributions de ces paramètres. Dans ce qui suit, nous testons les hypothèses de normalité ou log-normalité de ces données. Pour cela, nous procédons à la représentation de la droite de henry ainsi que le test de Kolmogorov Smirnov. Ces tests sont réalisés pour les variables h_g et K_s en considérant les valeurs brutes ou les mêmes valeurs transformées en log.

La visualisation graphique de la droite de Henry permet de discerner rapidement les variables qui sont normales. On voit que, pour les deux variables h_g et K_s, les courbes reliant les quantiles expérimentaux aux quantiles théoriques ne s'alignent pas sur une droite, avec courbes clairement convexes. Les valeurs extrêmes (tant du côté des faibles que des fortes valeurs) s'écartent de la droite de Henry (Figure IV.22). On obtient exactement les mêmes résultats pour toutes les versions de BEST. A l'opposé, la fonction log permet d'aligner plus clairement les points sur des droites. On en conclut de visu que les distributions de hg et Ks seraient a priori log-normales et non normales.

L'absence de normalité est confirmée par les valeurs de probabilité critiques obtenues (Tableau IV.7). Toutes les valeurs sont inférieures à 0.05, exception faite des valeurs de référence qui ont des probabilité critique (p-value) proches mais supérieures à 0.05. Autant pour tous les algorithmes BEST on peut démontrer la non-normalité des distributions, autant pour les valeurs de référence finalement considérées, on ne peut conclure ainsi. L'analyse des p-values pour les données transformées par la fonction log démontre que les p-values sont toutes largement supérieures à 0.05 pour $\log_{10}(K_s)$. Pour $\log_{10}(-h_g)$, les p-values restent bien supérieures au seuil pour les algorithmes BST-WR et BEST-WR3T. En revanche, les p-values sont inférieures au seuil pour les algorithmes BEST-Slope, et surtout BEST-Intercept et BEST-Steady. Cela est cohérent avec un ajustement linéaire bien moins pour ces trois algorithmes (Figure IV.22).

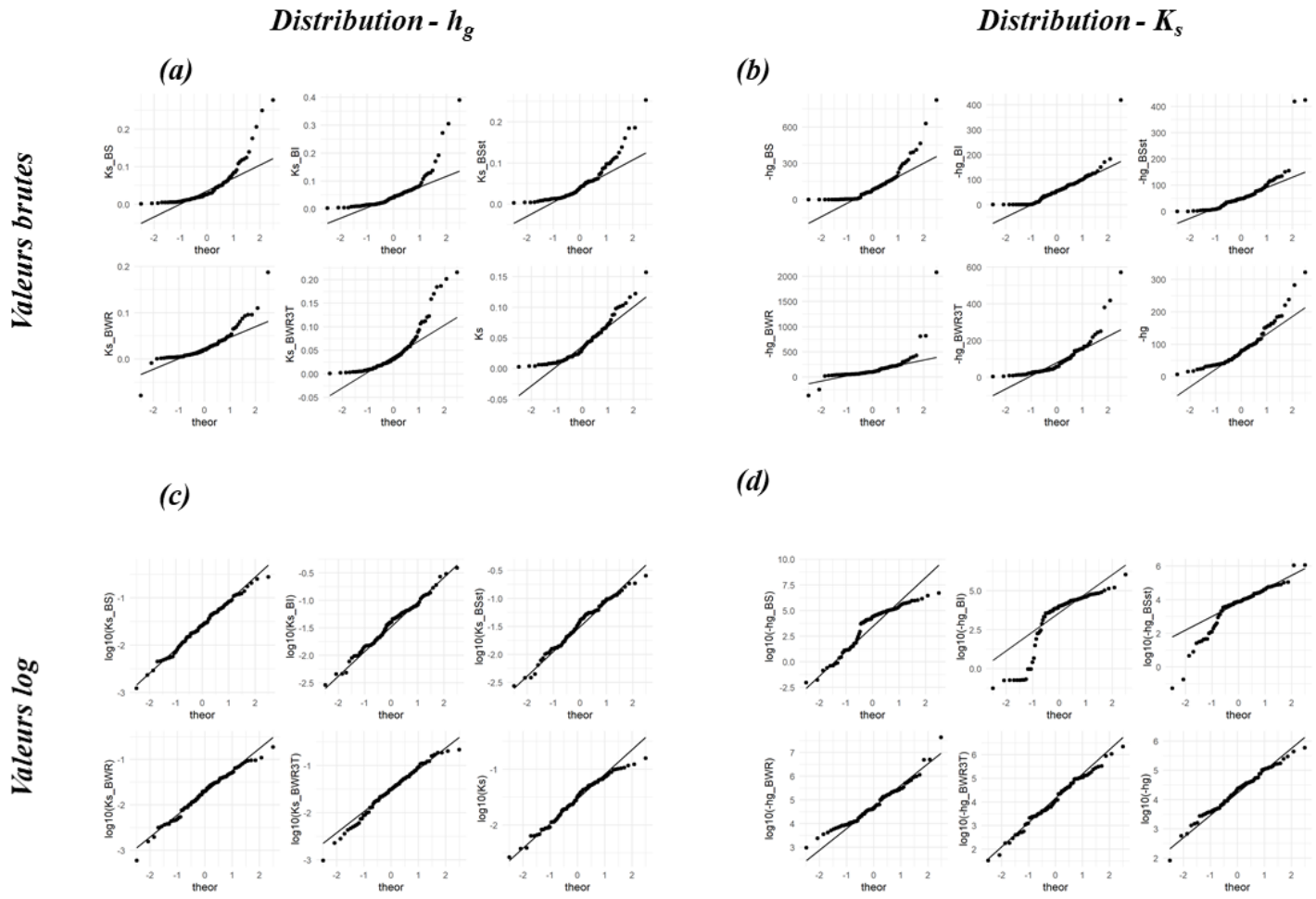


Figure IV-22. Droite de Henry et distributions des valeurs de hg et Ks, en version brute et log.

Tableau IV-8. Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov pour hg, log10(-hg), Ks et log10(Ks), p-value, pour toutes les versions ainsi que les valeurs concaténées servant de référence (val. De référence) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras.

Algorithme	h_g	$Log_{10}(-h_g)$	K_s	$Log_{10}(K_s)$
BEST_BS	**0,00130**	**0,002054**	**0,002549**	0,9425
BEST_BI	**0,03557**	**1,763E-05**	**0,001929**	0,6300
BEST_Sst	**0,007268**	**0,001184**	**0,01778**	0,5356
BEST_WR	**1,585E-05**	0,7193	**0,009923**	0,8364
BEST_WR3T	**0,01003**	0,8677	**0,007102**	0,8255
Val. de référence	0,1014	0,8209	0,06388	0,4145

IV.1.6 Analyse statistique des paramètres hydrodynamiques h_g et K_s

Le chapitre précédent a permis de comparer les différentes estimations obtenues avec les algorithmes BEST et de proposer des valeurs de référence pour la conductivité hydraulique à saturation K_s, et le paramètre de normalisation du potentiel de pression h_g. Ces valeurs sont obtenues par moyenne des versions BEST qui sont jugées satisfaisantes : (i) ajustement des données expérimentales corrects et (ii) des valeurs plausibles avec un sens physique. Dans l'application de l'algorithme BEST, on a démontré ci-dessus que les versions BEST-Slope, BEST-Intercept, BEST-Steady donnent des ajustements peu valides (ou peu précis) des données expérimentales, car ces méthodes modélisent toujours des courbes concaves, ou dans les cas extrêmes des courbes linéaires. Donc, pour les données convexes, nous avons considéré uniquement les valeurs de h_g et K_s obtenues par les versions BEST-WR et BEST-WR3T. Autre point, certaines versions ont donné lieu à des ajustements corrects mais avec des valeurs sans sens physique, et notamment des valeurs de h_g positives associé à des valeurs de K_s négatives. Ces jeux de données ont été écartés aussi. Ainsi, nous n'avons conservé que les données plausibles pour en faire la moyenne et donner des valeurs de confiance pour h_g et K_s. Nous rappelons que hormis h_g et K_s, les autres paramètres ne dépendent que des caractéristiques physiques basiques (granulométrie et porosité) et donc ne dépendent aucunement du dispositif utilisé ou de l'algorithme BEST employé.

L'objectif de cette section est d'analyser la variance des valeurs de h_g et K_s en fonction du type de méthode Beerkan (classique B versus automatisée AB) et du site, en prenant en compte aussi la dépendance de l'effet « méthode » vis-à-vis du site. L'ANOVA-2 est présentée pour K_s et h_g en termes de résultats statistiques (Tableau IV.8 et Tableau IV.9) et de représentations graphiques sous forme de boxplots permettant d'illustrer l'effet « méthode », l'effet « site », ainsi que leur interaction éventuelle

(Figures IV.23 et IV.24). L'interaction est illustrée en présentant l'effet site pour chacune des versions Beerkan, avec l'illustration de l'effet site obtenu avec la méthode B et le même effet avec la méthode AB (Figures IV.23 et IV.24, d-e).

La conductivité hydraulique à saturation (K_s) montre des variations significatives entre les différents sites étudiés (Figure IV.23b), avec une probabilité critique (p-value) bien inférieure à 0.05 (Tableau IV.8). En revanche, les valeurs de K_s ne dépendent ni l'effet méthode (Figure IV.23c) ni l'interaction méthode-site (Figure IV.23d-e), avec des probabilités critiques respectives de 0.4418 et de 0.3781. La non significativité de l'effet méthode semble évidente au vu de la proximité des médianes et de la dispersion des données autour (Figure IV.23c). Par ailleurs, en considérant la différence entre les deux méthodes, site par site, on note que les écarts restent faibles entre les deux méthodes sur tous les sites, excepté pour les sites 1 et 2 qui présentent des effets opposés (diminution versus augmentation de K_s par la méthode AB pour les sites S1 et S2). Cela suggère que, bien que K_s soit fortement dépendant des conditions pédologiques locales (effet site), le choix entre la méthode Beerkan manuel ou automatisé n'affecte pas de manière significative l'estimation de ce paramètre. Ces résultats confortent l'idée que les deux méthodes peuvent être utilisées de manière interchangeable pour l'estimation de K_s.

Concernant le paramètre h_g, l'effet « méthode » est significatif avec une probabilité critique de p-value = 0,0296 (Tableau IV.9), indiquant que le choix du dispositif influence l'estimation du paramètre h_g. On note que la méthode AB augmente significativement la valeur de hg (en valeur absolue) (Figure IV.24b), ce qui correspond aux formes des infiltrations cumulées obtenues, avec une concavité plus marquée. On retrouve aussi un effet « site » pour h_g, avec des valeurs contrastées entre les différents sites (Figure IV.24c). On peut noter que h_g suit une tendance opposée au paramètre K_s, avec de plus fortes valeurs pour les sites S2 et S3 et de plus faibles valeurs pour les sites S1 et S4, alors que K_s présente de plus fortes valeurs pour les sites S1 et S4 et des valeurs plus faibles pour les sites S2 et S3. Cette variation opposée des deux paramètres est courante et souligne une typologie de comportement hydrodynamique, avec d'une part des sols plus fins ayant une capillarité plus importante et une conductivité hydraulique à saturation plus faible et d'autre part des sols plus grossiers avec moins de capillarité et une conductivité hydraulique plus élevée (Angulo-Jaramillo et al., 2016). Enfin, l'interaction « méthode : site » présente une valeur de probabilité critique p très éloignée du seuil de significativité (p=0,6124). On note en effet que le classement des sites en termes de valeur de hg ne dépend pas de la méthode considérée (Figure IV.25d-e), suggérant que le choix de la méthode n'a pas d'impact sur le classement relatif des sols. Enfin, l'analyse de l'effet méthode par site (Figure IV.24a)

montre que l'effet méthode est relativement constant pour tous les sites, avec une augmentation de la valeur de hg sur tous les sites, excepté pour le site 4.

Ces observations se distinguent des résultats obtenus pour K_s et les taux d'infiltration, pour lesquels aucun effet significatif de la méthode n'a été détecté. L'ensemble de ces résultats confirme l'hypothèse selon laquelle, même si le dispositif n'affecte pas la quantité totale d'eau infiltrée, il peut modifier la dynamique d'infiltration, et notamment la forme des courbes influençant ainsi spécifiquement l'estimation du paramètre h_g. Le choix de la méthode est donc important dans un contexte de caractérisation hydrodynamique des sols.

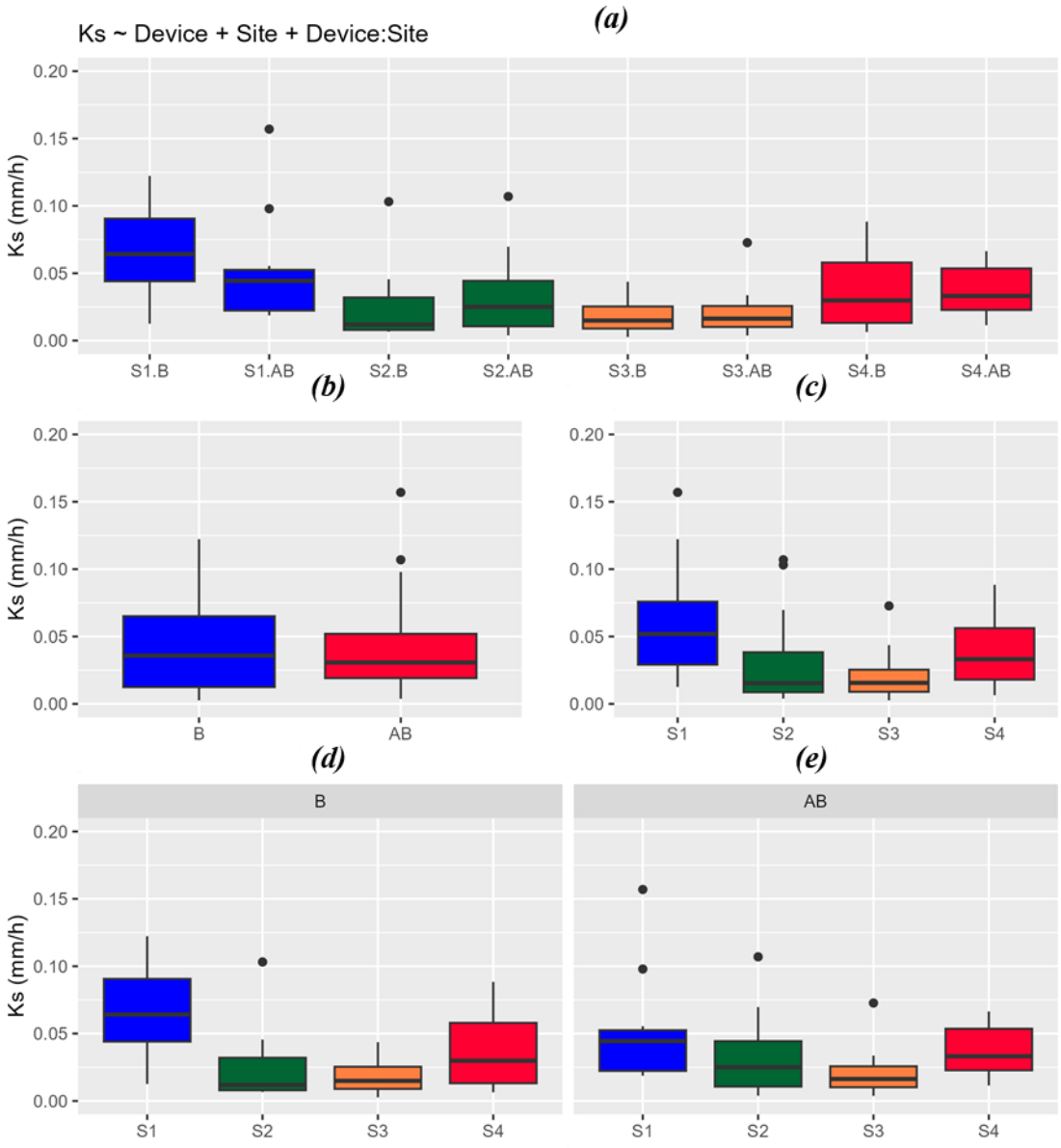


Figure IV-23. Boxplots des valeurs de K_s pour les différents facteurs, avec l'effet méthode (b), l'effet site (c), l'interaction méthode : site illustrant l'effet site lorsqu'on utilise la méthode Beerkan et ce même effet lorsqu'on utilise la méthode AB.

Tableau IV-9. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour K_s en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

AOV2-K_s	**Df**	**Sum Sq**	**Mean Sq**	**F value**	**p-value**
méthode	1	0.00054	0.00054	0.598	0.4418
Site	3	0.01736	0.00579	6.369	0.000687
méthode : site	3	0.00285	0.00095	1.045	0.3781
résidus	72	0.06541	0.00091		

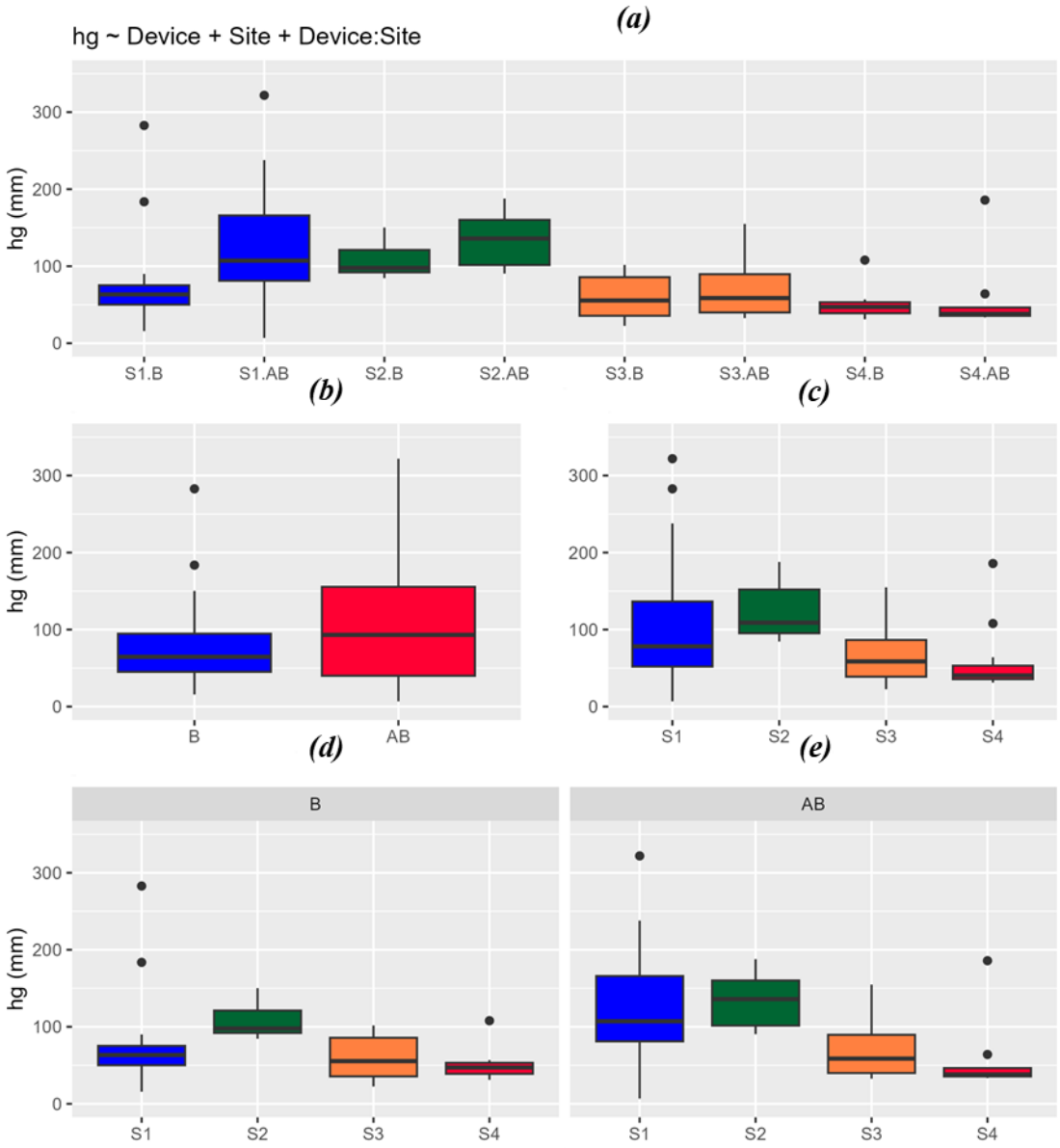


Figure IV-24. Boxplots des valeurs de h_g pour les différents facteurs, avec l'effet méthode (b), l'effet site (c), l'interaction méthode : site illustrant l'effet site lorsqu'on utilise la méthode Beerkan et ce même effet lorsqu'on utilise la méthode AB.

Tableau IV-10. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour h_g en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

AOV2-h_g	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p-value
méthode	1	15657	15657	4.93	0.0296
site	3	47990	15997	5.04	0.00317
méthode : site	3	5787	1929	0.61	0.6124
résidus	72	228701	3176		

Les résultats expérimentaux obtenus ici présentent clairement des tendances contrastées, avec dans certains cas une excellente adéquation entre les deux méthodes AB et B et dans d'autres cas des résultats significativement différents. Nous avons relié la disparité de ces résultats à la variabilité du sol et de ses propriétés ainsi qu'aux conditions d'infiltration (hydrophobicité versus infiltration normale). En effet, le site ENTPE présente des conditions diverses avec, notamment, une hydrophobicité marquée et une variabilité spatiale importante (variabilité inter-sites mais aussi intra-site). Autre point important : en voulant réaliser les deux essais exactement aux mêmes endroits, de sorte à pouvoir comparer deux à deux les données et produire les erreurs relatives (Figures IV.4, 6, 8 et 10), nous avons introduit un biais méthodologique, avec une potentielle influence d'un essai sur le suivant. Nous avons donc cherché à tester les deux méthodes sur un site avec beaucoup moins de variabilité spatiale. Une étude complémentaire a été donc conduite dans un sol sableux au Sénégal, en lien avec divers projets de caractérisation du site de Niakhar suivi depuis de nombreuses années sur les thématiques du changement climatique et de l'hydrologie. Par ailleurs, les méthodes Beerkan et Beerkan Automatisée ont été réalisées sur ce site des endroits bien proches (pour être considéré du même site) mais bien distincts.

IV.1.7 Comparaison des deux méthodes sur un sol sableux homogène (sites sénégalais)

Comme pour les résultats précédents, nous illustrons successivement les courbes d'infiltration cumulées obtenues et les traitements par l'algorithme BEST.

IV.1.7.1 Analyse des courbes d'infiltration

Ce site est caractérisé par un sol uniforme de texture homogène de type sable pur. Ce type de sol, dépourvu de fractions limoneuses ou argileuses significatives, offre une perméabilité élevée et relativement uniforme, réduisant ainsi la variabilité spatiale habituellement observée dans des sols hétérogènes et plus complexes. Dans ce contexte, nous présentons les courbes d'infiltration issues de la méthode Beerkan classique (en rouge) et celles de la méthode automatisée (en bleu). L'analyse repose, comme précédemment, sur la comparaison du flux infiltré pour un même volume d'eau et un même temps, permettant de juger la correspondance des courbes selon leur forme, leur ordre de grandeur ou une superposition totale, indiquant une parfaite similitude.

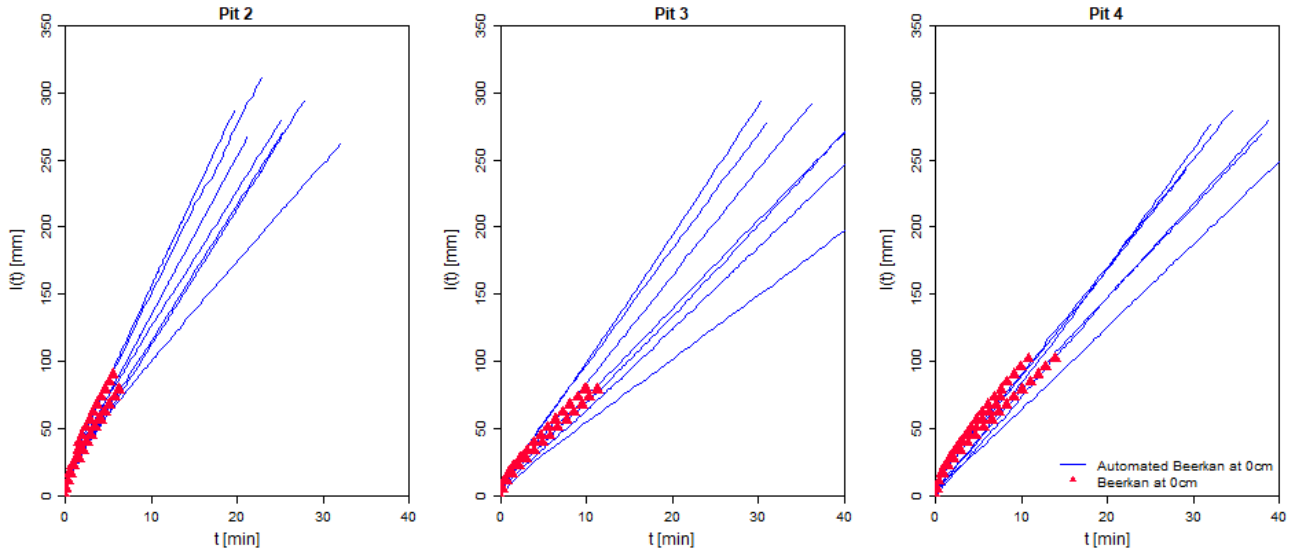


Figure IV-25. Superposition des données pour les deux types d'infiltration, données Beerkan (méthode B, points rouges) et données obtenues avec l'infiltromètre (méthode AB, lignes continues bleues), sites sénégalais

L'analyse des courbes d'infiltration sur le sol sableux sénégalais révèle un comportement hydrodynamique typique d'un milieu très perméable, avec des infiltrations rapides et régulières. Les trois sites échantillonnés (dénommés Pit 2, Pit 3 et Pit 4), présentent tous des résultats comparables, attestant de l'homogénéité du lieu à grande échelle. Comparativement aux résultats précédents, ces sites se caractérisent par une moindre dispersion des courbes, avec des faisceaux de courbes plus restreints, ainsi qu'une bien meilleure correspondance entre les méthodes classique et automatisée. Sur le site Pit 2, les courbes montrent une cohérence relativement bonne en début de mesure, avec un léger décalage de la méthode automatisée vers le bas. Pour le Pit 3, la méthode automatisée tend à surestimer les infiltrations et présente une dispersion des courbes plus importante. Mais cette surestimation reste cohérente dans le temps, suggérant un biais systématique possiblement lié à une microtopographie locale ou à une humidité initiale plus faible. En revanche, le Pit 4 on note une légère surestimation de la méthode manuelle. Néanmoins, les résultats sont très proches, avec une différence d'infiltration cumulée et une dispersion autour des courbes médianes nettement moindre par rapport au site ENTPE. Ainsi, contrairement aux sites hétérogènes où les différences de texture et de structure entre les points testés influencent fortement la dynamique d'infiltration, la régularité texturale du sable de ce site limite ici la variabilité spatiale et permet de tester l'adéquation des méthodes en conditions optimales. Ainsi, les résultats obtenus indiquent que, dans des contextes homogènes comme les sables purs, les deux méthodes B et AB correspondent et l'automatisation offre une représentation fiable et robuste du processus d'infiltration.

IV.1.7.2 Estimation des paramètres BEST

L'estimation des paramètres hydrodynamiques des courbes d'infiltration obtenues sur le site ont été traitées avec les algorithmes BEST. Les résultats graphiques suivants présentent, pour chaque méthode et pour chacune des variantes de l'algorithme BEST (Slope, Intercept, et Steady), l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) et de l'erreur relative Er (%). Les algorithmes BEST-WR et BEST-WR3T relatifs à l'hydrophobicité n'ont pas été utilisés, en raison de l'absence de courbes infiltrométriques convexes.

L'analyse comparative des résultats met en évidence une forte cohérence entre les deux méthodes en termes d'infiltration cumulée (Figure IV.26), mais aussi en termes d'analyse des données par l'algorithme BEST (Figure IV.27). Les courbes expérimentales $I(t)$ et $q(t)$ obtenues par les deux méthodes sont bien comparables et donnent lieu à des ajustements de bonne qualité avec les trois algorithmes BEST. Les courbes d'erreur relative $Er(\%)$ confirment cette observation par des niveaux très faibles et une stabilité remarquable tout au long des essais. L'adéquation des données aux algorithmes BEST proviennent de la forme des données infiltrométriques avec un régime transitoire bien défini, correspondant à la concavité de la courbe, suivi d'un régime permanent clairement établi, avec une partie linéaire. Ces formes sont en accord avec la physique usuelle de l'infiltration, avec un écoulement induit par la capillarité dans un premier temps avant que la gravité ne prenne le pas.

Les résultats n'ont pas eu le temps d'être traités. Néanmoins, étant donné l'homogénéité des courbes et l'alignement des données issues des deux méthodes manuelle et automatisée, on s'attend à une similarité des valeurs de paramètres hydrodynamiques.

L'homogénéité texturale du sol, caractéristique des sites sableux purs, ainsi que la proximité immédiate des points de mesure, expliquent la faible dispersion observée. Ces résultats démontrent l'adéquation de la méthode Beerkan automatisé et sa correspondance avec la méthode Beerkan manuelle dans des conditions de terrain homogènes, et confortent sa capacité à reproduire fidèlement les mesures de référence issues de la méthode classique, lorsque les conditions sont réunies.

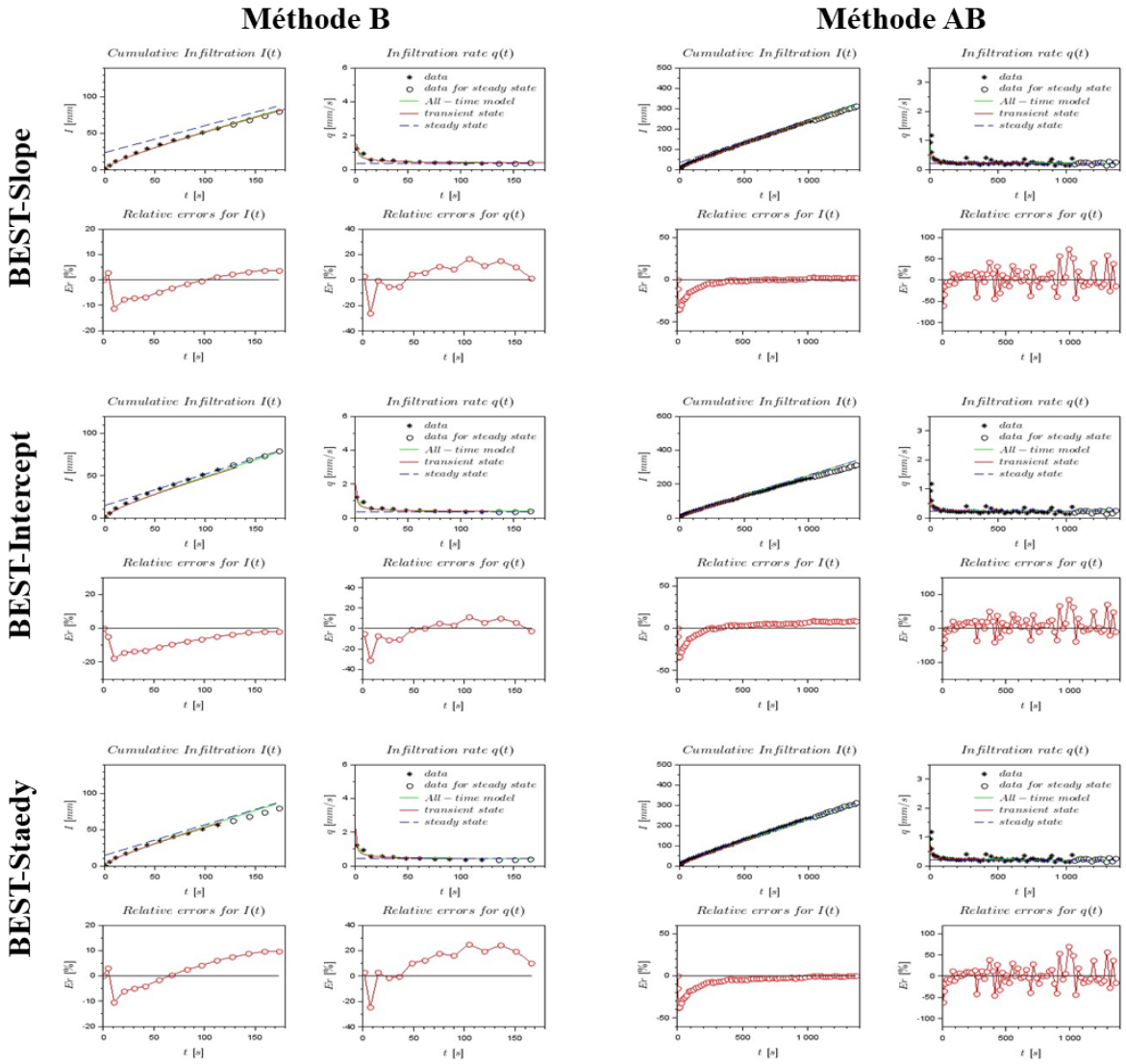


Figure IV-26. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST pour site sénégalais. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

IV.1.8 Synthèse et discussion – axe 1

Les résultats obtenus ont démontré que, dans certains cas (sol sableux homogène en texture et structure), les deux méthodes B et AB pouvaient donner lieu à des résultats comparables, avec des courbes d'infiltration cumulées très proches et des paramètres hydrodynamiques très proches. Dans ce cas, la méthode automatisée peut être considérée comme une bonne approche pour l'essai Beerkan, et peut donc être déployée en masse. C'est en effet l'un de ses principaux avantages, c'est-à-dire de facilité la multiplication des points de mesures.

Néanmoins, un certain nombre de disparités subsistent. Les résultats mettent en lumière des différences importantes entre les deux méthodes. Cette différence peut être reliée à la différence entre les deux méthodes. La méthode manuelle induit une variation progressive de la charge hydraulique appliquée

pendant l'infiltration de chaque volume d'eau. Pour un protocole classique, la charge peut varier d'un centimètre ou plus à zéro, alors que le dispositif utilisé pour la méthode AB permettra de garder constant la lame d'eau en surface. En supplément, dépendamment des opérateurs, certains opérateurs peuvent attendre une désaturation de la surface totale, induisant une désaturation en surface. Ce type de situation peut favoriser l'emprisonnement d'air dans le profil de sol entre deux volumes d'eau successifs et ainsi ralentir l'infiltration. L'introduction d'air dans le profil a été documenté par (Loizeau et al. 2017), ces auteurs ayant montré cet effet à l'échelle de bassin d'infiltration de recharge. À l'inverse, le dispositif automatisé maintient une charge hydraulique constante, assurant une meilleure stabilité de la pression appliquée au sol, et limitant ainsi les artefacts liés à l'intervention humaine. Cela pourrait expliquer les écarts ponctuellement observés sur les estimations de h_g, notamment sur les sites les plus hétérogènes (Sites 1 et 2).

Concernant, l'hydrophobicité, on s'attend logiquement à ce que la méthode AB, qui assure un potentiel de pression positive et constant, annihile l'hydrophobicité. Cela se voit effectivement sur les formes des courbes des infiltrations cumulées qui sont nettement moins convexes que les courbes obtenues par la méthode B. On voit bien l'effet direct de la méthode sur les conséquences de l'hydrophobicité. Néanmoins, cela ne se voit pas directement sur la valeur du paramètre h_g. On ne voit pas non plus pour les valeurs de K_s. En revanche, on s'attend à un effet sur l'hydrophobicité, α_{WR} (données non illustrées).

Globalement, la conductivité hydraulique à saturation (K_s) se montre moins sensible au choix de la méthode, tandis que le paramètre h_g, semble plus sensible à ce choix. Ces résultats confortent les observations de (Baqerkhani et al. 2025; Di Prima et al. 2021), qui ont montré que, bien que les mesures de flux soient peu affectées par les dispositifs d'infiltration, les paramètres liés à la courbe de rétention, plus sensibles aux conditions de pression, peuvent varier selon le protocole appliqué. En conclusion, les résultats obtenus sur les sites de l'ENTPE démontrent la grande robustesse de la méthode Beerkan pour estimer K_s quel que soit la méthode choisie. Si le choix du dispositif n'affecte pas significativement l'estimation de la conductivité hydraulique, une attention particulière doit être portée à l'estimation du paramètre h_g.

IV.2 Effet de la taille de l'anneau sur la caractérisation hydraulique des sols urbains

Parmi les dispositifs de mesure utilisés pour estimer les propriétés hydrodynamiques des sols, les infiltromètres à anneau simple sont largement utilisés. Cependant, ces essais sont souvent réalisés avec des tailles d'anneau de l'ordre de 10 à 20 cm de diamètre (Angulo-Jaramillo et al. 2016, 2019). Or, l'influence de la taille de l'anneau d'infiltration sur la représentation des flux hydrauliques, en particulier ceux liés à l'activation des macropores, reste peu explorée. Les premiers résultats obtenus (Ce questionnement a) ont déjà fait l'objet d'une première communication dans le cadre du congrès EGU 2023 par Saint-Martin (Saint-Louis et al. 2023), à partir d'essais d'infiltration réalisés à l'aide d'anneaux de deux rayons contrastés (7,5 cm et 25 cm). Ces essais font d'ailleurs partie des résultats présentés ci-dessous.

Le présent axe s'inscrit aussi dans la continuité de la thèse de Gersende Fernandes (2023), qui portait sur la mise au point d'un prototype d'infiltromètre pour l'évaluation des fonctions d'infiltration et de filtration des sols urbains. Cette thèse a intégré une caractérisation géophysique des sols par géoradar et nanoparticules, et a mobilisé de nombreux essais de terrain, réalisés grâce à la contribution de plusieurs chercheurs, dont l'auteur du présent travail. Les données produites dans ce cadre ont été ici réexploitées pour analyser l'impact de la taille de l'anneau d'infiltration sur l'activation hydraulique des sols et l'estimation des paramètres hydrodynamiques par l'algorithme BEST (Angulo-Jaramillo et al. 2019). Contrairement à la thèse de G. Fernandes, centrée sur la problématique du transfert de polluants, cette analyse met l'accent sur la représentation fonctionnelle des flux hydrauliques, en lien avec la taille de l'anneau et donc la surface de sol échantillonnée. Elle propose également un éclairage complémentaire sur la robustesse des mesures infiltrométriques avec les méthodes Beerkan classique et Beerkan Automatisée. En effet, les données infiltrométriques sont avec l'infiltromètre automatisé selon la méthode Beerkan automatisé pour les petits anneaux (7,5 cm de rayon). On utilise donc les dispositifs étudiés dans l'axe 1 et comparés à la méthode classique. Pour les anneaux de grande taille (25 cm de diamètre), on utilise le prototype développé dans la thèse de Gersende Fernandes (2023), qui s'apparente au dispositif automatisé en termes de contrôle de la hauteur d'eau imposée en surface du sol.

Ce travail vise ainsi à documenter les effets d'échelle en infiltrométrie (par le biais de la taille de l'anneau) et à proposer des pistes d'optimisation des protocoles expérimentaux en contexte urbain hétérogène.

IV.2.1 Approche méthodologique et cadre expérimental

L'approche développée repose sur une série d'expérimentations d'infiltration menées avec deux tailles d'anneaux contrastées : un anneau de petit rayon (7,5 cm) et un anneau de grand rayon (25 cm). Ces

tests ont été réalisés sur des sites urbains caractérisés antérieurement dans le cadre de la thèse de (Fernandes 2023), incluant des mesures in situ (densité apparente, texture, humidité initiale) et des caractérisations géophysiques.

Afin d'assurer la comparabilité des résultats, tous les essais ont été menés avec un volume d'eau équivalent, correspondant à une infiltration cumulée de 300 mm, ce qui permet une sollicitation suffisante des profils de sol. L'objectif de ce protocole est double : (i) analyser l'effet d'échelle lié à la taille de l'anneau sur les courbes d'infiltration et (ii) évaluer l'impact de cet effet sur les paramètres hydrodynamiques dérivés via les approches BEST, notamment la conductivité à saturation (K_s), et le paramètre d'échelle (h_g), connus pour leur sensibilité aux flux préférentiels. En toute théorie, si les infiltrations sont concordantes, des estimations identiques devraient être trouvées, étant donné que ces deux paramètres sont intrinsèques et ne dépendent bien évidemment pas de la taille de l'anneau. En effet, les différentes versions de l'algorithme BEST prennent en compte l'effet de la taille de l'anneau dans les modélisations inverses et les estimations des paramètres hydrodynamiques. Les infiltrations cumulées ont donc été traitées à l'aide des différents algorithmes incluant BEST-Slope, BEST-Intercept, BEST-Steady, BEST-WR et BEST-WR3T.

L'analyse des résultats expérimentaux porte sur la comparaison des dynamiques d'infiltration entre les deux dispositifs, afin d'identifier dans quelle mesure la taille de l'anneau influence la sollicitation hydraulique du sol et procède à l'activation effective de son réseau de pores, incluant la macroporosité. L'hypothèse centrale est qu'un anneau de plus grand rayon permet une meilleure intégration des hétérogénéités du sol et aura propension à activer la porosité du sol dans son ensemble. A contrario, selon son positionnement, l'anneau de taille classique pourrait « rater » un certain type de macroporosité (réseau de macropores de taille plus importantes mais moins dense que la méso-porosité). En première instance, on s'attend donc à avoir une réponse plus variable avec les anneaux de petites tailles, certains étant positionnés directement au-dessus de la macroporosité, et d'autres exclusivement au-dessus de la matrice. On s'attend à avoir une réponse plus intégrée et donc moins variable de la version « grand anneau ».

Les sections suivantes présentent les courbes d'infiltration, le taux d'infiltration et les résultats des ajustements BEST pour les deux tailles d'anneaux, ainsi qu'une analyse critique de leur cohérence physique, de leur robustesse méthodologique.

IV.2.2 Caractérisation physique des sites

Les différents sites sont présentés dans la section « matériel et méthodes ». Pour rappel, les deux premiers sites sont sur le campus de l'ENTPE au niveau des sites S1 et S2 présentés précédemment dans l'axe 1. Le troisième site correspond à un parking drainant étudié sur le campus de la Doua. Les infiltromètres ont été positionné au-dessus de la tranchée destinée à recueillir les eaux de ruissellements sur les places de parking. Enfin, le dernier site S4 correspond aux berges du bassin d'infiltration de la Doua, bassin destiné à infiltré les eaux pluviales ruisselées sur les routes du campus. Les études granulométriques ont été menées et ont permis de caractériser les sites en granulométrie et texture. Les données granulométriques et mesures physiques des deux sites sont comparables aux données présentées dans l'axe 1. Néanmoins, elles ne correspondent pas exactement dans la mesure où les données avaient été acquises au cours de campagnes préalables.

Tableau IV-11. Descriptions des sites étudiés pour l'axe 2 (porosité et teneurs en eau initiales).

	ENTPE-S1	**ENTPE-S2**	**Parking Doua**	**Site IUT**
ρ_b **(g cm^{-3})**	1.242 (0.219)	1.280 (0.154)	1.166 (0.043)	1.195 (0.046)
θ_i **(cm^3 cm^{-3})**	0.310 (0.018)	0.400 (0.057)	0.273 (0.045)	0.273 (0.066)

Les sols étudiés présentent tous des valeurs usuelles de masse volumique apparente et donc probablement des porosités semblables. On retrouve approximativement pour tous les sites que pour le site de l'ENTPE. Enfin, les essais ont été réalisés à divers moments, ce qui se traduit par des valeurs de teneurs en eau initiales importantes (Tableau IV.9).

IV.2.3 Courbes d'infiltration cumulées selon la taille de l'anneau

Afin d'évaluer l'effet de la taille de l'anneau sur la dynamique d'infiltration, la Figure IV-4, présente les courbes d'infiltration cumulée obtenues sur quatre sites urbains (ENTPE site 1, ENTPE site 2, Tranchées de la Doua, et Bassin de l'IUT), en distinguant à chaque fois les données associées aux petits et aux grands anneaux.

En tendance, les courbes issues des petits anneaux montrent des infiltrations cumulées plus importantes avec des pentes initiales plus accentuées, traduisant une phase transitoire plus rapide et plus intense. Cette différence de comportement est particulièrement visible sur les sites ENTPE (1 et 2) et IUT, où hormis une infiltration par site, le faisceau de courbes d'infiltration des petits anneaux est au-dessus des courbes d'infiltration obtenues avec les grands anneaux. On peut aussi noter que les faisceaux sont plus larges pour les petits anneaux, révélant une variabilité plus importante de la réponse. La variabilité réduite pour les données obtenues avec le grand anneau reflète une moyenne spatiale plus représentative du sol et donc probablement une meilleure représentativité du comportement hydrodynamique de chaque essai. Cette capacité à intégrer l'hétérogénéité du sol confère au grand

anneau une robustesse méthodologique précieuse, notamment pour les sols structurés ou présentant des hétérogénéités à l'échelle centimétrique et donc difficiles à intégrer avec le petit anneau.

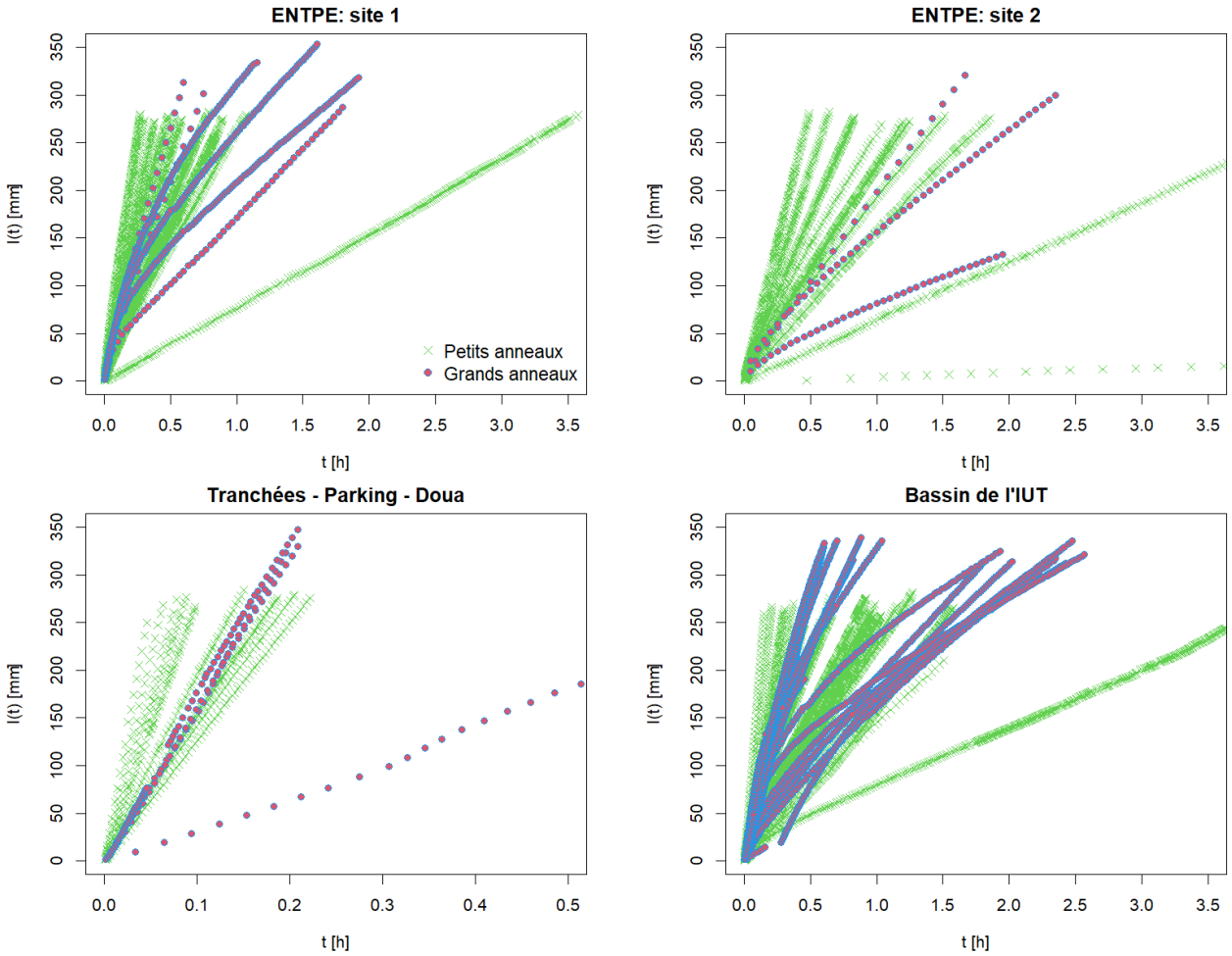


Figure IV-27. Courbes d'infiltration cumulées obtenues avec le petit anneau (points verts) et avec le grand anneau (courbes bleues) pour les quatre sites.

On note aussi une différence de forme entre les données petit et grand anneau. Les courbes obtenues avec le grand anneau présentent en majorité des formes plus concaves et moins linéaires. En première approche, cela semble logique car le flux radial, lié au rayon du cylindre utilisé, diminue lorsque le rayon, augmente. En effet, l'effet géométrique de la source est réduit (Smettem et al. 1994). Ainsi, plus le rayon diminue, plus on augmente la composante radiale. Or, cette dernière a été démontrée comme étant constante (flux constant) et donc correspondant à une composante linéaire pour l'infiltration cumulée (Lassabatere et al. 2009; Smettem et al. 1994). Cela signifie donc une forme effectivement plus linéaire pour les courbes d'infiltration obtenues avec les plus petits anneaux. Ce raisonnement est donc a priori cohérent avec des formes plus linéaires, une concavité moins marquée et une atteinte du régime permanent (zone de linéarité de la courbe) plus rapide pour le petit anneau. Le raisonnement précédent est valide à partir du moment où les essais sont réalisés sur un même sol uniforme. En

supplément, le changement de taille peut amener à échantillonner des zones de sols différentes, avec des contrastes de porosité et de paramètres hydrodynamiques et donc des formes de courbes d'infiltration cumulées différentes. La modélisation avec l'algorithme BEST et l'estimation des paramètres intrinsèques (indépendants du rayon de la source) doit permettre de distinguer ces configurations.

Au regard des données, les courbes d'infiltration cumulée illustrent bien la complémentarité des deux dispositifs : les petits anneaux accentuent les contrastes et permettent de capter des flux extrêmes, tandis que les grands anneaux produisent des courbes plus réplicables, et probablement plus intégratrices et représentative du comportement moyen du sol.

IV.2.4 Analyse des taux d'infiltration (IR)

La Figure IV.5 présente les distributions (boxplots) des taux d'infiltration moyens (IR), calculés pour chaque dispositif (petit et grand anneau) sur les quatre sites expérimentaux. Cette représentation graphique permet de synthétiser les différences de comportement en termes de taux d'infiltration moyens des flux.

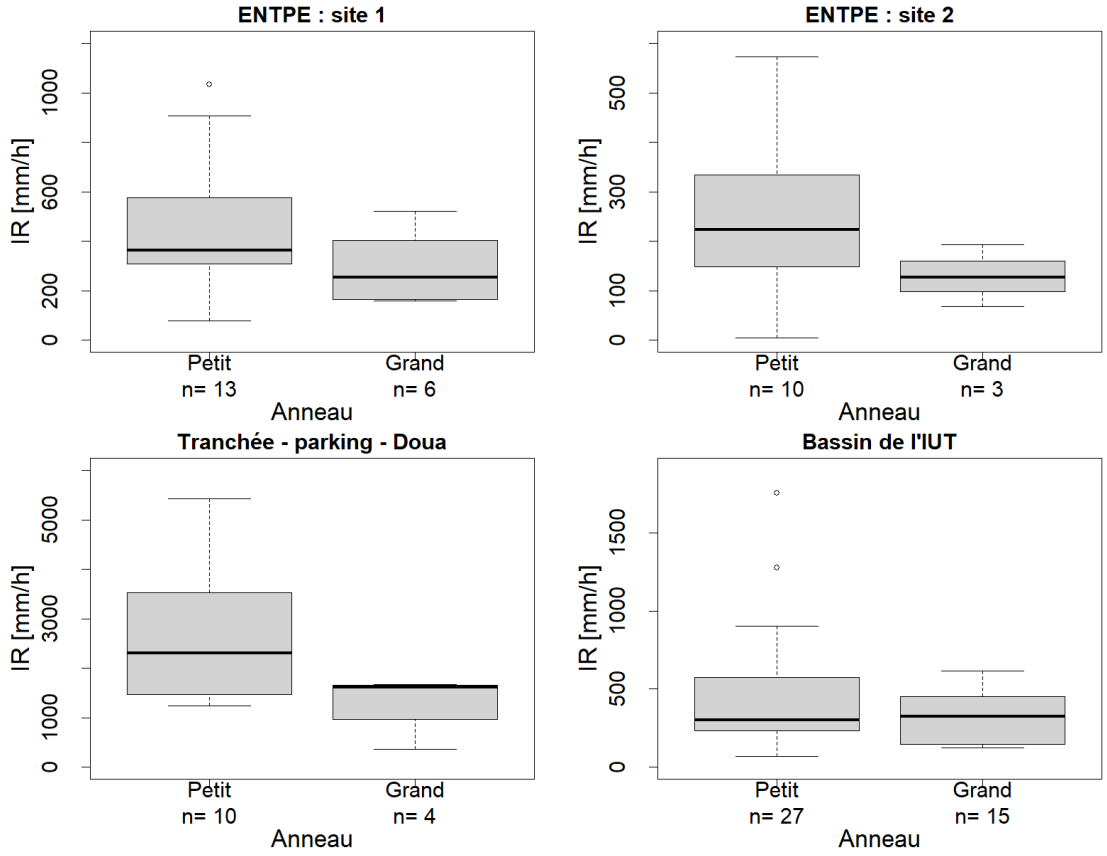


Figure IV-28. Boites à moustaches des taux d'infiltration IR (mm/h) pour les différents sites investigués : (a) ENTPE : Site 1 ; (b) ENTPE Site 2 ; (c) les tranchées de la Doua et (d) Bassin d'infiltration de l'IUT. Les données hors distribution sont tracées sous forme de point.

Comme expliqué au chapitre précédent, le taux d'infiltration moyen est une métrique intéressante pour comparer les résultats entre eux, dans la mesure où cet indicateur synthétise la donnée infiltrométrique par une seule valeur. En analysant les valeurs de IR (Figure IV.20), on observe une tendance nette et systématique : les IR mesurés avec le petit anneau sont significativement plus élevés que ceux obtenus avec le grand anneau, quel que soit le site. Sur les tranchées de la Doua, par exemple, les valeurs du petit anneau atteignent des valeurs médianes supérieures à 2000 mm/h, tandis que les valeurs associées au grand anneau restent nettement en dessous de 1000 mm/h. On note aussi une dispersion autour de la moyenne nettement plus importante pour les données du petit anneau. L'écart entre le premier et le dernier quartile décile (Figure IV.28, première versus dernière barre horizontale) est effectivement nettement plus important pour le cas du petit anneau.

Cette différence en moyenne peut s'expliquer par l'effet géométrique lié à la dimension de la source. En toute théorie, pour un sol uniforme, on doit avoir un effet géométrique plus marqué pour le petit anneau et donc des infiltrations cumulées et taux d'infiltration supérieurs par rapport au grand anneau. Maintenant, concernant la différence de surface de sol sollicité, l'échantillonnage différentié ne devrait pas modifier les processus d'infiltration autre que l'effet géométrique et donc ne devrait rajouter de différence de moyenne en supplément de celle imposée par l'effet géométrique. En revanche, si le sol est hétérogène, la situation est plus complexe. Il faut s'assurer que le nombre de données est alors suffisant pour caractériser la moyenne en évitant une surreprésentation des données associés aux écoulements préférentiels. Le petit anneau augmente en effet la probabilité d'un positionnement au-dessus d'un macropore, donnant lieu à de fortes infiltrations. On peut donc imaginer que le petit anneau, bien moins intégrateur et bien plus sensible aux conditions locales, produise des données très variables et avec une sensibilité particulière aux écoulements préférentiels.

Nous venons d'analyser la différence de moyenne. Concernant la différence de dispersion des données autour de la moyenne est plus aisée. La valeur faible du rayon du petit anneau réduit l'effet d'intégration spatiale et accentue l'impact des hétérogénéités structurales locale. À l'inverse, le grand anneau tend à lisser les extrêmes, en mobilisant un volume de sol plus large, ce qui se traduit par des taux d'infiltration plus homogènes d'une mesure à l'autre. Ainsi la mesure de l'infiltration avec le petit anneau reflète une plus forte sensibilité aux conditions locales (structure, texture, compactage), mais peut aussi poser des problèmes de représentativité dans les contextes hétérogènes. On doit donc faire attention au nombre de reliquats à effectuer lorsqu'on utilise des anneaux de tailles communément considérées, avec un nombre suffisant pour pouvoir avoir une mesure représentative du sol investigué.

En somme, cette analyse du taux d'infiltration confirme la **complémentarité** des deux dispositifs : les petits anneaux permettent de détecter des zones très perméables, utiles pour caractériser la dynamique des macropores, tandis que les grands anneaux apportent une estimation plus fiable et moins sensible

aux effets localisés, ce qui est particulièrement pertinent pour les études hydrologiques sur des ouvrages d'infiltration de grande dimension (Goutaland et al. 2008, 2013; Lassabatere et al. 2010).

IV.2.5 Estimations BEST sur les courbes d'infiltration du site IUT

Toutes les données acquises n'ont pu être traitées par l'algorithme BEST, pour différentes raisons (manque de données et manque de temps). En conséquence, nous nous concentrons ici sur les données associées au site IUT et pour lequel toutes les données ont pu être traitées. Par ailleurs, pour ce site, nous n'avons pu traiter que 14 infiltrations sur les 27 disponibles au total pour le petit anneau et 9 infiltrations pour le grand anneau, parmi les 15 disponibles, cela pour des raisons de données manquantes. Néanmoins, les données modélisées sont relativement représentatives du jeu de données complet. L'analyse des ajustements des modèles BEST appliqués aux données traitées vise à évaluer l'effet de la taille de l'anneau sur la représentation des processus d'infiltration. Pour chaque anneau, grand et petit, les ajustements sont présentés pour les cinq variantes de l'algorithme BEST (BEST-Slope, BEST-Intercept, BEST-Steady, BEST-WR et BEST-WR3T), en illustrant l'infiltration cumulée $I(t)$, le taux d'infiltration $i(t)$, les erreurs d'ajustement.

IV.2.5.1 Variantes Slope, Intercept et Steady de l'algorithme BEST

Dans un premier temps, nous présentons les simulations obtenues avec les trois variantes classiques de l'algorithme BEST (Slope, Intercept et Steady). Les courbes sont organisées de manière comparative : à gauche, les résultats issus du grand anneau, à droite, ceux du petit anneau. Chaque ensemble de graphes présente l'évolution de l'infiltration cumulée $I(t)$, du taux d'infiltration $i(t)$, et de l'erreur relative $E_r(\%)$ liée à chaque grandeur, favorisant une lecture assimilant des performances d'ajustement des modèles. Cette analyse graphique précède la discussion approfondie des paramètres hydrodynamiques estimés, qui fera l'objet de la section suivante.

Dans la Figure IV.30, nous illustrons le potentiel des trois versions de l'algorithme BEST pour l'ajustement des données expérimentales obtenues avec le petit et le grand anneau (respectivement colonne de droite et gauche). On note un parfait ajustement du modèle dans les deux cas, avec une parfaite superposition du modèle sur les données infiltrométriques et des erreurs relatives très faibles. Globalement, les résultats indiquent une très bonne concordance entre les courbes modélisées et les données expérimentales pour le grand anneau. La forme des courbes est bien reproduite, avec une évolution bien modélisée tant pour l'infiltration cumulée que pour le taux d'infiltration. L'erreur relative reste faible tout au long de la séquence, ce qui traduit une bonne capacité d'ajustement du modèle, notamment avec l'algorithme BEST-Steady. Ces résultats confirment que l'utilisation d'un grand anneau, qui procède à une mesure intégrée des flux et limite l'influence des hétérogénéités locales, produit une courbe d'infiltration cumulée idéale pour la modélisation BEST.

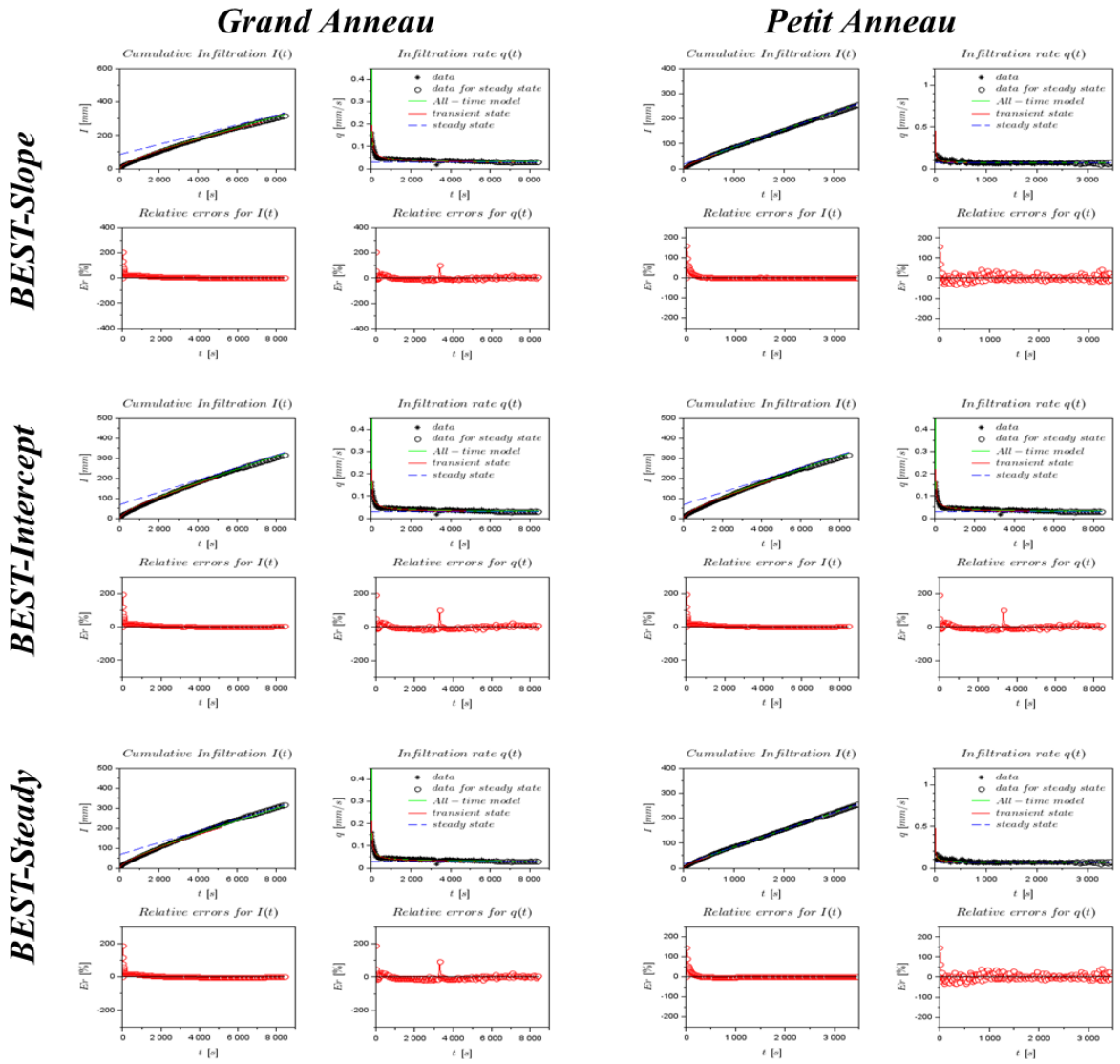


Figure IV-29. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST versions BEST-Slope, Intercept et Steady pour le site de l'IUT. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

En revanche, pour les données obtenues avec le petit anneau, les ajustements présentent davantage de variabilité et certaines modélisations sont moins bonnes. Les courbes $I(t)$ montrent parfois un léger décalage entre les données et les données simulées, notamment en début de l'expérience. Les valeurs d'erreur relative élevées sont plus fréquentes que pour le grand anneau, notamment en début d'essai. Une telle situation traduit la sensibilité plus importante des données obtenues avec le petit anneau aux conditions locales et à certains processus physiques (activation de macropores, écoulements préférentiels, etc.). Ces processus sont susceptibles de se traduire par des fluctuations et perturbations du flux susceptibles de perturber l'application des algorithmes BEST.

En termes de comparaison entre les trois variantes, on constate que BEST-Steady est la variante qui offre les ajustements les plus cohérents, même en cas de données bruitées. BEST-Slope et BEST-Intercept peuvent produire une tendance à surestimer les flux initiaux, notamment pour les données obtenues avec le petit anneau, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que le petit anneau a du mal à produire une donnée intégrée et donc produit une donnée potentiellement perturbée, notamment dans le régime transitoire. Or, on sait que les versions BEST-Intercept et BEST-Slope s'appuient sur l'ajustement du régime transitoire et donc sont susceptibles d'être perturbées par une description inadéquate du régime transitoire.

Enfin, sur ce site, la majorité des courbes d'infiltration sont concaves, propre au régime transitoire, suivi d'une linéarité typique du régime stationnaire (Figure IV.28). Tel que discuté en amont, la partie linéaire est plus importante pour les données obtenues avec le petit anneau. Néanmoins, certaines infiltrations font exception tant pour le petit que pour le grand anneau. Tel que commenté ci-dessus certaines courbes d'infiltration cumulées sont soit linéaires sans concavité soit légèrement convexes en début de parcours et donc typiques d'un écoulement en sols hydrophobes. Ces données ne peuvent pas être traitées correctement avec les trois versions classiques de l'algorithme BEST. Tant les ajustements que les valeurs des paramètre hydrodynamiques sont donc erronées et ces données doivent être traitées avec les versions BEST-WR et BEST-WR3T de l'algorithme BEST.

IV.2.5.2 Variantes BEST-WR et BEST-WR3T

Toutes les données ont été traitées avec ces deux variantes de l'algorithme BEST. Néanmoins, l'intérêt de ces variantes réside bien entendu dans le traitement des données convexes. La Figure IV.30 illustre certains cas d'ajustement typiques, tant pour des données obtenues avec le petit anneau que celles obtenues avec le grand anneau. Pour le grand anneau, on a considéré le même essai avec une légère convexité en début de parcours, de manière à illustrer la capacité des deux algorithmes BEST-WR et BEST-WR3T à représenter les données (Figure IV.30, 1ere colonne). On voit bien que le taux d'infiltration croit en début de parcours au lieu de décroitre. Cette décroissance est relativement bien modélisée avec les deux algorithmes (Cf. Figure IV.30, 1ere colonne, taux d'infiltration mesurés versus modélisés). BEST-Slope, BEST-Intercept et BEST-Steady auraient été incapables de simuler ainsi ces données. Plusieurs cas ont donné lieu à ce type de configuration.

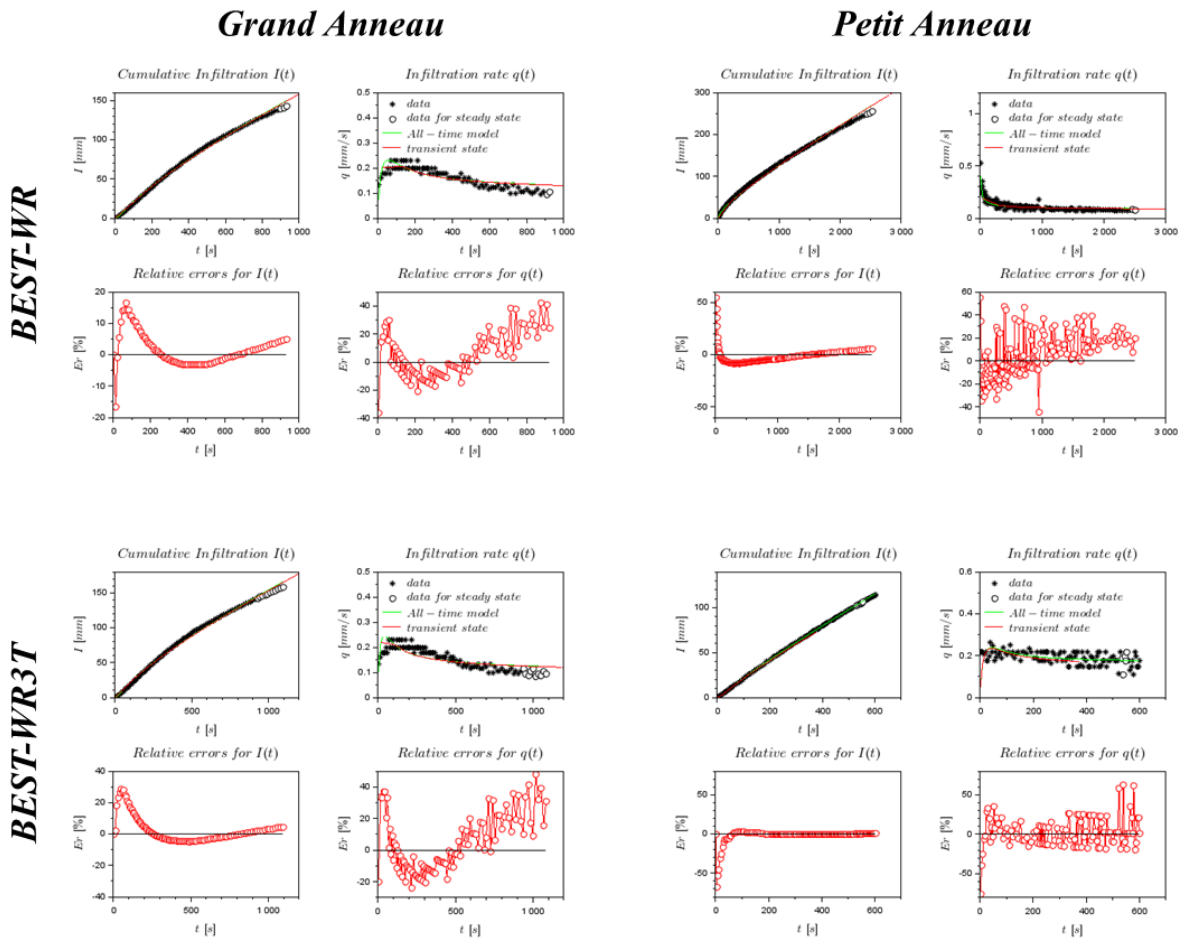


Figure IV-30. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST pour site sénégalais. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%).

Pour le petit anneau, beaucoup de données infiltrométriques sont soit classiques avec une concavité suivie d'une linéarité (Figure IV.30, haut, droite) soit plus linéaires (Figure IV.30, bas, droite). On note que pour les deux cas, les versions BEST-WR et BEST-WR3T produisent des ajustements corrects, avec un bon alignement du modèle sur les données. Dans ce dernier cas, on note que le modèle prédit une croissance du taux d'infiltration pour les temps très courts, alors que cette croissance est moins marquée, voire inexistante, pour les données expérimentales (Figure IV.30, bas, droite).

IV.2.5.3 Etude des estimations BEST

Le traitement des données par les variantes de l'algorithme BEST a donné un jeu de données qui doit être analysé en premier lieu. Par analogie avec l'axe 1, nous avons sélectionné les valeurs adéquates permettant (i) d'assurer un ajustement de qualité et (ii) présentant des valeurs physiquement plausibles. Notamment les valeurs positives de h_g positive et les valeurs négatives de K_s ont été systématiquement écartées, ces deux configurations étant toujours concomitantes et en lien avec l'utilisation des versions BEST-WR et BEST-WR3T. Les données sélectionnées ont ensuite permis de déterminer les valeurs

de référence ensuite utilisées pour la caractérisation hydrodynamique des sols résultant de l'utilisation des anneaux de petite et grande tailles. On compare donc les estimations de chaque algorithme BEST à ces données de références, avant de statuer sur la normalité ou log-normalité des données de référence, h_g et K_s.

IV.2.5.3.1 Estimation de la conductivité hydraulique K_s

L'étude des régressions linéaires entre les différents algorithmes BEST et les valeurs de références (Figure IV.31), permet d'identifier les biais systématiques contrastés. En analysant les variantes BEST-Intercept et BEST-Steady, on constate une estimation relativement bonne, avec autant de sous-estimations (points au-dessous de la droite 1 : 1) que de surestimations (points au-dessus de la droite 1 : 1). Néanmoins, les régressions en fonction des valeurs de référence définissent une droite avec une ordonnée à l'origine significative et une pente inférieure à 1 (Tableau IV.10). La méthode BS tend à surestimer les valeurs de K_s, avec tous les points au-dessus de la droite 1 : 1 (Figure IV.31, Ks_BS). Logiquement, la droite de régression a une ordonnée à l'origine et une pente supérieure à 1 (Tableau IV.10). La version BEST-Slope a donc tendance à surestimer et prédire des valeurs de Ks supérieures à la référence et donc aux versions BEST-Intercept et BEST-Steady.

Tableau IV-12. Ordonnée à l'origine (b, mm/h) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre K_s. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro.

Ks_reg	Intercept	Slope
_BS	0.001547	**1.348157**
BI	**0.01285**	**0.609610**
BSst	0.006603	**0.726040**
BWR	0.01176	**0.298556**
BWR3T	-0.006519	**1.309772**

Pour les deux méthodes restantes, on note des résultats mauvais pour la version BEST-WR, avec une sous-estimation quasi-systématique, donnant lieu à une droite de régression avec une pente très faible < 1/3 (Tableau IV.10). Quant à l'algorithme BEST-WR3T, elle se caractérise par un accord entre les valeurs estimées et les valeurs de références, avec autant de valeurs au-dessus de la droite 1 : 1 (surestimation) qu'en-dessous (sous-estimation). La droite de régression a par ailleurs un intercept près de zéro et une pente proche de 1 (Tableau IV.10). Enfin, la dernière sous-figure de la Figure IV.31 met en évidence la bimodalité de la distribution de Ks, avec deux modes correspondant à des valeurs plus faibles et des valeurs plus fortes. On peut penser que ces deux modes mettent en évidence deux sous-populations de valeurs correspondant aux données obtenues avec les anneaux de grande et petite taille.

Ce point est vérifié par la suite. On peut noter une certaine similarité avec la comparaison des versions BEST au chapitre précédent, avec quand même certaines différences. L'algorithme BEST-WR se distingue moins et les trois méthodes classiques BEST-Slope, BEST-Intercept et BEST-Steady donnent des résultats plus semblables en surestimant toutes les trois les données de référence (Figure IV.19).

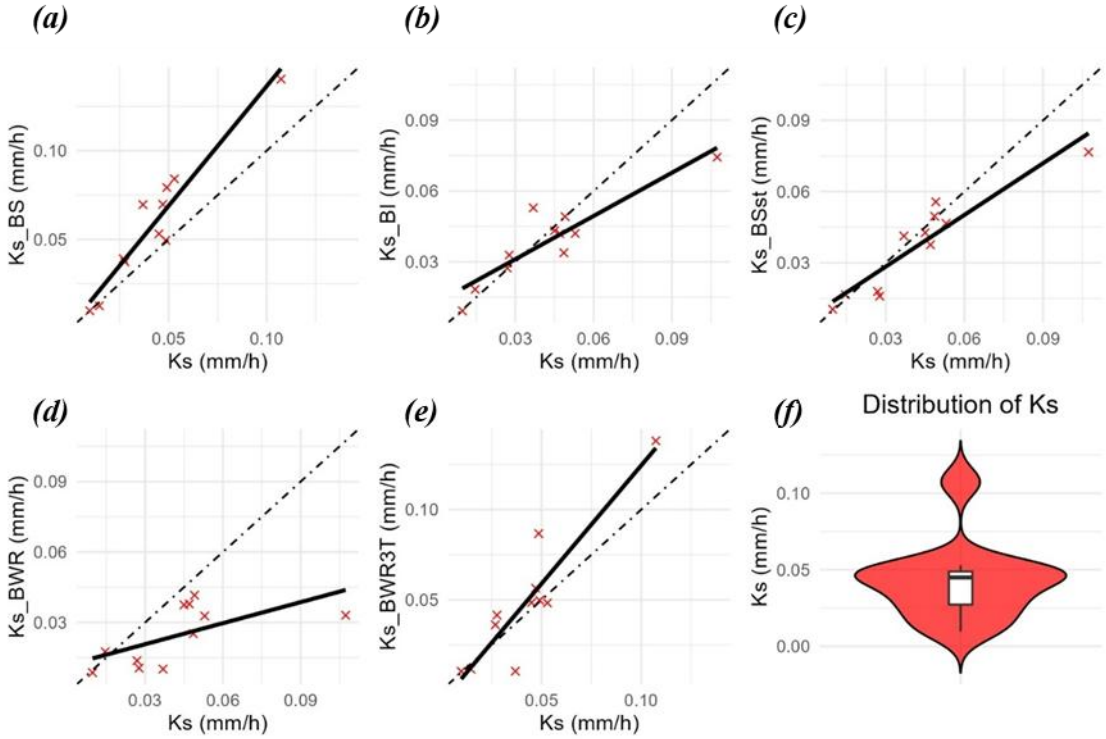


Figure IV-31. Valeurs de K_s obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence K_s.et droites de régression.

On vient de voir que les différentes versions de l'algorithme BEST peuvent donner des valeurs différentes. Néanmoins, nous ne sommes pas persuadés que les différences sont statiquement différentes. En supplément, on peut aussi la question de savoir si le choix de la méthode peut changer en fonction de l'anneau choisi. En d'autres termes, un utilisateur qui ne se baserait que sur les données associées au petit ou au grand anneau serait-il amené à tirer les mêmes conclusions concernant la comparaison inter-méthode.

Pour répondre à ces questions, nous avons mené une ANOVA à deux facteurs pour tester les effets « variante BEST », « taille de l'anneau », et enfin l'interaction « variante : taille », qui permet de savoir si l'effet « variante » est équivalent pour les données obtenues avec le petit ou grand anneau. Les résultats de l'analyse de variance sont détaillés dans le Tableau IV.11 et illustrées dans la Figure IV.32. Les résultats statistiques indiquent une probabilité critique très proche de 0.05 pour et, dans une moindre mesure pour la taille de l'anneau. On en déduit que le choix de la méthode est proche de donner des résultats différents. En revanche, l'interaction « version : taille » a une probabilité critique

très éloignée de la valeur seuil, ce qui traduit le fait qu'a priori le choix des versions a la même influence pour le petit et le grand anneau.

Tableau IV-13. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour K_s en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

AOV2-Ks	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p-value
version	4	0.007323	0.001830	2.497	0.05595
taille	1	0.002551	0.002551	3.479	0.06868
version : taille	4	0.0007431	0.0001857	0.2534	0.9061
résidus	45	0.03299	0.0007333		

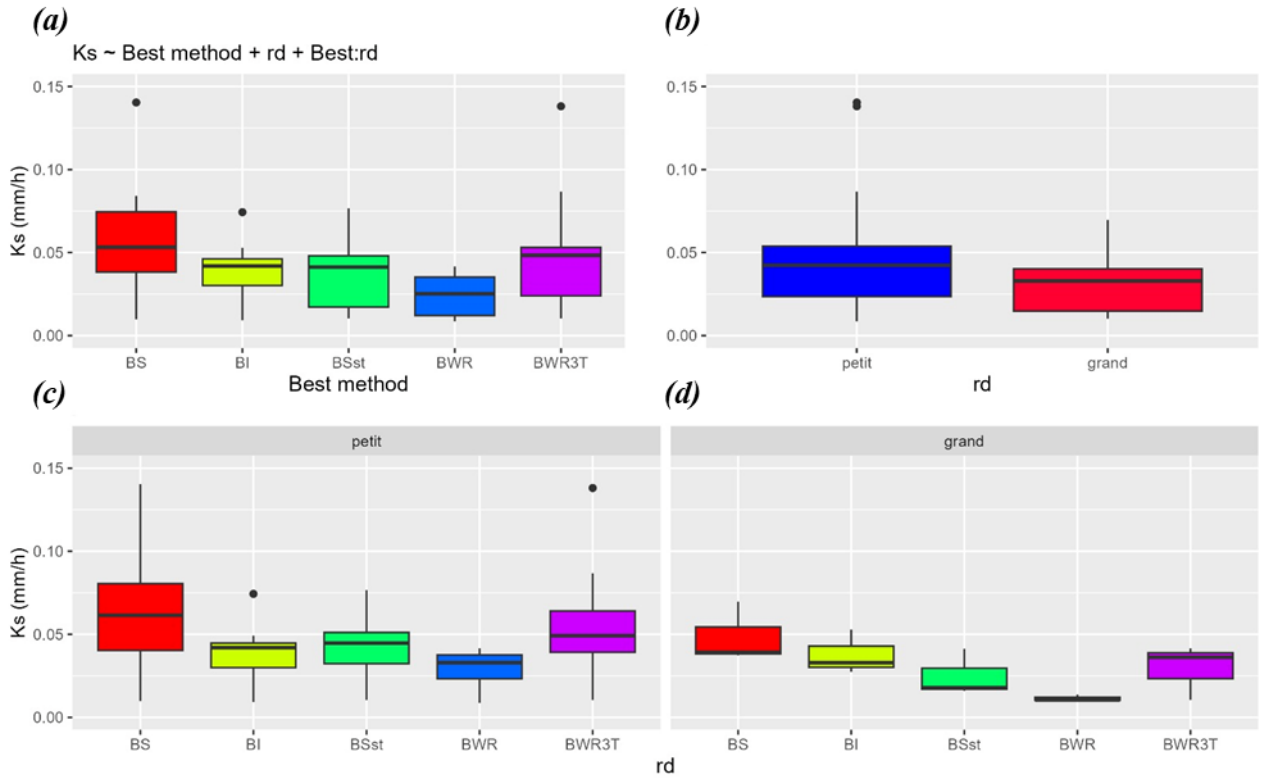


Figure IV-32. Valeursde Ks en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites).

En la Figure IV.32a, nous constatons que la version BEST-Slope présente une médiane supérieure aux méthodes BEST-Intercept et BEST-Steady, Concernant les nouvelles variantes, BEST-WR présente une médiane inférieure à la variante BEST-WR3T. Autant cette dernière tendance est en accord avec les résultats observés pour l'axe 1, autant la comparaison entre les trois méthodes classiques avec une tendance différente. Dans le cadre de l'axe 1, l'algorithme BEST-Slope présentait des estimations plus faibles que les deux autres versions BEST-Intercept et BEST-Steady. Néanmoins, dans tous les cas, on voit réellement une différence entre les différentes versions.

Concernant la dépendance de la comparaison inter-variante vis-à-vis des données considérées (petit versus grand anneau), la Figure IV.32 illustre quasiment les mêmes tendances, avec quelques petits écarts. Mais, en substance, BEST-Slope donne des valeurs supérieures à BEST-Intercept et BEST-Steady et BEST-WR reste bien inférieure à BEST-WR3T. On peut conclure donc que la différence entre les variantes est bien structurelle et se retrouvent donc indépendamment du choix de la dimension de la source. Enfin, la comparaison des boxplots entre les petit et grand anneaux montrent effectivement une dispersion moins importante pour les grands anneaux, ce qui corrobore la meilleure homogénéité des données infiltrométriques et de l'effet homogénéisateur du grand anneau.

IV.2.5.3.2 Estimation du paramètre d'échelle du potentiel de pression h_g

L'analyse des régressions entre estimations produites par les différentes variantes et valeurs de référence met en évidence des résultats contrastés en fonction des variantes. On voit une tendance à la sous-estimation par la toutes les variantes (points en dessous de la droite I : 1) sauf BEST-WR qui a tendance à surestimer les valeurs de h_g ; en valeur absolue (Figure IV.33). En conséquence, les droites de régressions ont toutes des pentes inférieures à 1, exception faite de la droite de régression de l'algorithme BEST-WR (Tableau IV.12).

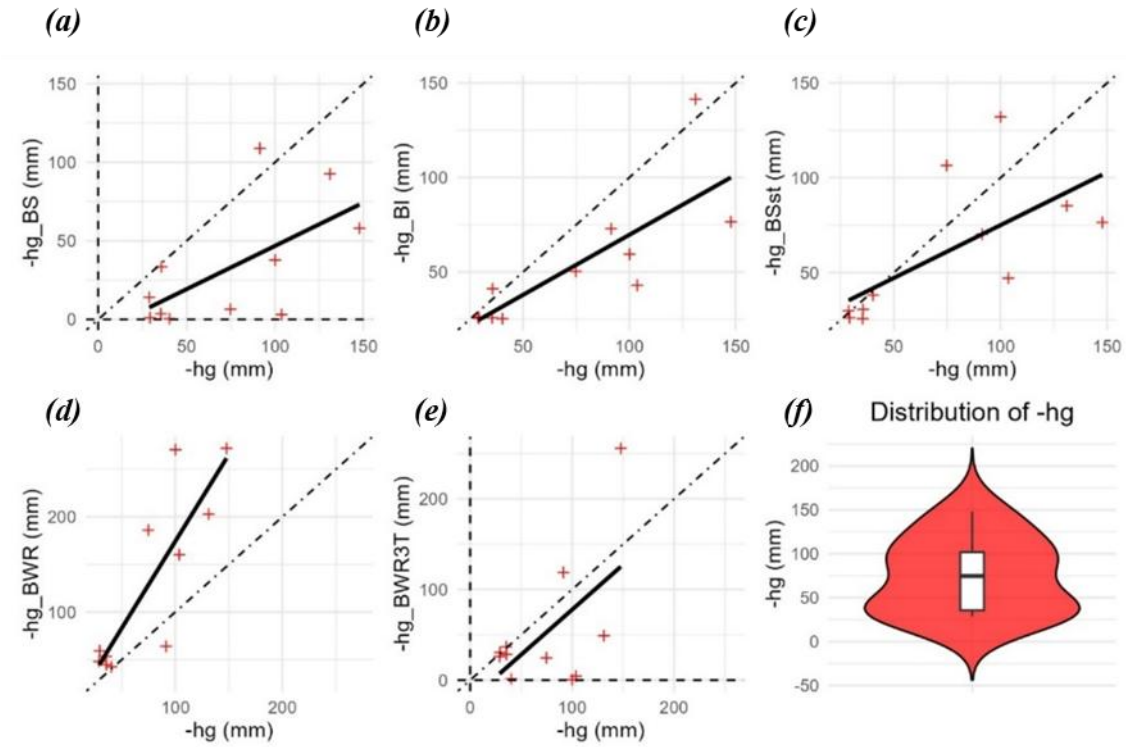


Figure IV-33. Valeurs de h_g obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence h_g.et droites de régression.

Tableau IV-14. Ordonnée à l'origine (b, mm) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre K_s. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro.

h_g reg.	b	a
_BS	8.263	**0.550**
BI	-6.103	**0.636**
BSst	-19.33	**0.557**
BWR	8.159	**1.825**
BWR3T	0.994	0.994

Comme pour la conductivité hydraulique à saturation, on a effectué une analyse de variance ANOVA-2 pour le paramètre h_g. On évalue ainsi la variabilité de ce paramètre en fonction du facteur « algorithme », « taille » et la dépendance de l'effet « algorithme » vis-à-vis de la taille de l'anneau, c'est-à-dire l'interaction « algorithme : taille » (Tableau IV ;13). La valeur des probabilités critiques montre un effet significatif des trois facteurs. Autrement dit, h_g dépend de la taille de l'anneau, de l'algorithme utilisé, et l'effet de l''algorithme est dépendant de la taille de l'anneau.

Tableau IV-15. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour h_g en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

AOV2-h_g	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p-value
Algorithme	4	58025	14506	5.827	0.0007245
Taille	1	36682	36683	14.73	0.0003839
Algorithme:taille	4	33517	8379	3.365	0.01711
résidus	45	112028	2490		

La représentation graphique correspondante à l'ANOVA-2 (Figure IV.34) révèle que les valeurs de h_g sont fortement influencées par la taille de l'anneau d'infiltration (Figure IV.34b). Pour les cinq variantes de l'algorithme BEST (BEST-Slope ; BEST-Intercept ; t BEST-Steady ; BWR et BWR3T), les médianes sont systématiquement plus faibles avec le petit anneau qu'avec le grand anneau (Figure IV.34c versus d). Cette tendance est particulièrement marquée pour l'algorithme BEST-Intercept (dans la famille des variantes classiques) et BEST-WR (dans la famille des variantes alternatives). Nous avons aussi constaté une dispersion marquée (écart interquartile) pour les données issues du petit anneau, exception faite de la variante BEST-WR3T.

L'analyse de variance met aussi en évidence la dépendance de hg vis-à-vis de la variante utilisée, avec un impact très significatif (Figure IV.34a). On note que pour ce jeu de données, les variantes BEST-

Intercept et BEST-Steady donnent des valeurs plus importantes que BEST-Slope. Cette tendance se distingue de la tendance observée dans l'axe 1, avec des valeurs plus importantes pour BEST-Slope (Figure IV.22). On note, comme toujours que la tendance sur le paramètre hg est toujours logiquement opposée à la tendance sur Ks, avec une compensation des deux paramètres. Quand une méthode augment l'un des deux paramètres, elle baisse l'autre, par une logique de compensation.

Enfin, l'analyse des données démontre aussi la dépendance de l'effet « algorithme » selon les données considérées, i.e., petit versus grand anneau. On note une tendance identique (Figure IV.34c versus d), avec BEST-Slope < BEST-Intercept < BEST-Steady puis BEST-WR > BEST-WR3T, et, pour finir, BEST-WR3T ≈ BEST-Slope (en médiane). Néanmoins, les écarts sont beaucoup plus marqués pour les données du grand anneau. Cela est cohérence avec des valeurs de hg nettement plus importante pour le grand anneau, en correspondance avec de courbes nettement plus concaves. L'emploi de petit anneau pourrait induire un flow latéral important, responsable de la « linéarisation » de la forme des courbes, induisant ainsi des estimations de valeur de h_g plus petites.

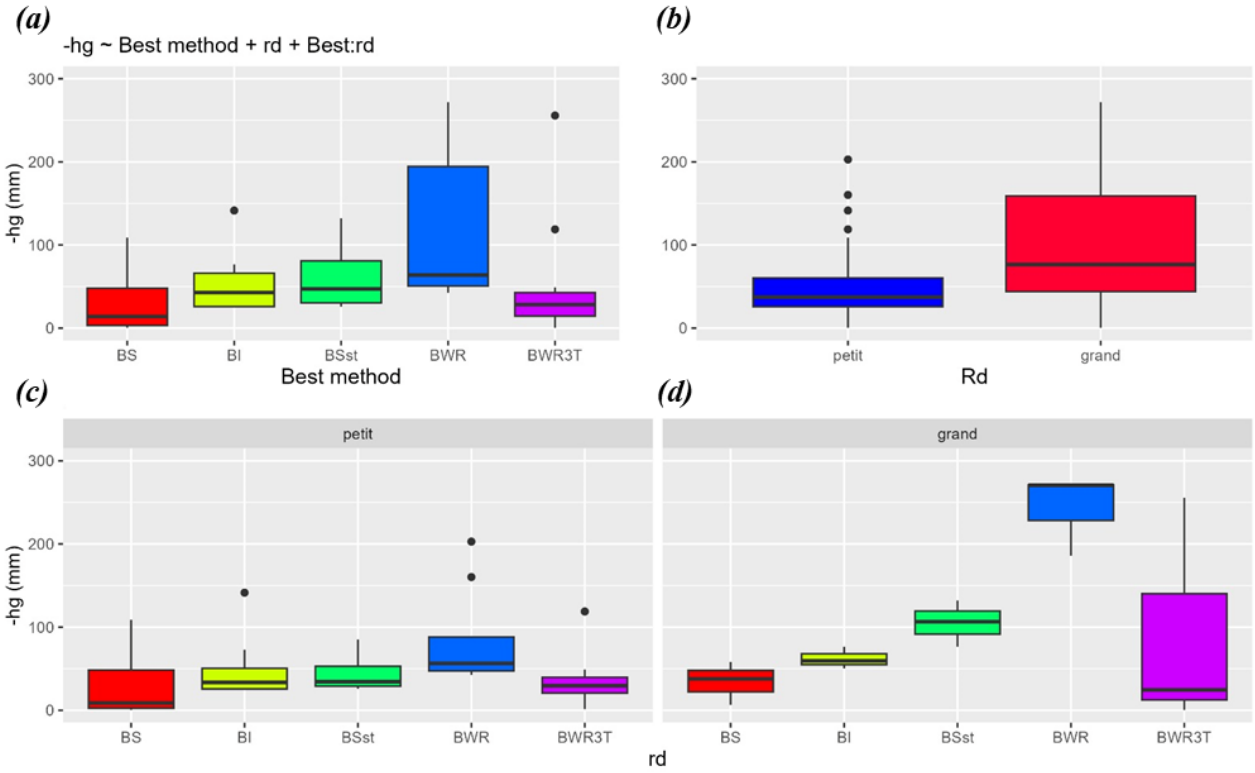


Figure IV-34. Valeursde hg en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites).

Ces résultats permettent en tous de montrer que l'emploi de telle ou telle méthode peu jouer sur les valeurs des paramètres estimés (en limite de seuil de significativité pour K_s), mais avec une tendance

lourde quand on compare les données issues du petit versus grand anneau. L'emploi d'un petit anneau tend à donner lieu à des valeurs de hg plus petite et des valeurs de Ks plus grande. Cette tendance observée pour toutes les variantes BEST est étudiée ci-après avec les valeurs de référence.

IV.2.5.3.3 Analyse de la normalité des lois

Les valeurs de h_g et K_s ont été transformées et représentées graphiquement en termes de correspondance entre les quantiles expérimentaux et les quantiles théoriques (Figure IV.35). Les résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov sont synthétisés dans le Tableau IV.14.

Tableau IV-16. Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov pour hg, log10(-hg), Ks et log10(Ks), p-value, pour toutes les versions ainsi que les valeurs concaténées servant de référence (val. De référence) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras.

Algorithme	h_g	$Log_{10}(-h_g)$	K_s	$Log_{10}(K_s)$
_BS	0.5255	0.8192	0.9279	0.6386
BI	0.6494	0.6837	0.9863	0.7085
BSst	0.7440	0.8277	0.7354	0.4677
BWR	0.2285	0.3920	0.7005	0.5625
BWR3T	0.1307	0.2601	0.4867	0.5671
Valeurs de référence	0.4822	0.6233	0.4242	0.7727

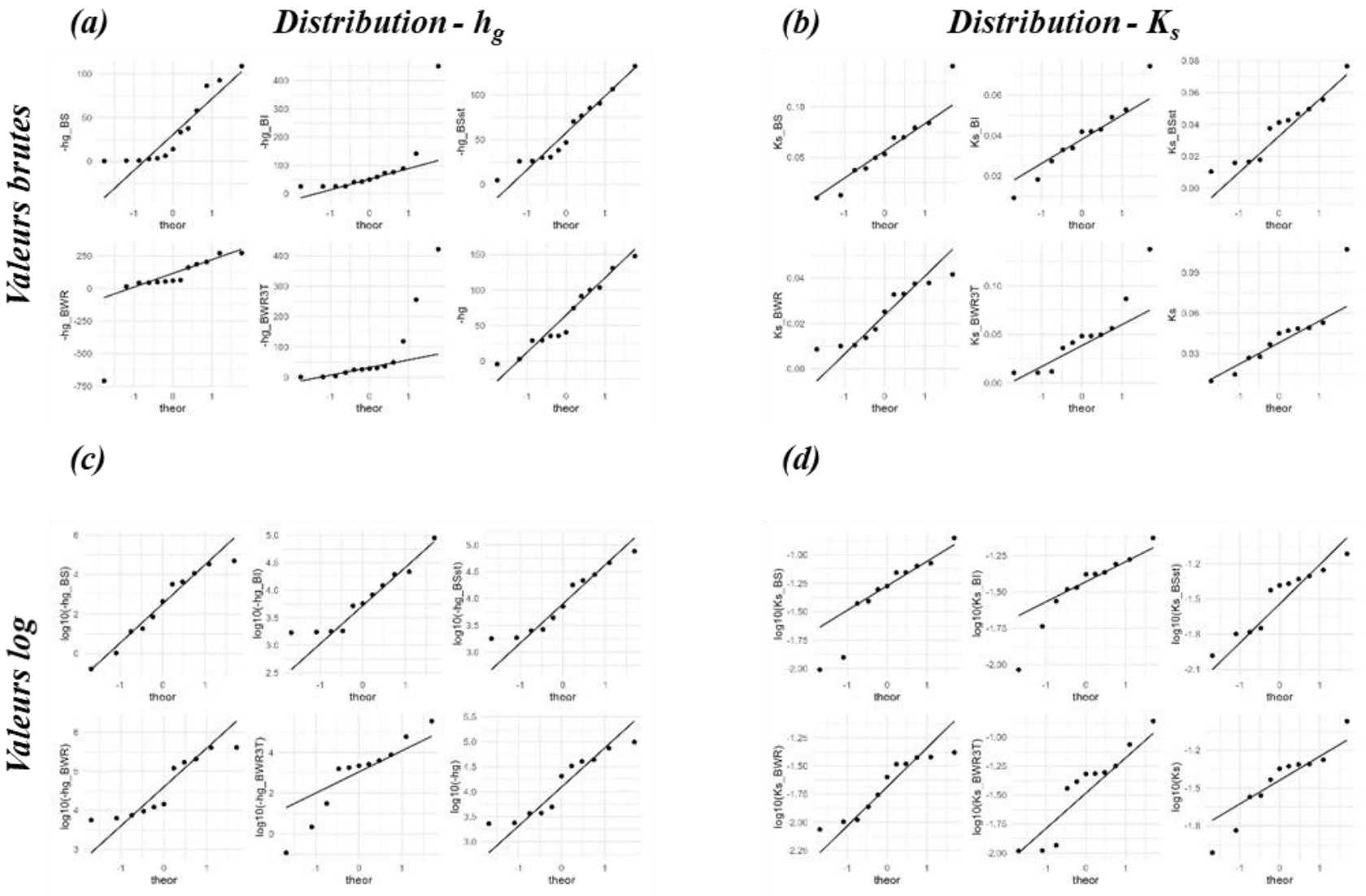


Figure IV-35. Droite de Henry et distributions des valeurs de h_g et K_s, en version brute et log.

On note que tous les jeux de données forment des droites, hormis quelques points pour certains jeux de données. Les comportements sont tout autant linéaires pour les valeurs brutes que pour les valeurs en log. Les tests de Kolmogov-Smirnov attentent d'une absence de significativité pour tous les tests (Tableau IV.14). On en déduit donc qu'aucun élément ne permet de réfuter l'hypothèse de normalité ou log-normalité des distributions. On considérera alors que toutes les distributions peuvent être considérées comme normale ou log-normales.

IV.2.6 Influence de l'anneau sur les paramètres hydrodynamiques K_s et h_g

On rappelle que dans cette partie, on discute les valeurs de référence. Ces dernières ne sont pas simplement la moyennes des valeurs de toutes les méthodes, mais la moyenne des estimations considérées comme plausibles car produisant un ajustement correct et présentant des valeurs plausibles avec un sens physique.

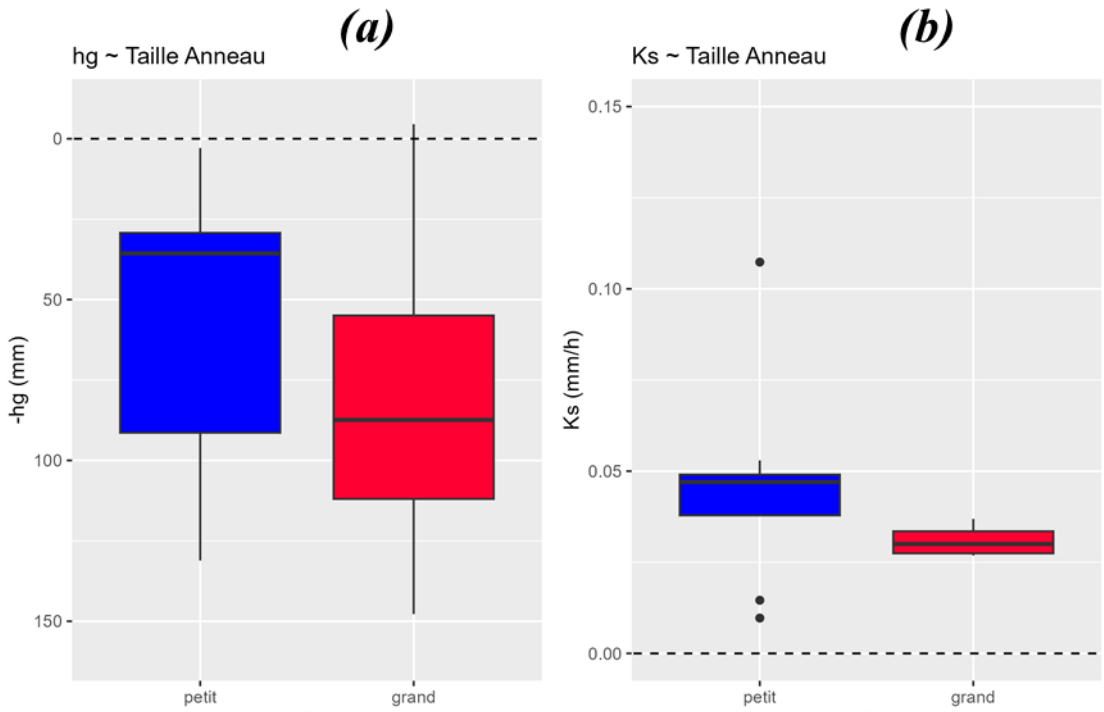


Figure IV-36. Différences de valeur du paramètre d'échelle du potentiel de pression, h_g (mm) et de conductivité hydraulique à saturation (mm/h). entre les deux tailles d'anneau (petit versus large)

Dans l'ensemble, l'analyse met en évidence une influence tangible de la taille de l'anneau sur les valeurs estimées de K_S. En effet, la médiane des données associés au grand anneau est plus petite que pour le petit anneau (Figure IV.36b). On note aussi que la dispersion est bien moindre, avec un faible écart entre le premier et le troisième quartile, a contrario du cas du petit anneau, avec un écart plus important. On peut aussi noter pour le petit anneau les trois points hors distribution, rajoutant à la dispersion des valeurs autour de la médiane. Concernant les valeurs du paramètre hg, on note une

augmentation de la valeur h_g (en valeur absolue) pour le grand anneau. Cela est en accord avec des courbes plus concaves, quoique la concavité augmentée pourrait juste résulter de l'effet géométrique sans augmentation de la valeur de hg. En termes de dispersion, on note une dispersion des valeurs autour de la valeur médiane sensiblement équivalente pour les deux tailles d'anneau.

La comparaison statistique entre les valeurs de conductivité hydraulique et paramètre d'échelle de potentiel de pression a été réalisée par application de la loi de Student, et les données sont résumés dans le Tableau IV.15. Les probabilités critiques obtenues pour les deux variables hg et K_s sont bien supérieures au seuil de 0,05, indiquant a priori aucun effet significatif de la taille de l'anneau. On peut conclure donc que la tendance repérée pour Ks n'est a priori pas statiquement significative. Cette absence de significativité indique que la différence de médiane entre les deux tailles d'anneau est plus petite que la dispersion des valeurs intra-groupes, ce qui semble évident à la lecture de la Figure IV.36b. Pour hg, la situation semble comparable avec des médianes certes différentes mais dont la différence est cachée par la variance intra-groupe (Figure IV.36a).

Tableau IV-17. Résultats des tests de Student pour la comparaison des moyennes entre les deux tailles d'anneau ; degré de liberté (Df), valeur de la statistique de Student (t), et valeur de probabilité critique (p) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras.

	Df	**t**	***p***
h_g	4.250	0.6920	0.5249
K_s	8.943	1.551	0.1554

Tableau IV-18. Résultats des tests de Fisher et Levene pour la comparaison des variances entre les deux tailles d'anneau ; degrés de liberté (Df_1 et Df_2), valeur de la statistique de Fisher ou de Levene (F), et valeur de probabilité critique (p) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras.

	Df1	**Df2**	***p***	***F***
		Test de Fisher		
h_g	8	3	0.4478	0.3235
K_s	8	3	35.80	**0.0136**
		Test de Levene		
h_g	1	11	0.4355	0.5229
K_s	1	11	1.403	0.2611

Nous avons aussi testé la différence de variance entre les deux groupes de valeurs que sont le petit et le grand anneau. Pour cela, nous avons effectué deux tests, le test de Fisher, classiquement considéré pour comparer la variance de deux lois normales, et le test de Levene, conseillé lorsque les données ne suivent pas rigoureusement une loi normale. On note que seul le test de Fisher pour Ks procure une probabilité critique inférieure à 0.05 et donc indique une différence significative (Tableau IV.16). Cela

est en accord avec une dispersion bien moindre des valeurs autours de la médiane pour Ks (Figure IV.36a). En revanche pour h_g, aucune différence significative de variance entre le petit et le grand anneau.

IV.2.7 Synthèse et discussion – axe 2

Les résultats expérimentaux ont bien montré l'influence de la taille de l'anneau sur les courbes d'infiltration cumulées, les taux d'infiltration et les paramètres hydrodynamiques déduits de ces courbes. Si les courbes d'infiltration cumulées sont en elles-mêmes dépendantes des conditions initiales (susceptibles de varier entre les essais) et de la taille de l'anneau (effet géométriques), les paramètres hydrodynamiques sont des paramètres intrinsèques, et donc invariants par rapport aux conditions d'expérimentation. En d'autres termes, une variation de la valeur des paramètres hydrodynamiques traduit effectivement un effet de la taille de la source sur les processus physiques impliqués dans l'infiltration de l'eau dans les sols.

L'analyse des données infiltrométriques met bien en évidence un effet taille de l'anneau sur la forme des courbes et leur variabilité, avec visiblement, une concavité plus marquée et une dispersion autour du comportement moyen moins importante pour le grand anneau. Le traitement avec l'algorithme BEST révèle des tendances dans la comparaison du paramètre d'échelle de la pression d'eau, h_g et dans la conductivité hydraulique à saturation, K_s. En substance, K_s est plus faible et h_g plus important en valeur absolue, traduisant une infiltration globale plus impactée par la capillarité et moins impactée par la gravité que pour les essais effectués avec le petit anneau (Angulo-Jaramillo et al. 2016). Ce constant est cohérent avec l'hypothèse que les essais petit anneau peuvent être fortement impactés par les écoulements préférentiels et donc de type gravitaire. C'est ainsi l'hypothèse mentionné plus haut, supposant que les essais infiltrométriques réalisés avec un petit anneau positionné sur la macroporosité ne va voir que la macroporosité et va omettre la partie matricielle du sol. En revanche, la taille du grand anneau sera plus favorable à une intégration globale des flux entre matrice et réseau de macropore et donc plus sensible aux écoulements matriciels.

Pour étudier cette hypothèse, Gersende Fernandes a effectué un ensemble de simulations numériques dans sa thèse, modélisant l'infiltration dans un sol macroporé en fonction de la taille de l'anneau (Fernandes, 2023). Les résultats obtenus sont synthétisés dans la Figure IV.36. Plusieurs systèmes ont été étudiés par Gersende Fernandes, mais nous nous concentrons ici sur le cas du macropore droit affleurant le plus petit anneau (de rayon 7.5 cm). Les modélisations sont aussi effectuées pour le cas d'un sol homogène sans macropore. Dans ce cas, le bulbe d'infiltration est plus grand pour le plus grand anneau (Figure IV.37). Cela se traduit par un gradient hydraulique horizontal moins important, car la différence de potentiel de pression entre les conditions initiales et la valeur imposée au sein de

l'anneau, Δh s'applique à un rayon plus grand, et donc le ratio $\Delta h/r_d$ diminue. En surface, ainsi, l'infiltration cumulée est moins importante pour le grand anneau et moins linéaire, du fait d'un flux latéral réduit. On comprend bien que si le rayon de l'anneau tendait vers l'infini, l'infiltration en surface se rapprocherait de celle obtenue pour le cas 1D vertical.

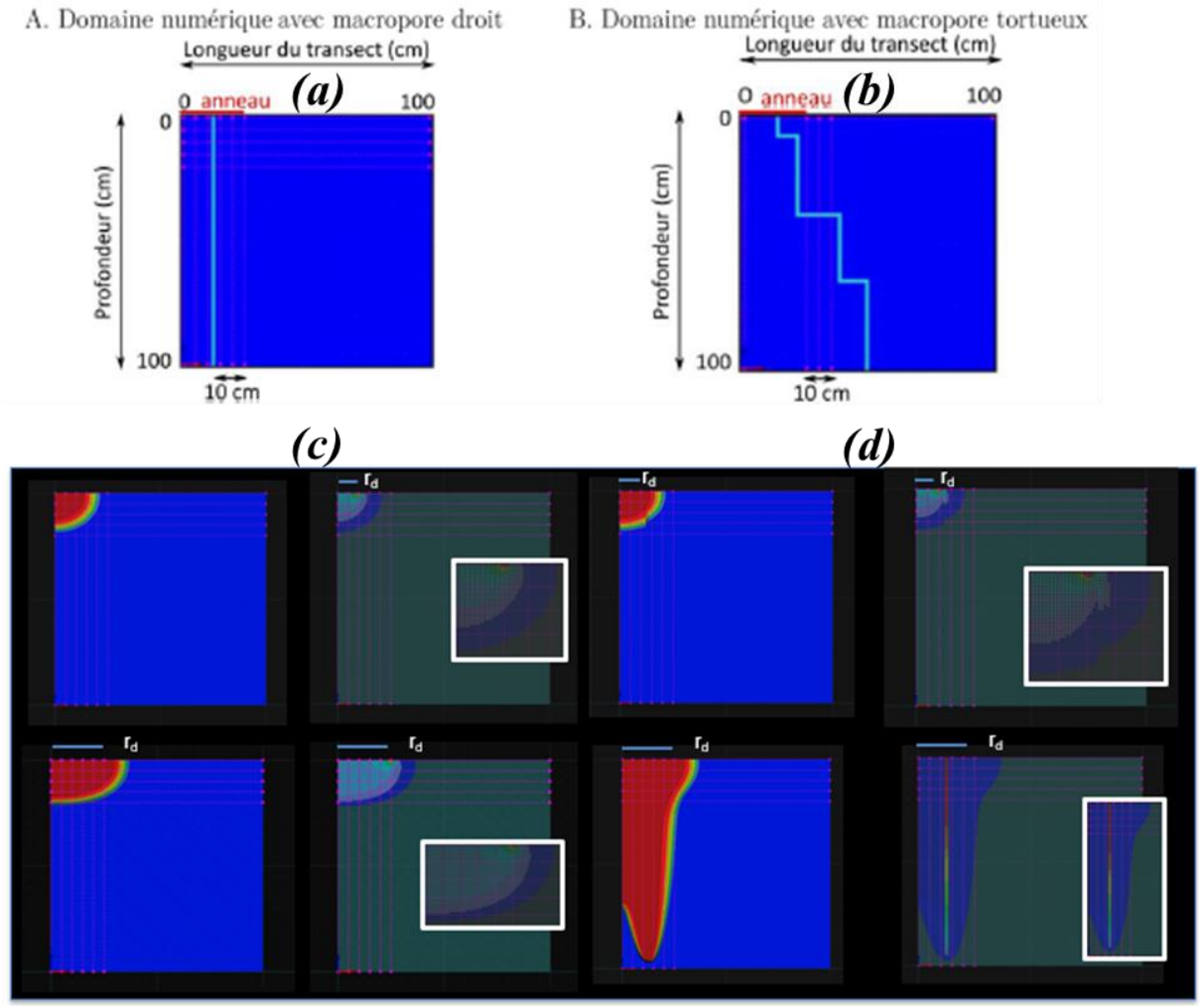


Figure IV-37. (a) résultats de modélisation numérique de l'infiltration dans un sol macroporé en fonction de la taille de l'anneau ; en haut : domaines numériques étudiés incluant une matrice avec une géométrie donnée de macropore, A macropore droit situé à 8 cm de l'axe central et B macropore tortueux ; (b) résultats en termes de teneur en eau et de flux d'eau dans le sol en fonction du rayon de l'anneau (r_d) pour un sol homogène (gauche) et le système macroporé de type A (droite) (Fernandes (2023) et Saint-Louis et al.,(2023)

Lorsque le sol est macroporé, l'écoulement change. Pour le cas du petit anneau, où le macropore est affleurant, ce dernier est peu activé, et les flux d'eau sont relativement restreints. Dans ce cas, l'infiltration cumulée ressemble à celle du sol homogène et donc représente les propriétés du sol homogène. A contrario, si l'anneau avait été placé directement sur le macropore, on aurait eu la majorité des flux conduits par le macropore et donc une influence forte (données non illustrées). Enfin, l'anneau de plus grande taille intercepte franchement le macropore et donc permet sa participation à l'infiltration. On voit clairement l'influence du macropore sur les chemins de l'eau (tant en termes de

teneurs en eau que de flux modélisés, Figure IV.37) et donc on modélise bien la combinaison d'un écoulement matriciel et macroporal. Cette modélisation illustre donc bien l'effet intégrateur de l'anneau de grande taille et permet de comprendre ainsi la raison pour laquelle l'anneau de grande taille donne lieu à une médiane (et moyenne) bien intégratrice des écoulements matriciels et macroporeux avec une dispersion moindre autour de cette valeur. Ainsi, pour l'estimation de propriétés hydrodynamiques effectives à grande échelle, on favorisera l'anneau. A contrario, si on veut bien distinctement modéliser et quantifier les flux à l'échelle d'un élément macroporeux et si on veut mettre en évidence la différence entre le comportement matriciel et le comportement macroporal, on aura intérêt à utiliser les anneaux de tailles adaptés à la géométrie et à la densité du réseau de macropores.

IV.3 Robustesse de l'infiltromètre automatisé et des algorithmes BEST en contexte urbain

Dans les environnements urbains hétérogènes, caractérisés par une forte variabilité des textures de sol, des structures anthropisées et des perturbations de surface (colmatage, hydrophobicité, écoulements préférentiels), la mesure de l'infiltration représente un véritable défi méthodologique. Dans ce contexte, l'évaluation de la robustesse de l'infiltromètre automatisé Beerkan prend tout son sens. Cet appareil, étudié dans l'axe 1, permet un contrôle précis de la charge hydraulique appliquée et une standardisation du protocole, ce qui en fait un outil prometteur pour une utilisation intensive en milieu urbain (Concialdi et al. 2020; Di Prima 2015). Parallèlement, l'estimation des paramètres hydrodynamiques à partir des données d'infiltration repose sur des modèles semi-empiriques, notamment l'algorithme BEST qui inclue trois variantes plus anciennes et classiquement utilisées et deux nouvelles variantes pour son adaptation aux sols hydrophobes.

L'objectif de cet axe est double : d'une part, évaluer la robustesse de l'infiltromètre automatisé face à une diversité de contextes urbains, et d'autre part, analyser la sensibilité des estimations fournies par les algorithmes BEST aux conditions expérimentales et aux caractéristiques pédologiques locales, pour consolider les résultats acquis à ce propos dans les axes précédents. Cette analyse repose sur les données collectées sur six sites urbains contrastés du Grand Lyon : trois jardins de résidence aux pieds des immeubles (résidence Cristalline, Coste à Caluire-Cuire, et Damidot à Villeurbanne), deux jardins publics (Parc Clos Layat et Parc Chambovet), ainsi qu'une friche industrielle à Décines. Ces sites couvrent une large gamme de situations urbaines, des friches végétalisées aux parcs urbains aménagés, en passant par des zones résidentielles. Cette démarche vise ainsi à identifier les limites et les conditions d'application optimales de la méthode automatisée Beerkan et des variantes BEST, afin d'orienter leur usage dans les projets de gestion durable des eaux pluviales et d'étude du fonctionnement hydrique des sols urbains.

IV.3.1 Caractérisation physique des différents sites

Les sites investigués sont de nature différente, tel qu'expliqué ci-dessus. Les essais ont été réalisés sur des zones végétalisées correspondant à des sols classiques. Les mesures de masse volumique apparente indiquent des valeurs relativement basses (Tableau IV.17), avec des variations entre 1.07 gcm^{-3} pour le parc de Chambovet et 1.42 gcm^{-3} pour la résidence Damidot. Ces valeurs sont relativement classiques, bien que légèrement inférieures à la normale (Angulo-Jaramillo et al., 2016). Les porosités du sol, n, ont été calculées à partir des valeurs de masse volumique apparente, et donnent lieu à des valeurs de porosités élevées, de l'ordre de 45-55%, tandis que les sols naturels ont une porosité souvent comprise

entre 30 et 45%. La masse volumique spécifique des particules, ρ_s, a été fixée à la valeur classiquement considérée, $\rho_s = 2.65\,\mathrm{g cm^{-3}}$, sans mesure spécifique.

Tableau IV-19. Descriptions des sites étudiés pour l'axe 3 : masses volumiques apparentes, porosité et teneurs en eau initiales ; moyennes et écart-types entre parenthèse.

	Parc Chambovet	**Parc Clos-Layat**	**Res. Damidot**
$\rho_d\,\mathrm{g cm^{-3}}$	1.07 (0.00)	1.26 (0.13)	1.42 (0.10)
n [%]	59.5% (0.1%)	52.5% (4.9%)	46.5% (3.8%)
$S_{e,i}$ [%]	58.1% (6.8%)	56.4% (8.7%)	57.4% (4.8%)
	Res. Cristalline	**Res. Coste**	**Friche**
$\rho_d\,\mathrm{g cm^{-3}}$	1.26 (0.14)	1.13 (0.06)	1.25 (0.14)
n [%]	52.4% (5.3%)	57.5% (2.4%)	52.9% (5.1%)
$S_{e,i}$ [%]	81.7% (2.6%)	71.9% (5.8%)	69.7% (8.1%)

Les teneurs en eau initiales et degrés de saturation correspondant ont été déterminés. Les valeurs de teneurs en eau initiales demeurent élevées globalement avec des degrés de saturation entre 55% et 80%. Il s'agit de conditions humides, résultant de la période d'effectuation des essais (essentiellement en hivers). La teneur en eau initiale est importante dans la mesure où elle exerce une influence significative sur le processus d'infiltration, en diminuant l'infiltration observée lorsque la teneur en eau augmente (Angulo-Jaramillo et al., 2016). D'un point de vue physique, cela s'explique simplement par une diminution du graduent entre les conditions appliquées et les conditions initiales en conditions humique (avec un potentiel de pression de l'eau plus élevé). Diminuer l'écart entre les teneurs en eau initiale et finale induit une décroissance de la contribution de la capillarité à l'infiltration totale.

IV.3.2 Résultats des courbes d'infiltration des sites étudiés

L'ensemble des courbes d'infiltration cumulée mesurées sur les différents sites étudiés met en évidence la grande variabilité des réponses hydriques des sols urbains, en lien avec leur usage, leur structure superficielle et les propriétés pédologiques locales. Cette diversité de comportements permet de tester la robustesse du dispositif automatisé Beerkan, notamment sa capacité à s'adapter à une large gamme de flux, des plus rapides aux plus lents, et à détecter les régimes d'infiltration liés à des facteurs spécifiques tels que la présence de macropores, d'hydrophobicité ou de colmatage de surface. L'analyse graphique révèle ainsi des dynamiques contrastées d'un site à l'autre, mais également à l'intérieur d'un même site.

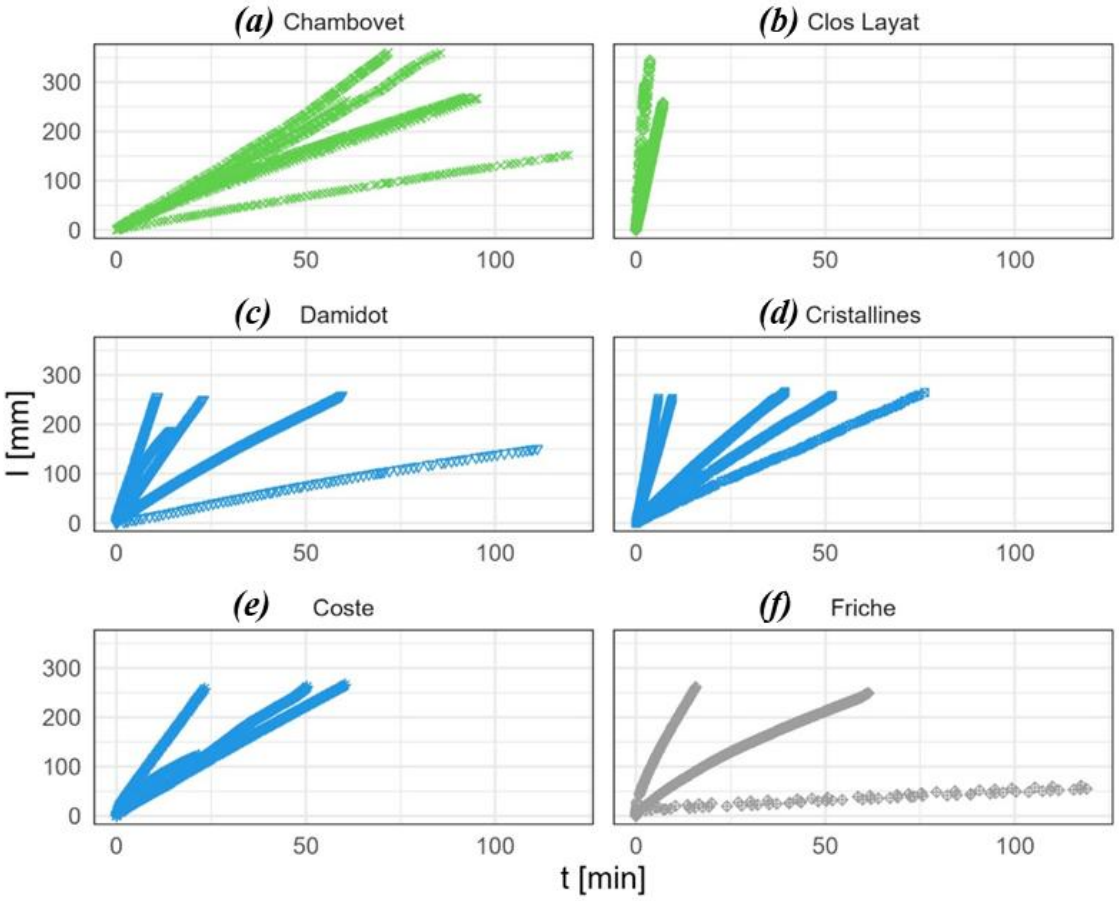


Figure IV-38. Courbes d'infiltration avec en abscisse le temps en minutes et en ordonnée l'infiltration cumulée en millimètre pour les différents sites investigués

Le site Cristalline illustre bien cette hétérogénéité intra-site, avec une différence entre zones tondues et zones laissées libres. En zone tondue, la courbe d'infiltration est fortement pentue dès le début, signalant un flux préférentiel rapide, probablement induit par une porosité structurale bien développée (Figure IV.38, Cristalline). En zone non tondue, la courbe est plus étalée, avec une augmentation plus progressive témoignant d'un écoulement plus diffus, peut-être ralenti par des obstacles liés à la couverture végétale ou à la microtopographie. Le site Coste présente également une dualité entre une zone enherbée, dont la courbe connait une croissance modérée et régulière (signe d'un écoulement matriciel classique), et une zone tondue où l'infiltration ralentit nettement en fin de courbe, traduisant une possible discontinuité structurale ou un effet de tassement (Figure IV.38, Coste).

Les contrastes sont encore plus marqués sur le site Friche, où deux réplicats affichent une infiltration progressive et soutenue (structure poreuse modérément développée), tandis que le troisième réplicat présente une quasi-stagnation du flux, avec une courbe presque horizontale, reflétant probablement un état de colmatage ou de compactage prononcé en surface. Ces cas à très faible flux confirment l'efficacité du dispositif automatisé à mesurer des volumes minimaux sans bruit ni rupture de charge

(Figure IV.38, Coste). L'autre avantage est que le dispositif peut être laissé à demeure alors que les opérateurs peuvent réaliser ou suivre d'autres essais pendant les essais très longs. À l'opposé, le site Clos Layat montre une courbe très abrupte, signature typique d'une infiltration par voie préférentielle (macropores actifs), nécessitant de la part du système une réactivité instrumentale très fine pour éviter les débordements initiaux (Figure IV.38, Clos Layat). Sur le site Damidot, pour certains réplicats, la courbe débute avec une forte pente mais présente une inflexion nette dans la phase intermédiaire, révélatrice d'un changement de régime (Figure IV.38, Clos Damidot). Ce changement pourrait être lié à une couche de transition moins perméable ou à une redistribution interne du flux dans la matrice. En effet, de fortes réductions du taux d'infiltration ont déjà été observées pour des sols argileux avec une réorganisation des particules en surface induisant une colmatage progressif en cours d'essai (Di Prima et al. 2018). Enfin, le site Chambovet présente certaines courbes légèrement convexes en phase initiale, évoquant une hydrophobicité de surface, rapidement suivie par une dynamique stabilisée, compatible avec un écoulement matriciel (Figure IV.38, Chambovet). Dans l'ensemble, ces observations confirment que le système automatisé Beerkan permet d'assurer une mesure continue, stable et cohérente, même dans des contextes variables.

L'analyse des courbes d'infiltration cumulée confirme non seulement la grande hétérogénéité des sols urbains du Grand Lyon, mais aussi l'adaptabilité du dispositif automatisé à des conditions de terrain complexes et contrastées. Pour approfondir l'interprétation fonctionnelle des sols testés, il est désormais pertinent de comparer les valeurs de taux d'infiltration obtenues, notamment à travers l'analyse statistiques des taux d'infiltration, permettant de comparer les sites entre eux.

IV.3.3 Analyse des taux d'infiltration

Dans le prolongement de l'étude des courbes d'infiltration cumulée, l'analyse statistique des taux d'infiltration permet de comparer synthétiquement les dynamiques hydriques entre les différents sites étudiés. Cette représentation permet de dégager des tendances centrales (médiane), de quantifier la variabilité interne (étendue interquartile) et de repérer les comportements atypiques (valeurs extrêmes). L'indicateur IR peut être interprété à la lumière des propriétés physiques des sols urbains : présence ou absence de porosité efficace, écoulements préférentiels, colmatage superficiel, hétérogénéités liées à la couverture végétale ou aux usages anthropiques.

Le site Clos Layat illustre un cas de sol très favorable à l'infiltration. La distribution IR présente une médiane très élevée, accompagnée d'un intervalle interquartile restreint, ce qui traduit une dynamique homogène, rapide et peu sujette aux perturbations (Figure IV.39). Ce profil est typique d'un sol fortement macroporeux, où l'eau emprunte immédiatement des voies préférentielles connectées, probablement peu altérées par des processus de colmatage. L'absence de valeurs aberrantes renforce

l'idée d'un fonctionnement régulier, dans lequel l'infiltromètre parvient à suivre sans défaillance les forts flux initiaux, confirmant ainsi sa sensibilité aux vitesses élevées d'infiltration. La faible variabilité du taux d'infiltration, d'un point à un autre illustre l'homogénéité spatiale de la réponse.

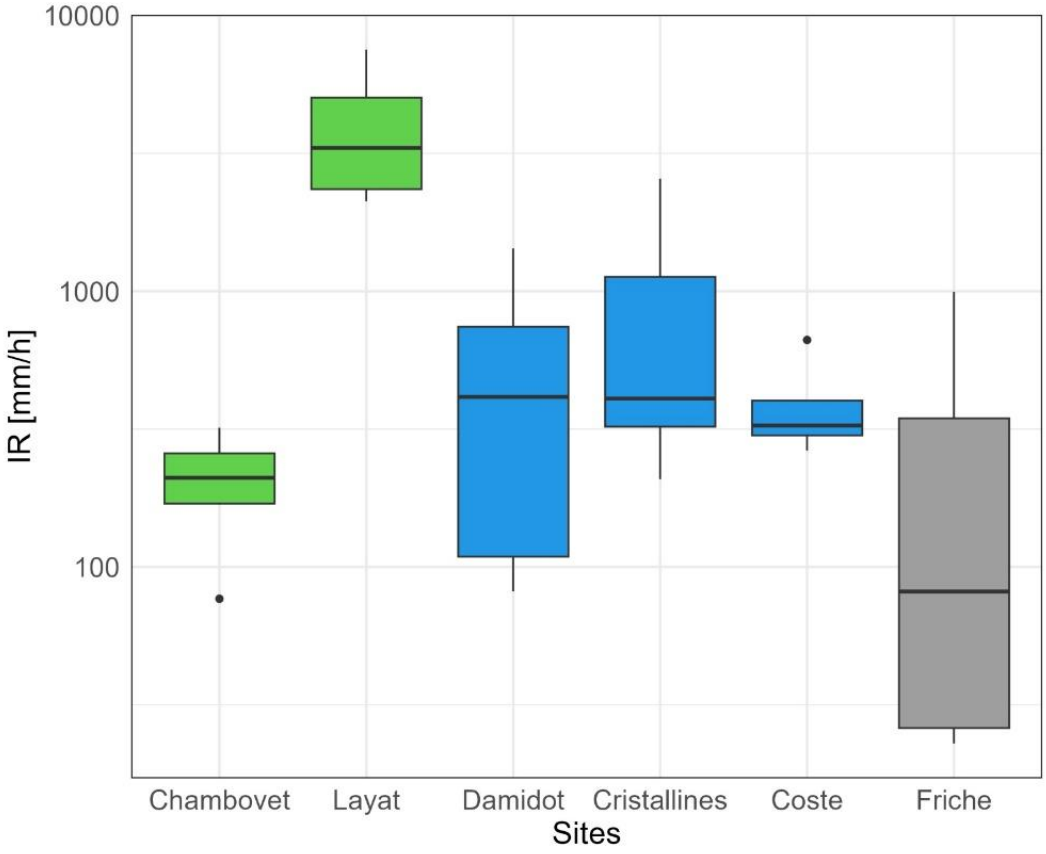


Figure IV-39. Taux d'infiltration obtenus sur les différents sites (échelles log).

Tableau IV-20. Valeurs moyennes des paramètres de teneur en eau à saturation, θ_s, du taux d'infiltration et de paramètres de forme n et η des différents sites.

Sites	IR.mean	$\boldsymbol{\theta_s}$ **(cm³/cm³)**	**n**	$\boldsymbol{\eta}$
Chambovet	208	0.5947	2.376	8.316
Clos-Layat	4012	0.5286	2.352	8.679
Damidot	547	0.4654	2.350	8.736
Cristallines	911	0.5239	2.395	8.071
Coste	396	0.5749	2.422	7.737
Friche	322	0.5300	2.375	8.343

À l'extrême opposé, le site Friche, présente un boxplot à médiane très basse avec une dispersion interquartile très importante (Figure IV.39). Pour rappel, les données sont illustrées en échelle log. Ce comportement est cohérent avec un sol colmaté, compacté ou à texture argileuse, où la porosité efficace est associée à des pores de petites tailles et donc avec de très faibles valeurs de conductivité hydraulique

à saturation. Ce site comprend une infiltration très faible se distinguant des autres infiltrations (Figure IV.38). Cette courbe d'infiltration est spécifique et se distingue du groupe et révèle certaines zones avec une perméabilité particulièrement faible, probablement causée par une structure partiellement altérée et/ou compactée. Cette variabilité spatiale entraîne des patterns mixtes, où certaines zones infiltrent rapidement, tandis que d'autres ralentissent voire bloquent les flux. L'infiltromètre automatisé a ici permis de capturer avec précision des infiltration s très lentes caractéristiques de sols très fins et peu perméables, mettant en évidence sa robustesse même dans des conditions hydrauliquement défavorables.

Les autres sites se situent entre les deux extrêmes décrits ci-dessus. Le site Cristalline montre un profil composite. La zone tondue, plus favorable à l'infiltration de l'eau, présente un ensemble de valeurs élevées avec une certains dispersion. À l'inverse, la zone non tondue correspond à un ensemble de valeurs bien inférieures avec une variabilité plus marquée, probablement en lien avec une densité végétale plus importante et plus irrégulière, induisant localement du ruissellement ou une résistance à l'infiltration. La réunion de ces deux groupes de données induit une distribution avec une médiane relativement basse et une dispersion importante.

Le site Coste, également subdivisé, montre une situation intermédiaire. La zone enherbée offre une médiane modérément élevée avec une faible dispersion, suggérant une infiltration régulière et peu contrainte. La zone tondue, en revanche, présente une dispersion plus importante avec des valeurs extrêmes, probablement dues à des effets localisés de compaction (piétinement) ou à des hétérogénéités de texture. En regroupant les deux zones, la distribution globale présente une médiane intermédiaire, proche du premier quartile. Ceci traduit un sol globalement favorable à l'infiltration, mais avec une certaine variabilité.

Les sites restant, résidence Damidot et parc Chambovet présentent une médiane centrée entre le premier et le troisième quartile, et peu de valeurs aberrantes. On note une seule valeur aberrante pour le parc Chambovet. Ces données indiquent un fonctionnement hydrodynamique « équilibré », sans infiltration très rapide (pas de macropores connectés majeurs), ni de réduction de l'infiltration significatif. Ces sols, à porosité fonctionnelle régulière, pourraient servir de références structurales pour estimer les écarts d'infiltration liés à des altérations physiques ou biologiques dans d'autres sites.

L'analyse des boxplots met en lumière la diversité des comportements hydrodynamiques des sols urbains et leur lien direct avec les conditions superficielles et structurales. Les médianes traduisent ici la capacité « moyenne » ou « médiane » d'infiltration de chaque site, tandis que les étendues interquartiles renseignent sur l'homogénéité ou l'hétérogénéité de cette capacité. A noter que, les échelles log induisent un biais d'interprétation et une asymétrie pour les distributions normales. Les

données démontrent non seulement l'influence des facteurs pédologiques et biologiques (structure, texture, végétation), mais aussi la capacité du dispositif automatisé à restituer fidèlement les dynamiques diverses résultant de contextes physiquement contrastés. Ainsi, ces résultats consolident l'idée que l'infiltromètre automatisé n'est pas seulement capable de s'adapter aux flux extrêmes (rapides ou lents), mais qu'il permet également d'identifier avec précision les régimes d'infiltration caractéristiques contrastés.

IV.3.4 Ajustement de l'algorithme BEST

De même que pour les deux axes précédents, nous avons appliqué les algorithmes BEST pour traiter les données infiltrométriques et déduire les paramètres hydrodynamiques intrinsèques. Pour chaque site, cinq variantes de l'algorithme BEST ont été appliquées : BEST-Slope, BEST-Intercept, BEST-Steady, BWR et BWR3T. Les campagnes d'essais ont été réalisées sur deux années consécutives. Ainsi, nous présentons successivement les deux groupes de données avec le premier groupe, testé en novembre 2021, incluant le Parc Chambovet (PC), le Parc Clos Layat (PCL) et la Résidence Damidot (RDam), tandis que le second groupe, mesuré en février 2023, regroupe le site Cristalline (Christ), le site Coste (CM « Comme à la maison ») et la Friche Décines-Charpieu (FDC).

L'évaluation de la qualité des inversions et des estimations s'est appuyée sur des critères complémentaires **:** la correspondance de forme entre les courbes modélisées et les données expérimentales, l'ordre de grandeur du flux estimé, la représentativité de la dynamique d'infiltration (notamment l'atteinte d'un régime stationnaire), et la valeur de l'erreur relative (Er) entre les données mesurées et les ajustements. Une attention particulière a également été portée à la cohérence des résultats entre les trois algorithmes. Ces critères permettent de juger à la fois la fiabilité de la mesure automatisée et la validité des hypothèses pédohydrauliques sur lesquelles reposent les modèles BEST.

IV.3.4.1 Ajustement des paramètres BEST du premier groupe de sites (PC ; PCL ; RDam)

IV.3.4.1.1 BEST Slope-BEST-Intercept-BEST-Steady

Sur le site du Parc Chambovet, les profils d'infiltration cumulée $I(t)$ obtenus à partir des trois modules algorithmiques de l'algorithme BEST (Slope, Intercept, Steady) manifestent une superposition quasi parfaite aux données mesurées, traduisant une concordance remarquable. Le débit instantané $q(t)$ suit une tendance monotone décroissante, stabilisée autour de 400 à 500 secondes, indiquant l'atteinte d'un régime quasi-permanent. La qualité de l'ajustement est corroborée par des valeurs faibles d'erreur relative, oscillant entre 6,4 % pour BEST-Slope, 7,2 % pour BEST-Steady, et un maximum de 9,1 % pour BEST-Intercept. L'homogénéité de ces écarts sur la durée du test traduit un excellent ajustement de l'algorithmique.

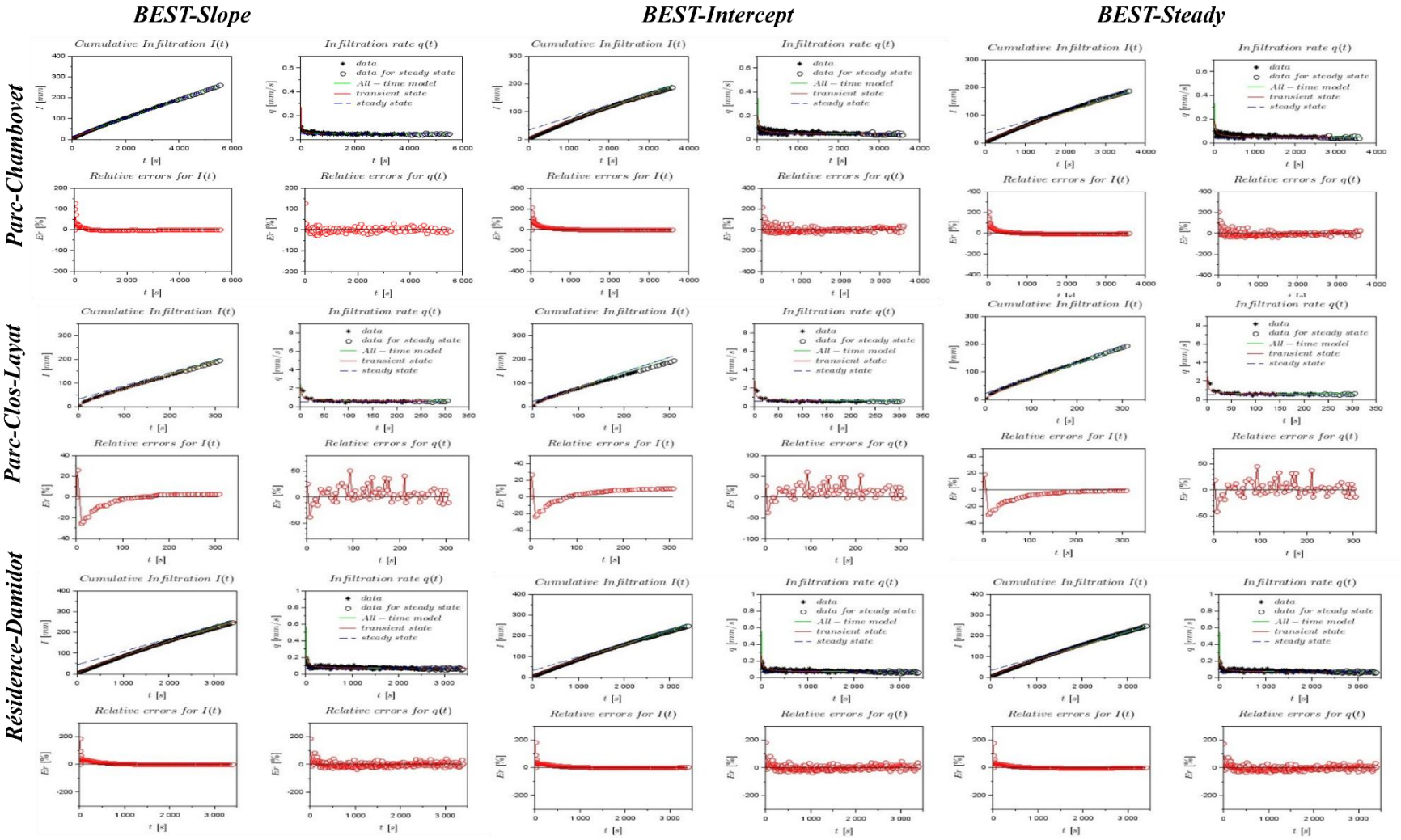


Figure IV-40. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST versions BEST-Slope, Intercept et Steady pour les sites Parc-Chambovet (PC), Parc-Clos-Layat (PCL) et Résidence-Damidot (RD). Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

Il en est de même pour le site de la Résidence Damidot. Les simulations I(t) reproduisent fidèlement les observations expérimentales, avec une excellente corrélation temporelle. Le débit $q(t)$ décroît de manière continue et tend vers une valeur asymptotique entre 300 et 350 secondes, suggérant une transition rapide vers un régime permanent. Les écarts restent contenus : 4,9 % pour BEST-Slope, 5,6 % pour BEST-Steady, et 7,2 % pour BEST-Intercept, avec une très faible dispersion inter-algorithme. Ce site constitue ainsi un cas exemplaire où la combinaison entre conditions physiques favorables et performance instrumentale atteint un degré d'ajustement optimal.

À l'opposé, le site du Parc Clos Layat présente des ajustements plus hétérogènes. Si la courbe simulée par BEST-Slope reste relativement fidèle à la dynamique d'ensemble, une déviation notable apparaît au démarrage de l'essai, avec des erreurs moyennes atteignant 11,3 % et des sursauts dépassant 17 %. Les performances de BEST-Intercept sont encore plus dégradées, avec des divergences pouvant atteindre 24,8 %, notamment dans les phases initiales où l'ajustement peine à suivre les ruptures de pente observées. BEST-Steady, quant à lui, présente un comportement intermédiaire, avec une erreur moyenne proche de 13,5 %, mais une incapacité à modéliser correctement les flux en régime transitoire. Néanmoins, les ajustements restent corrects.

IV.3.4.1.2 Variantes BEST-WR et BEST-WR3T

L'analyse des résultats montre que sur le site Parc Chambovet, l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée $I(t)$ est très correct pour les trois variantes classiques (BEST-Slope, BEST-Intercept, et BEST-Steady) (Figure IV.40). Par ailleurs, la variante BWR et BWR3T restitue correctement la tendance observée au niveau des trois premières variantes, avec néanmoins une erreur moins aléatoire et plus auto corrélée que dans le cas précédent (Figure IV.41). L'ajustement avec BEST-WR3T est nettement moins bon avec une erreur systématique.

Pour le Parc Clos Layat, l'algorithme BEST présente des ajustements intéressants de même pour BWR qui arrive à suivre la dynamique générale malgré des écarts observés au début de l'expérimentation. La variante BWR3T affiche des divergences, avec des erreurs de l'ordre de 20%. Quant à la résidence Damidot, nous constatons que les différentes méthodes produisent des observations parfaitement bien ajustées autour des erreurs de 5-7%. Dans un tel sol, l'intérêt d'utilisation des méthodes BWR et BWR3T n'est pas significatif par rapport aux variantes classiques car le phénomènes d'hydrophobicité et peu marquée et donc les variantes classiques peuvent permettre un traitement efficace. On peut néanmoins noter une légère convexité en début de parcours pour la courbe d'infiltration illustrée pour le parc Clos Layat.

On note donc que le gain de l'emploi des variantes BEST-WR et BEST-WR3T est relativement restrient du fait que ses variantes ont été développées les sols hydrophobes induisant des courbes d'infiltration convexes typiques. Dans notre cas, avec des courbes concaves représentatives d'infiltration en conditions usuelle, leurs spécificités n'apportent pas d'amélioration importante en considérant les variables de base.

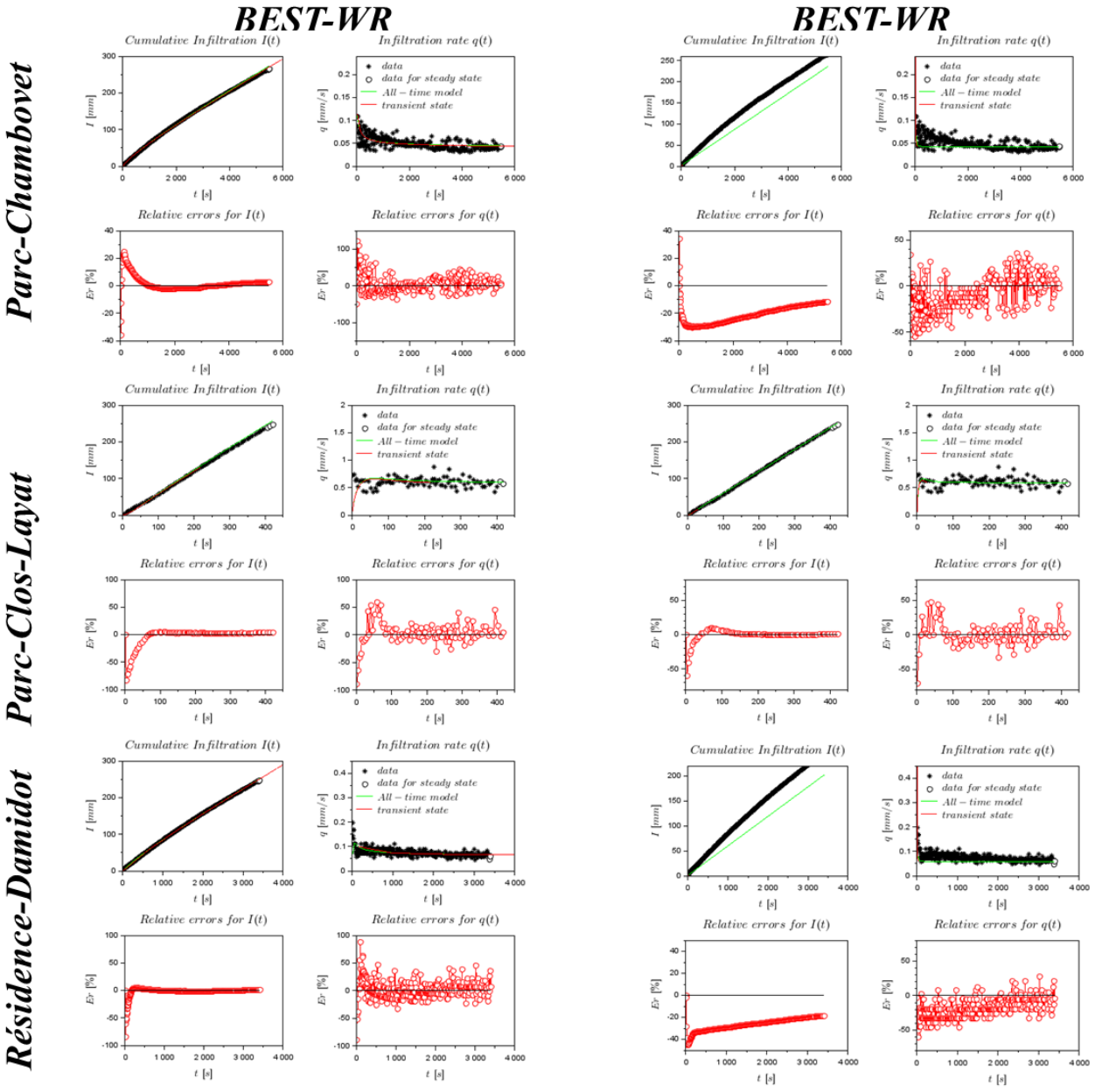


Figure IV-41. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST versions BEST-WR et WR3T pour les sites Parc-Chambovet (PC), Parc-Clos-Layat (PCL) et Résidence-Damidot (RD). Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%).

IV.3.4.2 Estimation des paramètres BEST sur les sites Cristalline, Coste et Friche Décines-Charpieu

IV.3.4.2.1 Variantes classiques BEST-Slope, Intercept, et Steady

L'examen des performances des algorithmes BEST sur le second groupe de sites Cristalline, Coste et Friche Décines met en évidence des contrastes notables en matière de robustesse, tant au niveau de l'infiltromètre automatisé que des méthodes d'ajustement (Figure IV.41). Globalement, BEST-Slope se distingue par sa capacité à reproduire fidèlement la courbe d'infiltration cumulée $I(t)$, même dans des conditions de forte perméabilité comme observé à Christalline. La superposition entre les données expérimentales et modèle est très satisfaisante, traduisant une stabilité de l'ajustement et des écarts relatifs inférieurs à 5 % durant la quasi-totalité de l'essai. Concernant le flux instantané $q(t)$, la correspondance reste bonne, bien que des divergences légères soient perceptibles en début d'essai, souvent dues à la sensibilité du modèle à la pente initiale.

En revanche, dans des environnements plus hétérogènes tels que le site de Coste, BEST-Intercept montre quelques limites (Figure IV.41). Si la courbe d'infiltration cumulée conserve une forme globalement conforme à l'observation, la dynamique du flux $q(t)$ présente des divergences marquées, notamment en tout début d'essai. Ces écarts, ponctuellement supérieurs à 10 % entre 50 et 100 secondes, révèlent un ajustement moins bon. Les ajustements sont ensuite meilleurs pour le reste de l'infiltration. On peut aussi relier ce résultat à l'absence de concavité des courbes, résultant potentiellement des effets localisés d'hydrophobicité ou du faible contraste entre teneurs en eau initiale et finale.

De son côté, l'algorithme BEST-Steady présente les mêmes biais en régime transitoire (Figure IV.41). Néanmoins, la méthode présente des ajustements globalement très satisfaisants, tant pour $I(t)$ que pour $q(t)$, avec des erreurs relatives ne dépassant pas 5 % pour la plus grande partie de l'essai. Cependant, dans des sols très perméables, avec des infiltrations vraiment linéaires, la qualité de l'ajustement se dégrade (ex. Figure IV.41, Friche). On observe alors une dérive croissante du modèle, en particulier en fin de test, où les erreurs sur $q(t)$ peuvent approcher les 10 %. Une sous-estimation récurrente du débit en régime permanent suggère une mauvaise évaluation du flux asymptotique dans ces cas.

En conclusion, ces observations soulignent que la performance des différents algorithmes varie en fonction du contexte pédologique et du régime d'infiltration. BEST-Slope fait preuve d'une adaptabilité remarquable, même sur des sols très perméables produisant des courbes d'infiltration cumulées linéaires. BEST-Intercept et BEST-Steady donnent lieu à des ajustements proches et légèrement moins bons que BEST-Slope, notamment pour les courbes d'infiltration cumulées linéaires.

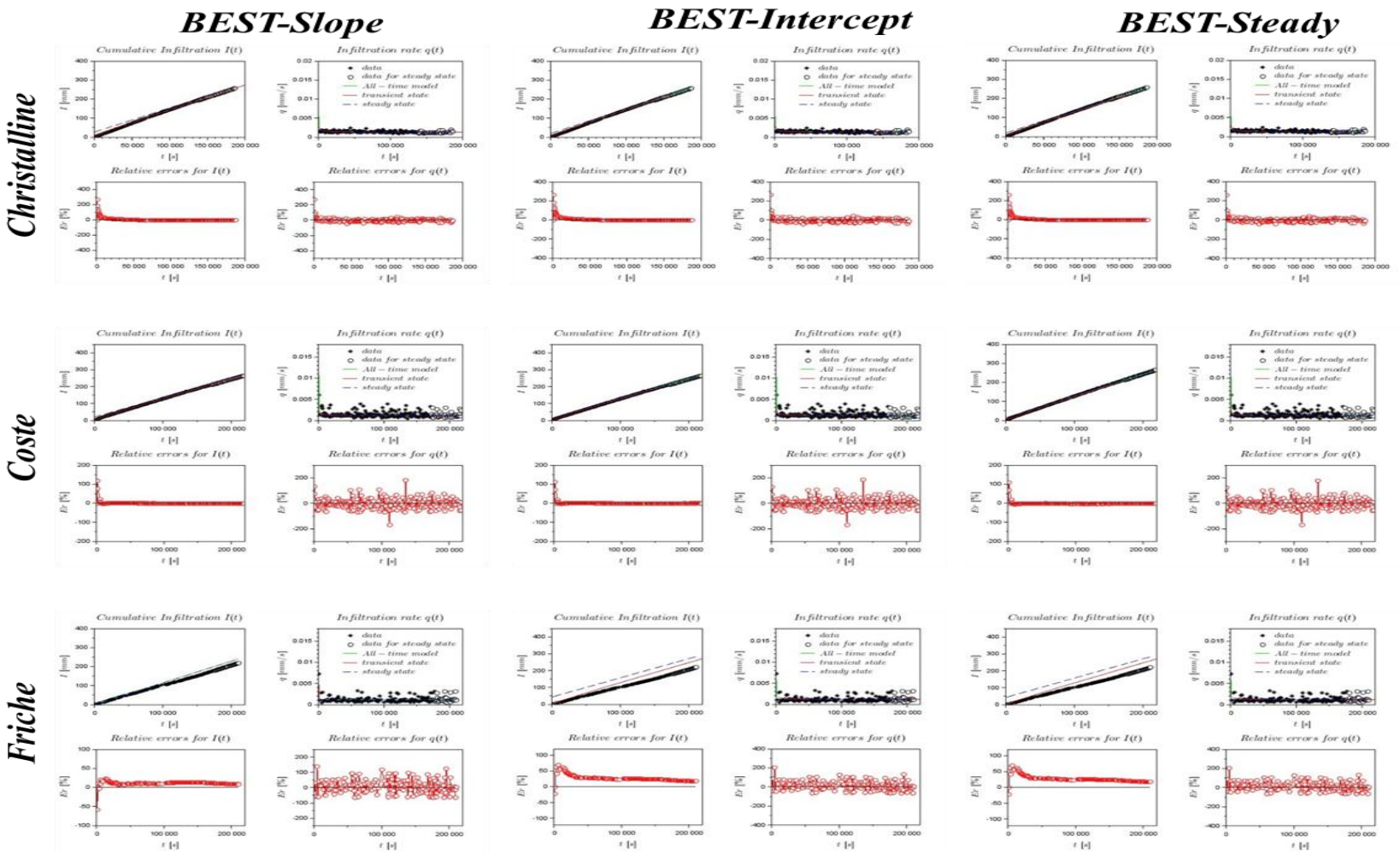


Figure IV-42. Résultats de toutes les versions de l'algorithme BEST versions BEST-Slope, Intercept et Steady pour les sites Coste, Friche et Christalline. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

IV.3.4.2.2 Variantes BEST-WR et BEST-WR3T

Après l'analyse des trois premières variantes de l'algorithme BEST pour ces trois sites, nous analysons aussi les variantes restantes développées pour le cas des sols hydrophobes. Pour BEST-WR, certains ajustements sont corrects, mais certaines données infiltrométriques sont assez mal ajustées (Figure IV.42, cas de Coste). Dans ce cas, la méthode BWR globalement est marquée par une surestimation de l'infiltration cumulée et du taux d'infiltration en régime permanent. Les écarts relatifs constatés sur la courbe $q(t)$ dépassent souvent les 10%. Une telle situation explique la difficulté avec le modèle à appréhender normalement la dynamique d'écoulement dans certains cas.

Quant à la dernière variante BWR3T, elle produit une amélioration des ajustements pour le régime permanent et en tendance globale (Figure IV.42). Les écarts relatifs sont réduits avec des valeurs qui ne dépassent pas les 5%, en régime permanent. Le modèle parvient à restituer aussi la forme de la courbe $q(t)$. En revanche, la phase transitoire est moins bien représentée. Là où le modèle prédit une augmentation progressive tu taux d'infiltration, les données révèlent une atteinte du taux d'infiltration final nettement plus rapidement (Figure IV.42, BWR3T). Il en résulte une sous-estimation systématique du taux d'infiltration et ainsi de l'infiltration cumulée.

Globalement, la performance des différents algorithmes présente une variation en fonction du contexte pédologique et du régime d'infiltration. En considérant l'algorithme BEST-Slope, cette méthode a une capacité d'adaptabilité remarquable et cela est possible même pour des sols avec une forte perméabilité. Pour l'algorithme BEST-Intercept, elle donne de bons résultats mais est un peu moins fiable dans des situations un peu plus complexes. L'algorithme BEST-Steady s'aligne pas mal sur l'algorithme BEST-Intercept en termes d'ajustements. Enfin, la comparaison entre les méthodes BEST-WR et BEST-WR3T met en évidence une sous-estimation du taux d'infiltration et de l'infiltration cumulée par BWR3T notamment en régime transitoire, qui confirme la nécessité d'une sélection bien réfléchie du modèle, basée sur l'analyse des erreurs d'ajustement mais aussi de la plausibilité des valeurs estimées (ce qui est traité par la suite).

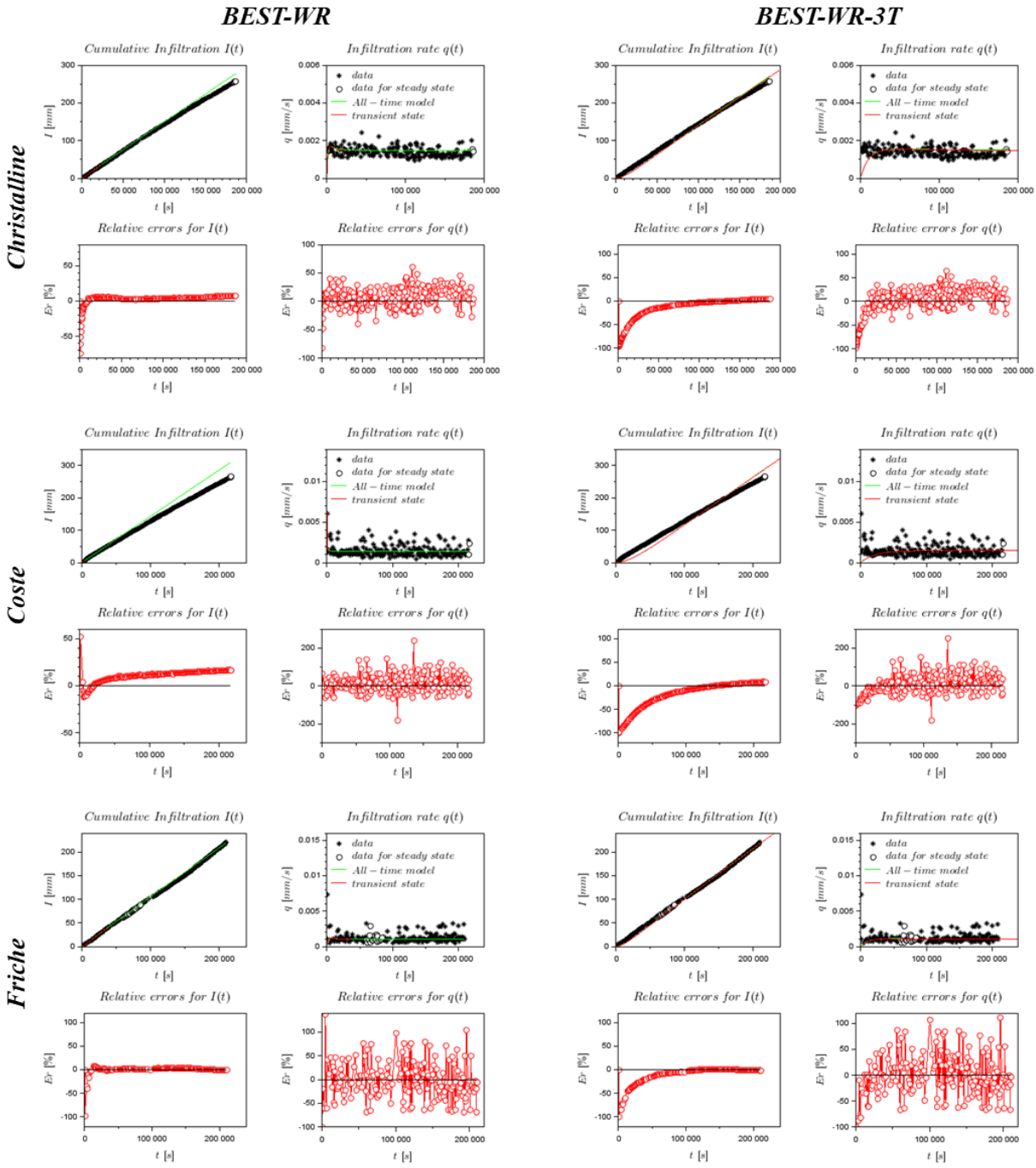


Figure IV-43. Résultats de l'algorithme BEST versions BEST-WR et BEST-WR3T pour les sites Coste, Friche et Christalline. Chaque panel présente l'ajustement des courbes d'infiltration cumulée I(t), du taux d'infiltration q(t) ainsi que les erreurs relatives correspondantes Er (%)

IV.3.4.3 Etude des estimations BEST

IV.3.4.3.1 Estimation de la conductivité hydraulique à saturation

L'analyse de la régression linéaire du paramètre Ks des différentes méthodes BEST, présente une très bonne concordance entre les valeurs estimées et les valeurs de référence pour toutes les variantes exception faite de BST-WR (Figure IV.43). En détaillant méthode par méthode, les premières variantes

de l'algorithme BEST, BEST-Slope, BEST-Intercept et BEST-Steady, présentent une très bonne concordance avec les valeurs de référence. BEST-Slope présente les meilleurs résultats avec les points proches de la droite 1 :1 et une droite de régression quasiment alignée sur la droite 1 : 1 (Figure IV.43). Pour les trois variantes classiques, les droites de régression sont très proches de la droite 1 :1, tel qu'attesté par la valeur de leur ordonnée à l'origine et de leur pente (Tableau IV.19).

Tableau IV-21. Ordonnée à l'origine (b, mm/h) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre K_s. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro.

Ks_reg	b	a
_BS	0.003318	**0.9728**
BI	-0.004258	**0.9391**
BSst	-0.003359	**0.9261**
BWR	-0.004990	**0.4908**
BWR3T	0.002306	**1.001**

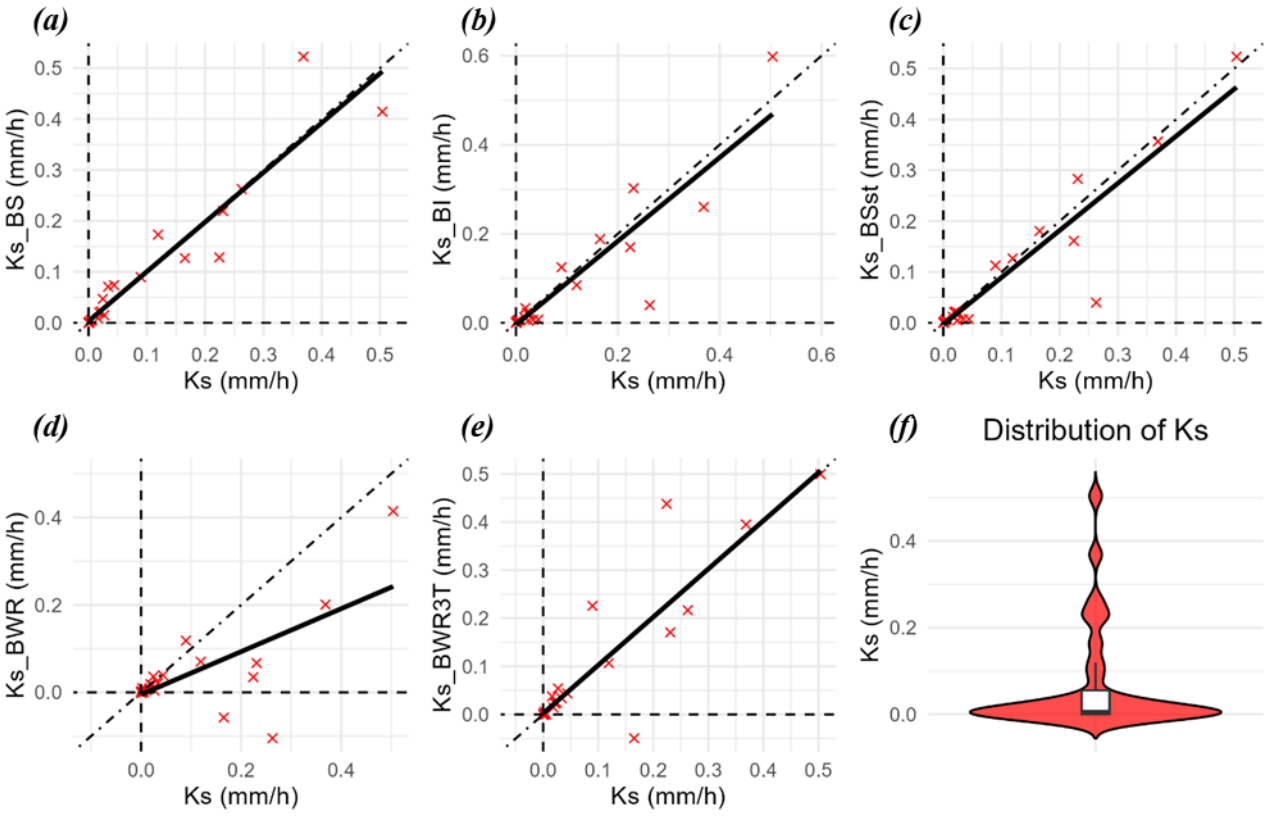
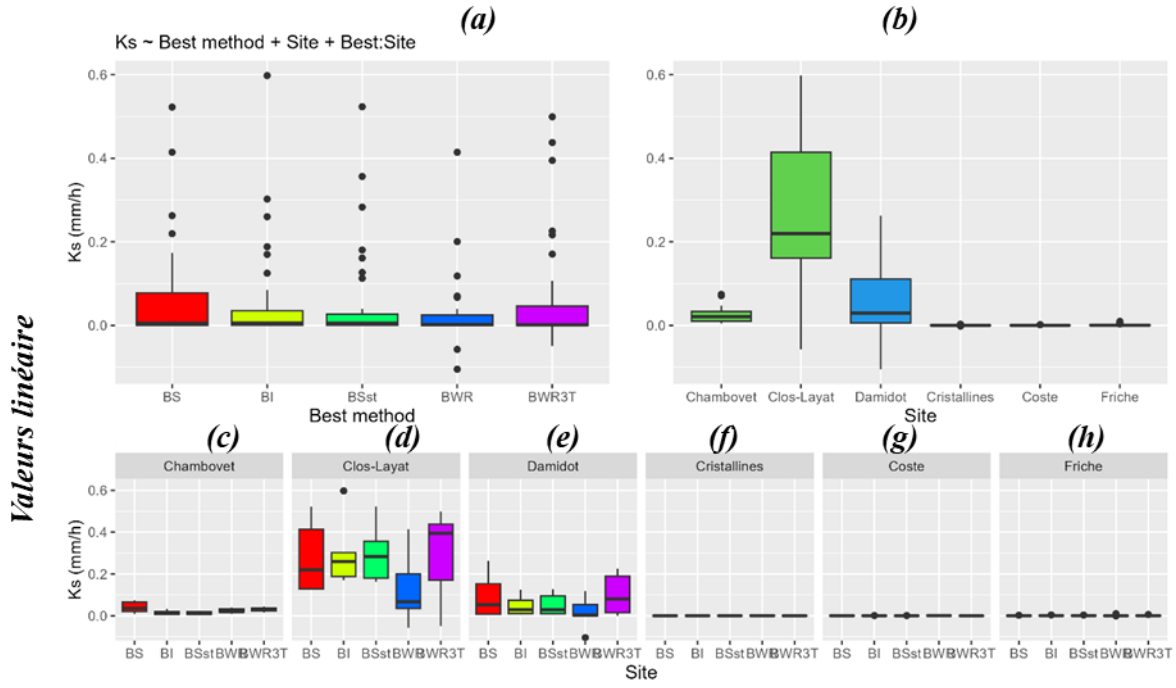


Figure IV-44. Valeurs de $\boldsymbol{K_s}$ obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence $\boldsymbol{K_s}$.et droites de régression.

L'algorithme BEST-WR présente de bien moins bons résultats et est marquée par une sous-estimation significative, avec une majorité de points sous la droite 1 : 1. On note aussi un certain nombre de

valeurs inappropriées et notamment négatives, ainsi qu'une forte dispersion des valeurs autour de la droite de régression. Cette dernière a une pente bien inférieure à 1 (Tableau IV.19), en accord avec la sous-estimation systématique de Ks. Quant à l'algorithme BEST-WR3T, nous constatons une tendance très bonne entre les valeurs de référence et les valeurs estimées avec une droite de régression confondue avec la droite de référence (1 : 1). On note néanmoins quelques valeurs négatives prédites par cette méthode. Enfin, la dernière sous-figure de la Figure IV.43 illustre la distribution des valeurs de référence K_s. Cette dernière présente une asymétrie avec la présence de plusieurs renflements du violon, correspondant à des modes de valeurs différentes qui pourraient correspondre aux textures différentes rencontrées sur les différents sites d'expérimentation. Par ailleurs, on note aussi un mode important correspondant à des valeurs situées sous la médiane et un seuil de 0.1mm/h.



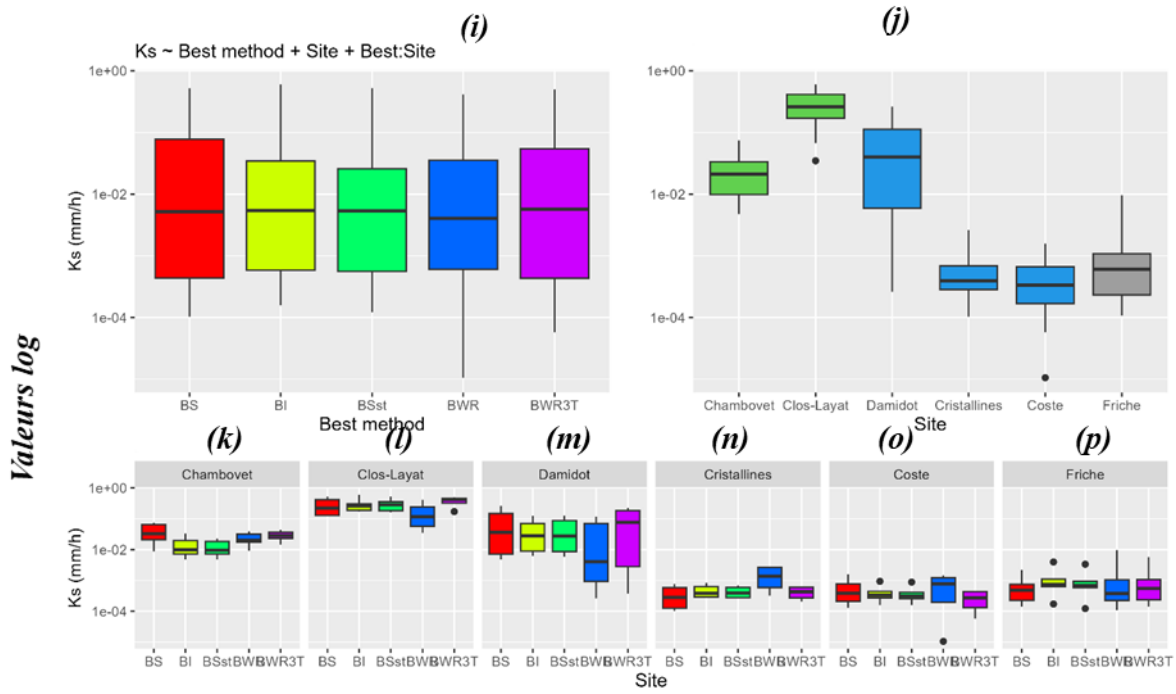


Figure IV-45. Valeursde Ks en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), du site (S1, S2, S3, et S4) et valeurs en fonction de la version sur tous les sites) ; échelles linéaires en haut et log en bas

Une analyse de variance a été conduite pour étudier la variabilité de Ks avec la variante BEST, le site considéré et l'interaction variante : site. Les résultats sont décrits dans le Tableau IV.20 et les résultats sont présentés dans la Figure IV.44 avec les échelles linéaires et les échelles log. On peut noter que l'échelle log convient bien mieux et permet de voir l'ensemble des données pour tous les sites. En revanche, l'échelle linéaire présente des résultats très écrasés pour les sites Cristalline, Coste et Friche en raison des très faibles valeurs observées sur ces site. L'ANOVA étant un modèle linéaire, nous avons tenu à garder la représentation graphique des résultats avec l'échelle linéaire.

Tableau IV-22. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour K_s en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

AOV2-Ks	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p-value
variante	4	0,03705	0,009263	1,423	0,2278
site	5	1,319	0,2639	40,73	**4,825E-25**
Variante : site	20	0,1029	0,005147	0,7943	0,7165
résidus	130	0,8424	0,006480		

Les résultats statistiques montrent que la valeur de K_s dépend très fortement du site étudié, avec une probabilité critique de 4.825 10^{-25} très largement inférieure à 0.05. Ce résultat semble bien évident quand on regarde la Figure IV.44b (échelle linéaire) ou e (échelle log). On note que les valeurs obtenues

sur les sites Cristalline, Coste et Friche sont de plusieurs ordre de grandeurs inférieures aux données obtenues sur les deux parcs Chambovet et Clos Layat et sur la résidence Damidot. En revanche, les valeurs de Ks ne dépendent pas significativement de la variante employée. On note en effet de très faibles écarts entre variante en comparaison de la variabilité autour des valeurs médianes (Figure IV.44b (échelle linéaire) ou e (échelle log). Enfin, les résultats statistiques indiquent une interaction variante : site non significative, avec une probabilité critique de plus de 70% ($p = 0.7165$, Tableau IV.19). Ce résultat semble indiquer que l'effet « variante » est indépendant du site. C'est bien ce qui est illustré avec la Figure IV.44c (échelle linéaire) et f (échelle log). On observe en effet qu'aucune différence significative n'apparaît entre variante, quel que soit le site. Si on peut noter des écarts entre méthode sur certains sites et si ces écarts ne sont pas forcément les mêmes d'un site à l'autre, ils ne sont en aucun cas significatif. En d'autres termes, toutes les variantes sont globalement statistiquement équivalentes.

IV.3.4.3.2 Estimation du paramètre d'échelle du potentiel de pression d'eau

Tout comme pour K_s, on étudie ici l'effet variante sur les résultats d'estimation. L'analyse graphique des régressions linéaires des valeurs estimées par chaque variante en fonction des valeurs de référence montre des résultats contrastés (Figure IV.45). La toute première variante de l'algorithme BEST, BEST-Slope, présente tout autant de cas due surestimation que de sous-estimation, et la droite de régression est totalement confondue avec la droite 1 : 1. On en déduit que cette variante produit des estimations très proches de valeurs de référence. Les deux autres variantes classiques, BEST-Intercept et BEST-Steady, présentent des résultats moins bons, avec plus de sous-estimation que de surestimation (en nombre). Leur droite de régression est logiquement située sous la droite 1 : 1, avec une pente bien inférieure à 1 (Tableau IV.21).

Tableau IV-23. Ordonnée à l'origine (b, mm) et pente (a) des droites de régression entre les algorithmes et les valeurs de référence pour le paramètre h_g. Les données apparaissant en gras sont significativement différentes de zéro.

h_g_reg	b	a
BS	-6,790	**1,005**
BI	-90,34	**0,5878**
BSst	-90,27	**0,5878**
BWR	-131,4	1,287
BWR3T	-187,8	0,3055

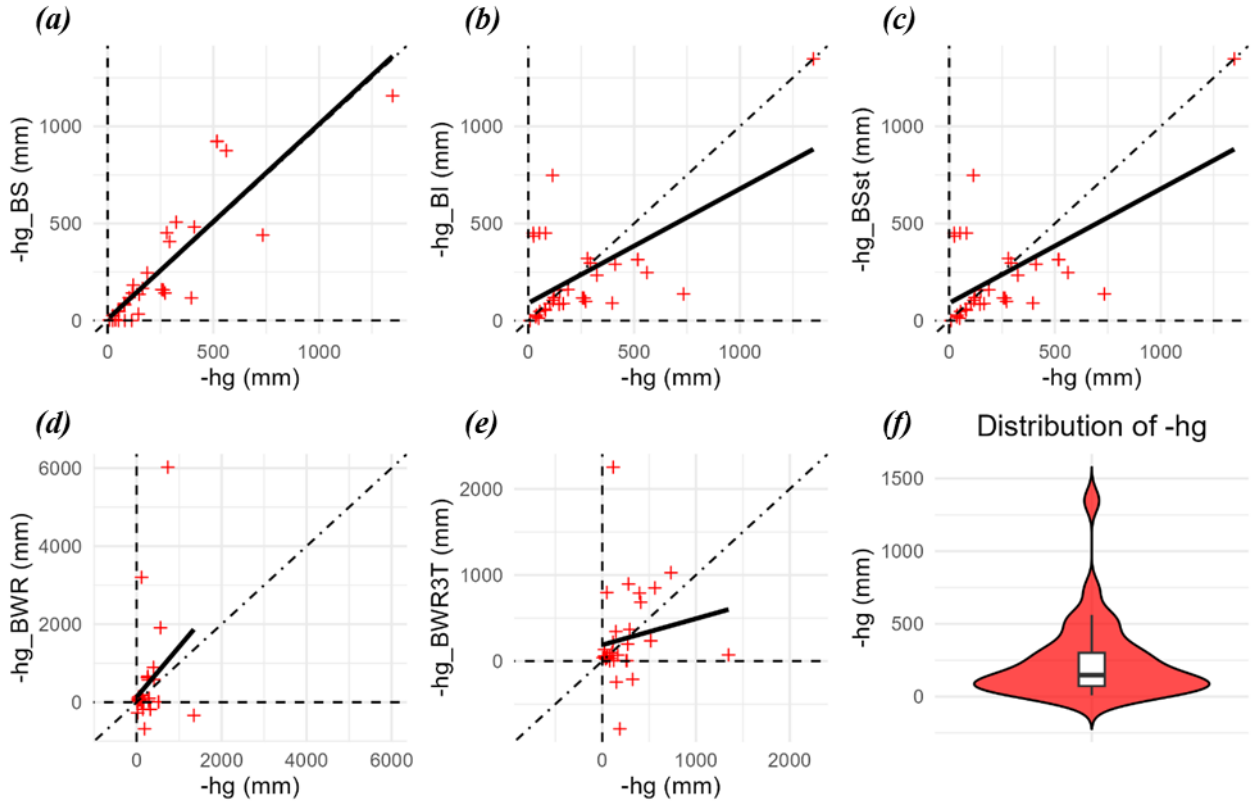


Figure IV-46. Valeurs de h_g obtenues par les différents algorithmes BEST en fonction des valeurs de référence h_g.et droites de régression.

La méthode BWR présente une grande dispersion dans les valeurs. Si le nombre de sous-estimation est comparable au nombre de surestimation, et si la droite de corrélation est finalement assez proche de la droite 1 : 1, la majorité des estimations sont très éloignées des valeurs de référence. Enfin, la variante BWR3T produit aussi des données très dispersées et très éloignées des valeurs de référence. La droite de régression est particulièrement mauvaise, avec une ordonnée à l'origine importante (en valeur absolue) et proche d'être significative et une pente de 0.30 et donc bien inférieure à 1.

Tableau IV-24. Résultats d'analyse de variance (ANOVA) pour h_g en fonction de différents facteurs considérés, degrés de liberté (Df), somme des écarts au carrés (Sum Sq), moyenne des écarts au carré (Mean Sq), value de la variable de Fisher (F value) et enfin probabilité critique (p-value)

AOV2-hg	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p-value
version	4	1042518	260629	0,6810	0,6063
site	5	5626698	1125340	2,941	**0,01506**
version : site	20	7536005	376800	0,9846	0,4849
résidus	130	49750014	382692		

Pour terminer, l'analyse de la distribution de h_g (Figure IV.45f) est caractérisée par une importante asymétrie, avec la présence de plusieurs modes, qui pourraient, tout comme pour K_s, révéler des sites avec des sols de textures et propriétés hydrodynamiques contrastées.

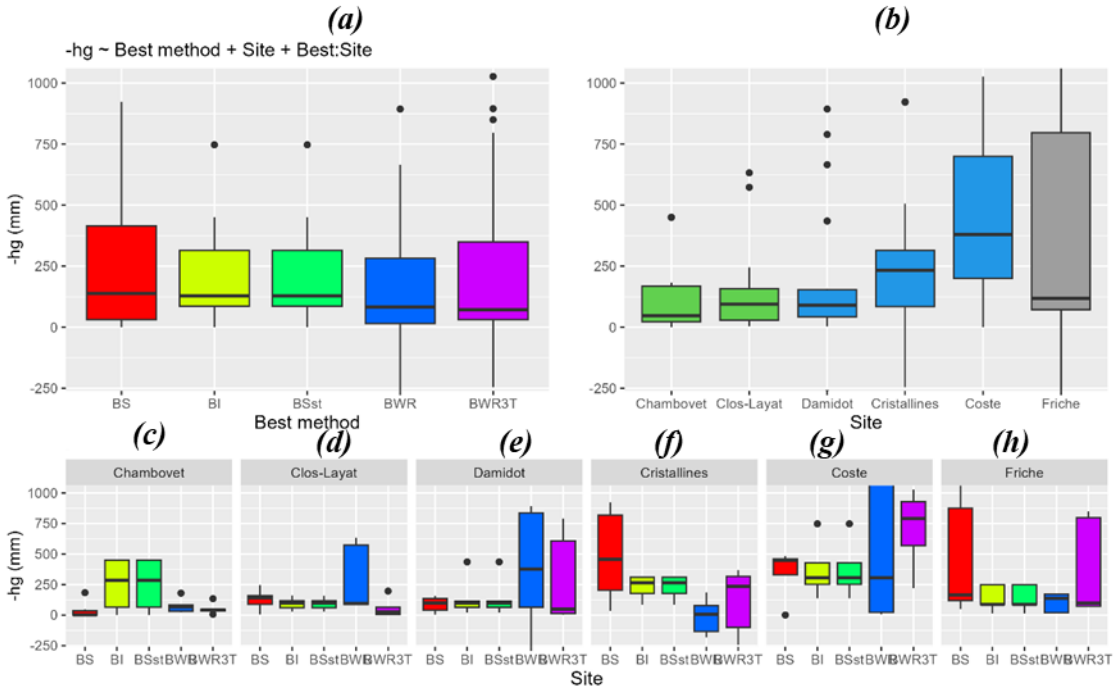


Figure IV-47. Valeurs de h_g en fonction de la version (BEST-Slope, BS, BEST-Intercept, BI, BEST-Steady, BSst, BEST-WR, BWR et BEST-WR3T, BWR3T), des sites investigués et valeurs en fonction de la version sur tous les sites)

Les résultats de l'ANOVA-2 sont synthétisés dans le Tableau IV.22. On note que l'effet site est évident, avec une probabilité critique de 0.015 et donc bien inférieure à 0.05. L'effet site est relativement évident avec des médianes différentes selon les sites. Néanmoins, on note que la différence de médianes est du même ordre de grandeur que les dispersions autour des médianes, notamment pour les sites Coste et Friche, avec des écarts inter quartiles importants (Figure IV.46c). En revanche, la différence entre médianes est bien inférieure à la dispersion intra variante, ce qui explique pourquoi l'effet variante est négligeable, avec une probabilité critique de 0.60 et donc bien supérieure à 0.05. Enfin, l'interaction variante : site est assignée une probabilité critique bien au-dessus de 0.05 ($p = 0.485$), ce qui semble dire que l'effet variante ne dépend des sites. On note en effet que pour tous les sites, l'effet variante semble non significatif (Figure IV.46c). En revanche, on obtient quand même des résultats contrastés en fonction des sites. Par exemple, les sites Cristallines, Coste et Friche ont des dispersions intra-variante nettement plus importantes que pour les deux parcs Clos Layat et Chambovet.

IV.3.4.3.3 Analyse de la normalité des distributions

Par la suite, nous vérifions la normalité ou la log-normalité des distributions des estimations de chaque variante. On rappelle que l'application de tests paramétriques, et en particulier l'ANOVA, requiert en théorie la normalité des distributions. À cette fin, un test de normalité a été réalisé à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov, soit sur les valeurs brutes soit sur les valeurs log-transformées. Recourir à la loi log-normale est courant dans l'analyse des propriétés hydrauliques des sols, en raison de la nature intrinsèquement asymétrique de certaines variables comme la conductivité hydraulique à saturation (K_s) ou la pression d'entrée d'air (h_g). Cette transformation permet d'atténuer les effets de dispersion extrême et de rendre les données compatibles avec les hypothèses de variance homogène et de normalité sous-jacentes aux tests statistiques paramétriques. L'évaluation de la normalité et log-normalité des distributions a été effectuée pour K_s et h_g pour toutes les variantes de l'algorithme BEST. Les valeurs de probabilité critique (p-value) sont synthétisées dans le Tableau IV.23 et les droites de Henry sont représentées dans la Figure IV.47.

Tableau IV-25. Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov pour hg, log10(-hg), Ks et log10(Ks), p-value, pour toutes les versions ainsi que les valeurs concaténées servant de référence (val. De référence) ; les valeurs indiquant une différence significative (i.e., < 0.05) sont en gras.

Algorithme	h_g	$Log_{10}(-h_g)$	K_s	$Log_{10}(K_s)$
BS	**0,01420**	0,13581	**0,01112**	0,62553
BI	**0,07553**	0,35375	**0,00108**	0,57805
BSst	**0,07553**	0,35375	**0,00022**	0,46701
BWR	**0,00433**	0,79543	**0,00489**	0,88575
BWR3T	**0,04512**	0,89912	**0,00266**	0,16168
Val. de référence	0,19860	0,67501	**0,00245**	0,43285

L'analyse des résultats du test de Kolmogorov-Smirnov appliqué aux paramètres hydrodynamiques met en évidence des différences notables selon les méthodes BEST considérées et les types de données (brutes ou transformées). Pour la conductivité hydraulique à saturation (K_s), les valeurs brutes présentent une tendance marquée à l'asymétrie, pour toutes les variantes considérées, donnant lieu à un écart significatif entre les fractiles estimés et les droites de Henry (Figure IV.47). Les valeurs de probabilité critique (p-value) correspondantes sont bien inférieures au seuil de 0.05 (Tableau IV.23, colonne K_s), confirmant un écart significatif à la loi normale. Ce résultat justifie pleinement le recours à une transformation logarithmique, après laquelle les distributions deviennent normales. Les fractiles estimés s'alignent plus nettement sur les droites de Henry (Figure IV.47) et les valeurs de probabilité critiques deviennent toutes bien supérieures au seuil choisi de 0.05.

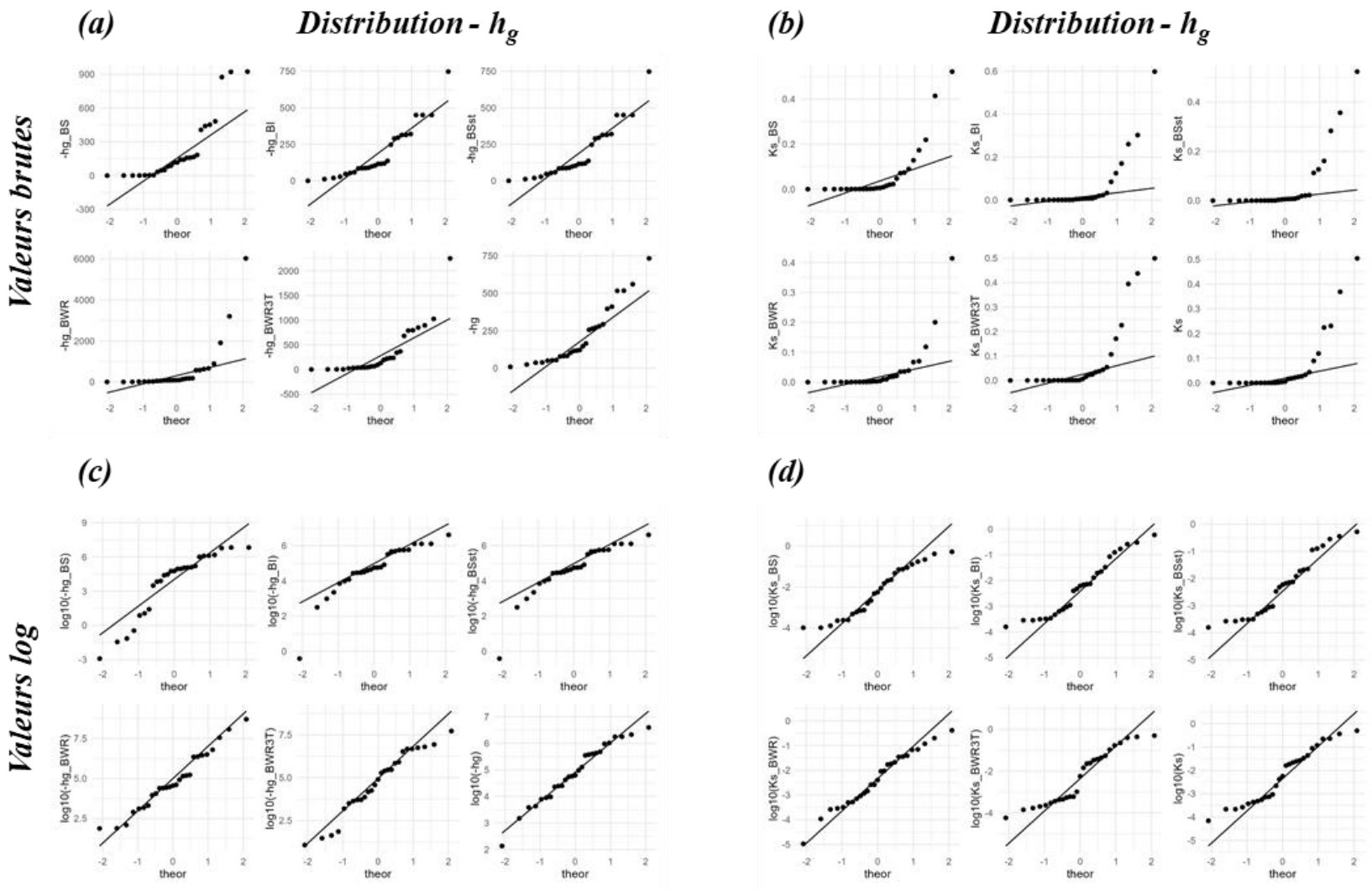


Figure IV-48. Droite de Henry et distributions des valeurs de hg et Ks, en version brute et log.

Pour le paramètre h_g, la situation ressemble au cas de K_s. Les distributions des estimations s'écartent des droits de Henry, certes dans une moindre mesure que K_s, mais cela est tout de même visible (Figure IV.47). En revanche, le passage aux données log-transformées permet d'améliorer la situation, avec un alignement des distributions sur les droites de Henry. Parallèlement, les valeurs de probabilité critique s'écartent de la valeur seuil de 0.05, attestant de distributions normales. Ainsi, les données log-transformées étant gaussiennes, on en déduit que h_g et K_s peuvent être représentées par des lois log-normales.

Ces observations mettent en lumière deux points importants. D'une part, la transformation logarithmique est non seulement justifiée, mais nécessaire pour créer des variables normales en vue d'appliquer des méthodes statistiques valides. D'autre part, elles illustrent la robustesse relative du paramètre h_g, qui se révèle moins sensible aux biais de distribution. En conclusion, cette étape de vérification renforce la rigueur des analyses statistiques proposées. Elle permet d'ajuster correctement les méthodes d'inférence en fonction du comportement statistique des données, tout en tenant compte de la spécificité de chaque paramètre hydrodynamique et des hypothèses sous-jacentes aux modèles BEST.

IV.3.5 Synthèse et discussion – axe 3

IV.3.5.1 Synthèse des données infiltrométriques et des paramètres hydrodynamiques estimés sur l'ensemble des sites

La comparaison des résultats obtenus sur deux ensembles de sites urbains permet de dégager des tendances claires concernant la robustesse de l'infiltromètre automatisé Beerkan et la validité des différentes variantes de l'algorithme BEST. Sur les sites à infiltration lente Résidence Damidot, Résidence Coste et Friche, les courbes d'infiltration cumulées révèlent une réponse majoritairement matricielle, propice à des conditions d'essai stables. Dans ce cadre, le dispositif automatisé se montre particulièrement fiable : les séries de données sont complètes, bien résolues en termes de représentations des régimes transitoire et permanent, sans artefacts ni interruptions. Les ajustements réalisés avec les méthodes BEST affichent des erreurs relatives très faibles (souvent $< 5\,\%$), révélant des modélisations appropriées. Dans ces contextes favorables, et en l'absence d'hydrophobicité, les trois variantes classiques de BEST-Steady sont tout à fait adéquates, alors que les deux algorithmes nouveaux ne présentent pas d'intérêt dans la mesure ou les courbes ne présentent en général pas de convexité.

A contrario, les sites du second groupe, Parc Clos Layat, Parc Chambovet et Résidence Cristalline, se caractérisent par des infiltrations souvent rapides et instables, révélatrices de phénomènes d'écoulements préférentiels ou de structures pédologiques favorisant des régimes transitoires complexes. Ces conditions mettent davantage à l'épreuve la robustesse du dispositif et de l'application de l'algorithme BEST. Néanmoins, l'infiltromètre automatisé conserve une fiabilité d'ensemble. Globalement, les données sont continues, bien résolues temporellement, et ne présentent pas de défauts notables d'acquisition. Toutefois, la variabilité accrue des flux constitue un défi pour l'algorithme BEST, ce qui se traduit par des erreurs relatives plus marquées sur certains ajustements. Dans ces situations complexes, BEST-Slope semble démontrer une plus grande robustesse, capturant plus facilement les pentes initiales marquées et la forme globale des courbes.

Enfin, les tests se sont déroulés en période hivernale, se traduisant par des teneurs en eau initiales élevées (Tableau IV.17). On note, dans le jeu de données l'absence de courbes fortement convexes (Figure IV.38) telles qu'observées pour les axes 1, notamment. On comprend donc bien que, dans ces conditions, l'emploi des deux méthodes BEST-WR et BEST-WR3T n'apporte pas de bénéfice particulier. La variabilité des estimations obtenues avec ces deux méthodes atteste par ailleurs de la difficulté de ses dernières à trouver les valeurs de référence.

Cette double évaluation algorithmique et instrumentale permet de conclure que l'infiltromètre automatisé Beerkan s'adapte efficacement à une diversité de régimes d'infiltration, qu'ils soient lents ou rapides. Sa capacité à produire des données fiables, y compris dans des contextes complexes, et pour un nombre de site important, constitue un atout majeur pour une application opérationnelle. Une fois l'expérimentation réalisée, le choix de l'algorithme BEST ne change pas drastiquement la donne. Néanmoins, en ces conditions hivernales, avec peu d'hydrophobicité marquée, l'emploi des variantes BEST-WR et BEST-WR3T amène peu de gain. L'interprétation de résultats probants sera facilitée par une utilisation exhaustive de toutes les variantes et une sélection contextuelle rigoureuse des estimations de référence à la lecture de la qualité d'ajustement et du caractère plausible de l'estimation.

Cette étude a donc permis de valider en quelque sorte l'emploi de l'infiltromètre automatisé, en complément souvent de la méthode classique (méthode manuelle). Cette étude a eu un autre intérêt concret. En effet, l'étude des propriétés hydrodynamiques des différents types de zones vertes présents sur la communauté urbaine de Lyon a été menée en parallèle d'une étude de la biodiversité, notamment dans le cadre du projet collectifs.

IV.3.5.2 Lien avec le projet Collectifs

Le projet COLLECTIFS a été initié dans un contexte d'étude de la biodiversité en ville, avec l'idée que, même en milieu urbain, la biodiversité pouvait être importante. Ainsi, le projet avait donc pour

but de : (i) caractériser la biodiversité en milieu urbain par les sciences participatives, (ii) permettre l'exploration de la biodiversité dans les jardins urbains à travers des animations, (iii) illustrer les perceptions et désirs des habitants sur ces espaces verts, (iv) diffuser des ressources communes pour l'élaboration d'actions permettant de favoriser la biodiversité. Ce projet a mobilisé un consortium regroupant divers acteurs lyonnais pour effectuer des mesures de la biodiversité sur un large ensemble de sites verts de la communauté urbaine lyonnaise. Une des composantes de ce projet a investigué le support de cette biodiversité, à savoir le sol. Dans ce contexte, un volet expérimental basé sur des mesures granulométriques et infiltrométriques a été proposé pour corréler les propriétés physiques du sol aux indicateurs de richesse de biodiversité. C'est dans ce contexte que l'axe 3 a été développé. Les données de biodiversités ont été communiquées par nos collègues de l'UMR LEHNA. Ces données concernent pour le moment les communautés de plantes et ont été obtenues pour les 6 sites investigués.

Tableau IV-26. Indicateurs de biodiversité : Indices de biodiversité avec la Richesse Spécifique (RS) par site pour les plantes, et taux d'infiltration moyens, pour les sites de Parc Chambovet (PC), Parc Clos Layat (PCL), Résidence Damidot (RD), les Cristallines (Crist), la résidence Rue Coste (RC), et la friche industrielle (Friche).

RS	PC	PCL	RD	Crist	RC	Friche
RS-plantes cultivées	48	49	65	10	34	21
RS-plantes sauvages	113	145	136	110	123	162
RS-total	161	194	201	120	157	183
RS-transect	42	61	47	50	54	58
h_g (mm)	-56,9	-166,3	-153,2	-324,6	-384,6	-445,0
	(41)	(105)	(147)	(166)	(262)	(543)
K_s (mm/h)	2,64E-02	2,99E-01	8,47E-02	4,27E-04	4,97E-04	8,29E-04
	(1,05E-02)	(1,37E-01)	(9,89E-02)	(2,01E-04)	(3,99E-04)	(7,86E-04)

Le Tableau IV.24 présente une synthèse de la richesse spécifique des communautés végétales, qu'elles soient cultivées ou spontanées, ainsi que de la richesse totale et de celle observée à l'échelle des transects. En termes de biodiversité spécifique totale (RS – total, Tableau IV.24), l'ordre de classement observé est le suivant : Cristallines << Résidence Coste << Parc Chambovet << Friche << Parc Clos Layat << Résidence Damidot. On remarque des valeurs élevées de richesse spécifique dans les sites urbanisés, en particulier au sein des résidences et de la friche industrielle. À l'inverse, certains parcs urbains présentent des valeurs plus faibles. Ainsi, il apparaît que des niveaux élevés de biodiversité peuvent également être observés au pied des immeubles ou dans des friches urbaines laissées à l'abandon.

Nous pouvons à présent chercher à établir un lien entre les indicateurs de biodiversité et les propriétés hydrodynamiques des sols, afin d'examiner la relation entre la structure du sol et la diversité

biologique. L'analyse directe des données présentées dans le Tableau IV.24 ne met pas en évidence de corrélation manifeste entre ces variables. Pour mieux appréhender les éventuelles dépendances, une matrice de corrélation a été élaborée en intégrant l'ensemble des variables considérées : le taux d'infiltration (IR), les paramètres hydrodynamiques tels que le paramètre d'échelle du potentiel de pression (hg) corrélé à la longueur capillaire, la conductivité hydraulique à saturation (Ks), ainsi que les trois indicateurs de richesse spécifique relatifs aux plantes cultivées, aux plantes spontanées et à la richesse totale incluant toutes les espèces. La Figure IV.49 illustre cette matrice de corrélation. Comme attendu, la diagonale présente une corrélation parfaite, chaque variable étant nécessairement corrélée à elle-même. On observe ensuite des corrélations significatives entre le taux d'infiltration et la conductivité hydraulique à saturation, ainsi que, dans une moindre mesure, avec le paramètre hg. Concernant les variables de biodiversité, des corrélations positives marquées sont également observées, ce qui est logique puisque la richesse totale dépend directement des richesses spécifiques des plantes cultivées et spontanées. Enfin, une corrélation positive notable apparaît entre la richesse en plantes sauvages et le paramètre hg, suggérant que des valeurs élevées de ce dernier favorisent l'établissement de la flore spontanée. En dehors de cet aspect, les autres corrélations demeurent moins prononcées.

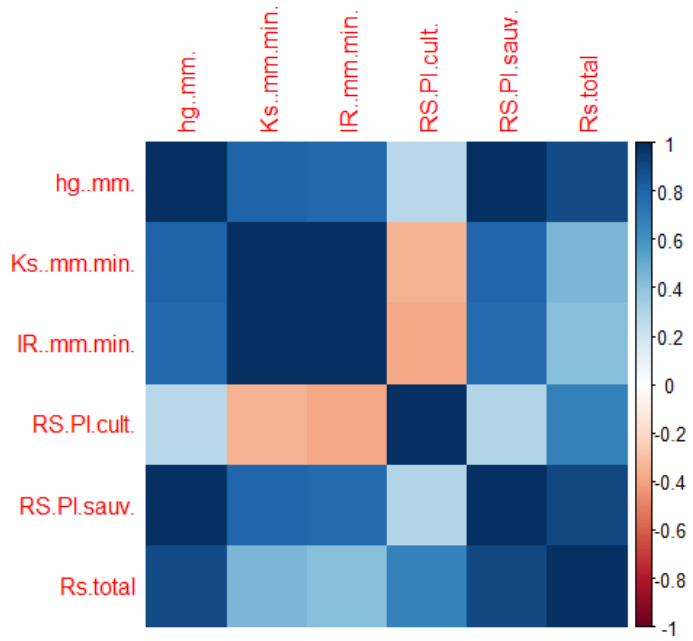


Figure IV-49. Matrice de corrélation entre les différentes variables, paramètres hydrodynamiques, hg et Ks (paramètre de capillarité et conductivité hydraulique), taux d'infiltration IR, richesse spécifique des plantes cultivées "RS.Pl.cult.", plantes sauvages "RS.Pl.sauv.", et indice de richesse spécifique total "RS.total". Code couleur : bleu pour les corrélations fortes positives et rouge pour les corrélations fortes négatives.

La relation étudiée ci-dessus entre paramètres physiques et variables biologiques méritait d'être approfondie. En effet, un certain nombre de pistes d'amélioration apparaissent.

Dans un premier temps, la corrélation entre les mesures infiltrométriques et les données de biodiversité a été limitée aux plantes. A ce titre, plusieurs limites peuvent être soulevées concernant ce type de mesure. En effet, la capacité d'infiltration, telle qu'elle est évaluée, concerne une surface restreinte et ne prend en compte que les systèmes racinaires de dimensions comparables à celles de l'anneau d'infiltration (environ une dizaine de centimètres). Les arbustes et les arbres, dont les systèmes racinaires sont beaucoup plus étendus et composés de racines de plus grand diamètre, ne peuvent ainsi être pleinement intégrés à l'évaluation de la capacité d'infiltration, telle qu'elle a été faite. L'étude de tels systèmes nécessiterait l'emploi de plus grands anneaux plus adaptées aux plus grandes échelles. Cela rejoint l'étude faite à l'axe 2.

Dans un second temps, la biodiversité étudiée ici se limite au compartiment végétal, et ne prend pas en considération la faune ni la macrofaune du sol. Or, les petits animaux, les insectes et d'autres organismes jouent un rôle fondamental dans la structure des sols et leur fonctionnement. Par exemple, le ver de terre, en tant qu'organisme ingénieur du sol, crée un réseau de galeries influençant fortement les écoulements et l'aération. De même, les fourmis participent à la modification de la porosité du sol à travers la construction de leurs galeries. Une analyse plus approfondie, incluant la faune et la macrofaune, serait donc indispensable pour affiner la compréhension des liens entre les propriétés hydrauliques du sol et sa biodiversité, en intégrant l'influence directe des organismes vivants sur ces propriétés.

Enfin, il serait nécessaire aussi de considérer les données physico-chimiques du sol et de les croiser avec les mesures infiltrométriques et les paramètres hydrodynamiques. En effet, les propriétés physico-chimiques, notamment la teneur en matière organique, jouent un rôle essentiel dans la compréhension du comportement hydrodynamique des sols, en particulier en conditions de sécheresse. Bien que les expérimentations menées dans le cadre de cette étude n'aient pas permis de mettre en évidence l'hydrophobicité des sols — en raison des conditions hivernales humides —, de nouvelles campagnes expérimentales réalisées en période estivale pourraient compléter ces observations. Une telle approche, plus intégrative, permettrait d'obtenir une vision plus complète et précise des interactions entre les propriétés physico-chimiques du sol, son comportement hydrodynamique et les processus d'infiltration.

L'axe 3 a permis de valider l'utilisation des infiltromètres automatisés sur un ensemble de sites sélectionnés au sein d'un bassin versant urbain. Leur facilité de mise en œuvre et la possibilité de réaliser simultanément un grand nombre d'essais en font un outil particulièrement pertinent pour la caractérisation des sols à grande échelle. La dernière partie de cet axe a montré que la caractérisation hydrodynamique des sols à large échelle pouvait être corrélée à des données de biodiversité, ouvrant

ainsi des perspectives intéressantes pour la gestion de la biodiversité en milieu urbain. L'étude présentée demeure préliminaire et constitue avant tout une preuve de concept, mais elle représente une première étape prometteuse qui souligne tout l'intérêt de l'approche infiltrométrique.

V Conclusion générale

Cette thèse présente un ensemble de travaux sur la méthode Beerkan et diverses optimisations de dispositifs. Après avoir mené tant d'expérimentation et d'analyses sur les trois axes d'études (validation du dispositif, étude du rayon de la source, déploiement à l'échelle d'un bassin versant urbain), nous avons obtenu des résultats particulièrement intéressants, tant sur le plan scientifique que technique, avec une portée sociétale. Dans le cadre de cette thèse une série d'essais infiltrométriques a été réalisée de façon répétée sur divers terrains sélectionnés en amont dans le cadre des projets COLLECTIFS et ANR INFILTRON.

Pour le premier axe d'étude portant sur l'analyse comparative de la méthode manuelle versus automatisée, les résultats ont permis de statuer sur plusieurs objectifs fixés dans le cadre de ce travail. À travers des analyses basant sur les illustrations des données et les analyses statistiques ainsi que les estimations obtenues avec les algorithmes BEST, nous sommes arrivés à répondre à la question scientifique liée à cet axe d'étude. Dans un souci de bien mener cette étude, nous avons utilisé l'infiltromètre automatisé qui nous a permis d'avoir une amélioration au niveau de la précision et la reproductibilité des mesures. L'utilisation de cette méthode pour l'acquisition des données, réduit significativement les biais d'origine humaine (opérationnelle) et permet de déterminer les paramètres hydrodynamiques, en particulier la conductivité hydraulique à saturation (K_s) et le paramètre d'échelle du potentiel de pression (h_g), avec un niveau de confiance élevé. L'ensemble de ces résultats obtenus dans le cadre de cette étude (le premier axe), confirment l'intérêt de la méthode automatisée dans la mesure où elle produit des résultats du même ordre de grandeur que la méthode Beerkan tout en facilitant l'expérimentation et en permettant son déploiement en grand nombre. Néanmoins, elle nécessité une petite formation de l'opérateur avant déploiement. Les avantages offerts par cette approche représentent une contribution importante, notamment dans le cas des sols présentant des comportements physiques particuliers tels que l'hydrophobicité, le colmatage ou une forte hétérogénéité. Concernant l'hydrophobicité, les travaux menés ont permis de valider les variantes BEST-WR et BEST-WR3T des algorithmes BEST. La méthode manuelle, qui demeure la référence dans ce domaine, reste utile dans les contextes où les moyens sont limités, en raison de son coût réduit et de sa facilité d'opération. Toutefois, elle dépend fortement de la compétence de l'opérateur et demande plus de temps pour son utilisation sur le terrain. Par ailleurs, l'étude de cet axe démontre l'intérêt de combiner les deux types de méthodes Beerkan, classique et automatisée. Enfin, cette étude présente aussi une avancée significative dans la détermination des paramètres hydrodynamiques des sols. Sur le plan sociétal, elle valide l'efficacité de cet outil d'infiltrométrie automatisé qui est un outil robuste et performant dans le cadre de campagne d'infiltration appliquée à la gestion des eaux pluviales

en milieu urbain. Pour donner suite à l'étude de cet axe, il serait pertinent pour les recherches futures de mener des études similaires en tenant compte de l'impact du cycle d'humidification sur le comportement des sols, et d'approfondir la petite différence de résultats obtenus pour les sols hydrophobes.

Le deuxième axe de cette étude s'est intéressé à l'effet de la taille de l'anneau sur l'infiltration de l'eau dans le sol et l'influence sur la prise en compte des écoulements préférentiels au sein des macropores. Pour cet axe, les expérimentations ont été menées avec deux anneaux de dimensions respectives de 7.5cm et de 25 cm de rayon. Elles ont clairement montré l'importance cette considération géométrique dans les études infiltrométriques. Les analyses graphiques nous révèlent une différence nette entre les courbes obtenues avec les deux types d'anneaux. En analysant les courbes infiltrométriques, nous voyons très clairement le petit anneau présente une variabilité par rapport au grand anneau avec des pentes plus raides que celles obtenues avec le gros anneau. Par ailleurs, les analyses statistiques et la modélisation numérique ont permis de mieux comprendre l'effet de la taille de l'anneau. Cette étude confirme que pour un anneau de plus grande dimension, nous avons une probabilité plus élevée pour capter les réseaux de macropores et la réponse est intégrée. Pour le petit anneau, la réponse dépend fortement de la position de l'anneau, avec dépendamment des cas, des infiltrations gravitaires dans un macropores, ou d'autres cas une infiltration gravitaire et capillaire au sein de la matrice. Ainsi, l'anneau avec la plus petite dimension présente une sensibilité particulière aux structures locales du sol, ce qui souligne la nécessité d'adapter la taille de l'anneau suivant les objectifs de l'étude et des propriétés du milieu considéré. L'étude de la capacité d'infiltration en grand requiert l'utilisation du grand anneau, alors que l'étude d'écoulements préférentiels et de leur variabilité spatiale requièrent l'utilisation d'anneaux de plus petites tailles adaptées à la dimension de la structure d'intérêt (ici un macropore, par exemple).

Quant au troisième axe, il a investigué la robustesse de l'infiltromètre automatisé. Les expérimentations ont été menées sur divers sites de la métropole de Lyon, principalement dans le cadre du projet collectif qui explore les liens entre infiltration et biodiversité urbaine. Quelle que soit la nature du sol, qu'il présente une faible ou une forte perméabilité, la méthode automatisée a fourni des données continues, bien résolues et peu affectées par des artefacts. Les tests ont été réalisés en période hivernale, et comme pour les autres axes, le traitement des données a été réalisé avec les algorithmes BEST et d'analyses de variance. Sachant que pour les sols qui ne présentent pas de physiques particulières tels que l'hydrophobicité ou le colmatage, les cinq variantes classiques d'algorithme BEST prouvent qu'elles sont suffisantes pour étudier fidèlement les estimations des courbes expérimentales. Néanmoins, on peut noter que ces variantes doivent être favorisées dans leur domaine de validité et d'application.

Ainsi, les variantes BEST-WR et BEST-WR3T n'ont aucun intérêt si les données ne sont pas convexes. En revanche, elles ont tout leur sens pour des données convexes, et les variantes BEST-Slope, Intercept et Steady ne doivent pas être prises en compte.

Pour terminer sur un plan organisationnel, cette thèse a dû faire face à des difficultés, notamment celles rencontrées sur le terrain et celles liées à la situation sécuritaire en Haïti. Initialement nous prévoyions d'intégrer des essais sur des sols agricoles haïtiens afin d'élargir la portée de l'étude. Les conditions locales nous ont contraint à renoncer à cette partie relative à l'application en contexte agricole pour nous concentrer exclusivement sur les sols urbains et la gestion des eaux pluviales. Malgré ces difficultés, les travaux menés ont permis d'obtenir des résultats solides et cohérents avec les trois axes d'étude. Cette thèse met en évidence la contribution majeure de l'automatisation de la méthode Beerkan et du développement des variantes alternatives de l'algorithme BEST, qui continuent de représenter une voie prometteuse pour la caractérisation hydrodynamique des sols. Ces résultats de thèse ouvrent la porte aussi à la réalisation d'essais à grande échelle, permettant d'acquérir un volume de données plus important et d'accroitre la fiabilité ainsi que la répétabilité des expériences dans des conditions expérimentales bien définies, tout en respectant la complexité intrinsèque des surfaces étudiées.

Finalement, en matière de perspectives, il serait particulièrement intéressant d'approfondir l'étude des sols hydrophobes, surtout en période festivale, et des sols propices aux écoulements préférentiels par des campagnes d'expérimentation à grande échelle. Le couplage des mesures automatisées avec une modélisation numérique plus avancée permettrait de mieux quantifier les contributions matricielles et macroporeuses. En termes de stratégies de gestion durable des eaux pluviales en milieu urbain, l'utilisation à une échelle plus grande de l'infiltromètre automatisé en complément de l'infiltromètre grand anneau fournirait un cadre intéressant pour améliorer de façon significative la précision des caractérisations hydrodynamiques des surfaces d'infiltration (bassins d'infiltration, noues, solutions fondées sur la nature) et d'orienter des décisions adaptées pour la gestion des ouvrages d'infiltration. Enfin, cette thèse s'inscrit ainsi dans un cadre plus général d'innovation méthodologique et technologique en infiltrométrie comprenant un volet dispositif mais aussi modélisation avec, par exemple les deux nouvelles variantes d'algorithmes BEST (BEST-WR et BEST-WR3T), mais aussi de nouvelles variantes adaptées à d'autres physiques. Ce cadre contribuera à termes au développement des outils infiltrométriques et à leur utilisation pour la compréhension des processus physiques et la gestion et la maitrise des flux d'eau en milieu urbain.

VI Bibliographie

Abou Najm, M. R., R. D. Stewart, S. Di Prima, and L. Lassabatere. 2021. "A Simple Correction Term to Model Infiltration in Water-Repellent Soils." *Water Resources Research*, 57 (2). Blackwell Publishing Ltd. https://doi.org/10.1029/2020WR028539.

Alagna, V., V. Bagarello, S. Di Prima, and M. Iovino. 2016. "Determining hydraulic properties of a loam soil by alternative infiltrometer techniques." *Hydrological Processes*, 30 (2): 263–275. https://doi.org/10.1002/hyp.10607.

Alakayleh, Z., X. Fang, and T. P. Clement. 2019. "A Comprehensive Performance Assessment of the Modified Philip–Dunne Infiltrometer." *Water*, 11 (9): 1881. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/w11091881.

Amoozegar, A. 1989. "A compact constant-head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone." *Soil Science Society of America Journal*, 53 (5): 1356–1361. Wiley Online Library.

Amundson, R., A. A. Berhe, J. W. Hopmans, C. Olson, A. E. Sztein, and D. L. Sparks. 2015. "Soil and human security in the 21st century." *Science*, 348 (6235): 1261071. https://doi.org/10.1126/science.1261071.

Angulo-Jaramillo, R., V. Bagarello, S. Di Prima, A. Gosset, M. Iovino, and L. Lassabatere. 2019. "Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) across soils and scales." *Journal of Hydrology*, 576: 239–261. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.007.

Angulo-Jaramillo, R., V. Bagarello, M. Iovino, and L. Lassabatere. 2016. *Infiltration measurements for soil hydraulic characterization*. Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization. Switzerland: Springer.

Angulo-Jaramillo, R., J. P. Vandervaere, S. Roulier, J. L. Thony, J. P. Gaudet, and M. Vauclin. 2000. "Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers - A review and recent developments." *Soil & Tillage Research*, 55 (1–2): 1–29.

Ankeny, M. D., T. C. Kaspar, and R. Horton. 1988. "Design for an automated tension infiltrometer." *Soil Science Society of America Journal*, 52 (3): 893–896. https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200030054x.

Ankeny, M., T. Kaspar, and R. Horton. 1989. "Automated tension infiltrometer." *Iowa State University Patents*.

Bachmann, J., and R. R. van der Ploeg. 2002. "A review on recent developments in soil water retention theory: interfacial tension and temperature effects." *Journal of plant nutrition and soil science*, 165 (4): 468–478. Wiley Online Library.

Bagarello, V., S. Di Prima, and M. Iovino. 2014a. "Comparing Alternative Algorithms to Analyze the Beerkan Infiltration Experiment." *Soil Science Society of America Journal*, 78 (3): 724–736. https://doi.org/10.2136/sssaj2013.06.0231.

Bagarello, V., S. Di Prima, M. Iovino, and G. Provenzano. 2014b. "Estimating field-saturated soil hydraulic conductivity by a simplified Beerkan infiltration experiment." *Hydrological Processes*, 28 (3): 1095–1103. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/hyp.9649.

Bagarello, V., M. Iovino, and D. Elrick. 2004. "A Simplified Falling-Head Technique for Rapid Determination of Field-Saturated Hydraulic Conductivity." *Soil Science Society of America Journal*, 68 (1): 66–73. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6600.

Bagarello, V., S. D. Prima, G. Giordano, and M. Iovino. 2014c. "A test of the Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) procedure." *Geoderma*, 221–222: 20–27. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.017.

Baize, D., and M. C. Girard. 2009. *Référentiel pédologique 2008*. Versailles: Éditions Quæ.

Banton, O., M. Bangoy, S. Chevalier, P. Houenou, P. Lafrance, and C. Rivard. 1997. *Hydrogéologie: multiscience environnementale des eaux souterraines*. Presses de l'Université du Québec.

Baqerkhani, A., H. Zare Abyaneh, O. Bahmani, and H. Nozari. 2025. "Estimating the saturated hydraulic conductivity of the vadose zone with an automatic infiltration data logger for the BEST algorithm." *Irrigation and Drainage*, 74 (1): 128–138. https://doi.org/10.1002/ird.2993.

Barbosa, A. E., J. N. Fernandes, and L. M. David. 2012. "Key issues for sustainable urban stormwater management." *Water Research*, 46 (20): 6787–6798. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029.

Basset, C., M. Abou Najm, R. Angulo-Jaramillo, V. Bagarello, B. Ghanbarian, S. D. Prima, M. Iovino, L. Lassabatère, and R. Stewart. 2025. "Review of conceptual and empirical approaches to characterize infiltration." *Vadose Zone Journal*, 24 (1): e20393. https://doi.org/10.1002/vzj2.20393.

Bear, J. 1988. *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover Publications, Inc.

Bear, J. 2013. *Dynamics of fluids in porous media*. Courier Corporation.

Beatty, S. M., and J. E. Smith. 2013. "Dynamic soil water repellency and infiltration in post-wildfire soils." *Geoderma*, 192: 160–172. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.012.

Berland, A., S. A. Shiflett, W. D. Shuster, A. S. Garmestani, H. C. Goddard, D. L. Herrmann, and M. E. Hopton. 2017. "The role of trees in urban stormwater management." *Landscape and Urban Planning*, 162: 167–177. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017.

Bertrand-Krajewski, J.-L. 2015. "Gestion des eaux pluviales urbaines: d'un objet technique urbain autonome vers une approche systémique intégrée." In: *Colloq. «Rationalités Usages Imagin. L'eau»*.

Beven, K., and P. Germann. 2013. "Macropores and water flow in soils revisited." *Water Resources Research*, 49 (6): 3071–3092. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/wrcr.20156.

Blunt, M. J. 2017. *Multiphase flow in permeable media: A pore-scale perspective*. Cambridge university press.

Boeno, D., P. I. Gubiani, Q. de J. V. Lier, and R. P. Mulazzani. 2021. "Estimating lateral flow in double ring infiltrometer measurements." *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 45. Rev. Bras. Ciênc. Solo. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210027.

Bouarafa, S., L. Lassabatere, G. Lipeme-Kouyi, and R. Angulo-Jaramillo. 2019. "Hydrodynamic Characterization of Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS) by Using Beerkan Infiltration Experiments." *Water*, 11 (4). https://doi.org/10.3390/w11040660.

Bouwer, H. 1986. "Intake rate: cylinder infiltrometer." *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5: 825–844. Wiley Online Library.

Brady, N. C., and R. R. Weil. 2008. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

Braud, I., D. De Condappa, J. M. Soria, R. Haverkamp, R. Angulo-Jaramillo, S. Galle, and M. Vauclin. 2005. "Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method)." *European Journal of Soil Science*, 56 (3): 361–374. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00660.x.

Brooks, R., and A. Corey. 1964. "Hydraulic Properties of Porous Media." *Hydrology Papers, Colorado State University*, (March).

Brown, R. R., N. Keath, and T. H. Wong. 2009. "Urban water management in cities: historical, current and future regimes." *Water science and technology*, 59 (5): 847–855. IWA Publishing.

Cettner, A., R. Ashley, A. Hedström, and M. Viklander. 2014. "Assessing receptivity for change in urban stormwater management and contexts for action." *Journal of Environmental Management*, 146: 29–41. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.024.

Chocat, B. 2017. "Dictionnaire encyclopédique de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement: Pour une gestion durable de l'eau et de la ville." plus de 2 000 entrées, disponible gratuitement sur internet: http://www ….

Concialdi, P., S. Di Prima, H. M. Bhanderi, R. D. Stewart, M. R. Abou Najm, M. Lal Gaur, R. Angulo-Jaramillo, and L. Lassabatere. 2020. "An open-source instrumentation package for intensive soil hydraulic characterization." *Journal of Hydrology*, 582: 124492. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124492.

Cord, A., C. Conrad, M. Schmidt, and S. Dech. 2010. "Standardized FAO-LCCS land cover mapping in heterogeneous tree savannas of West Africa." *Journal of Arid Environments*, 74 (9): 1083–1091. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.03.012.

Cronshey, R. 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.

Darcy, H. 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau: Ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes, au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tôle et de bitume*. Victor Dalmont, éditeur.

De França, E. J., M. B. G. de Lira, F. S. Ferreira, Í. B. Silva, M. S. Santos, C. A. S. Filho, A. F. Nascimento, M. A. R. Costa, and T. O. Santos. 2023. "Natural radioisotopes and chemical elements causing carcinogenic risks in soils of urban green spaces in the Metropolitan Region of Recife, Pernambuco, Brazil?" *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 332 (10): 3943–3955. https://doi.org/10.1007/s10967-023-09098-7.

De Marsilly, G. 1986. "Quantitative hydrogeology; groundwater hydrology for engineers." Academic Press, New York, NY.

Desbordes, M. 1987. "Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain." PhD Thesis, ANRT.

Di Prima, S. 2015. "Automated single ring infiltrometer with a low-cost microcontroller circuit." *Computers and Electronics in Agriculture*, 118: 390–395. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.022.

Di Prima, S., P. Concialdi, L. Lassabatere, R. Angulo-Jaramillo, M. Pirastru, A. Cerdà, and S. Keesstra. 2018. "Laboratory testing of Beerkan infiltration experiments for assessing the role of soil sealing on water infiltration." *Catena*, 167: 373–384. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.013.

Di Prima, S., L. Lassabatere, V. Bagarello, M. Iovino, and R. Angulo-Jaramillo. 2016. "Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments." *Geoderma*, 262: 20–34. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.006.

Di Prima, S., R. D. Stewart, M. R. Abou Najm, L. Ribeiro Roder, F. Giadrossich, S. Campus, R. Angulo-Jaramillo, D. Yilmaz, P. P. Roggero, M. Pirastru, and L. Lassabatere. 2021. "BEST-WR: An adapted algorithm for the hydraulic characterization of hydrophilic and water-repellent soils." *Journal of Hydrology*, 603: 126936. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126936.

Dingman, S. L. 2015. *Physical hydrology*. Waveland press.

Doerr, S. H., R. A. Shakesby, and R. P. D. Walsh. 2000. "Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance." *Earth-Science Reviews*, 51 (1): 33–65. https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8.

Dregne, H. E. 1995. “Desertification control: A framework for action.” *Environmental Monitoring and Assessment*, 37 (1): 111–122. https://doi.org/10.1007/BF00546884.

Dunne, T. 1978. “Field studies of hillslope flow processes.” *Hillslope hydrology*, 227–293.

Enviroscop. 2020. “Zonage pluvial : guide du CEREMA.” *ENVIROSCOP, bureau d’études en environnement*. Accessed February 7, 2025. https://www.enviroscop.fr/actu/2020/11/zonage-pluvial-guide-du-cerema/.

Eshel, G., G. J. Levy, U. Mingelgrin, and M. J. Singer. 2004. “Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle-Size Distribution Analysis.” *Soil Science Society of America Journal*, 68 (3): 736–743. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.7360.

d’État, L. C. 2023. “Décision n° 454945.” *Conseil d’État*. Accessed February 10, 2025. https://www.conseil-etat.fr/fr/arianeweb/CE/analyse/2023-07-13/454945.

Fatehnia, M., K. Tawfiq, and M. Ye. 2016. “Estimation of saturated hydraulic conductivity from double-ring infiltrometer measurements.” *European Journal of Soil Science*, 67 (2): 135–147. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1111/ejss.12322.

Fernandes, G. 2023. “Développement d’approches infiltrométriques et modélisatrices pour la quantification des fonctions infiltration et filtration des sols urbains.” phdthesis, École Nationale des Travaux Publics de l’État [ENTPE]. https://theses.hal.science/tel-04813450.

Ferrans, P., M. N. Torres, J. Temprano, and J. P. Rodríguez Sánchez. 2022. “Sustainable Urban Drainage System (SUDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review.” *Science of The Total Environment*, 806: 150447. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150447.

Fletcher, T. D., H. Andrieu, and P. Hamel. 2013. “Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art.” *35th Year Anniversary Issue*, 51: 261–279. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001.

Fletcher, T. D., W. Shuster, W. F. Hunt, R. Ashley, D. Butler, S. Arthur, S. Trowsdale, S. Barraud, A. Semadeni-Davies, J.-L. Bertrand-Krajewski, P. S. Mikkelsen, G. Rivard, M. Uhl, D. Dagenais, and M. Viklander. 2015. “SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage.” *Urban Water Journal*, 12 (7): 525–542. IAHR Website. https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314.

Fredlund, D. G., and A. Xing. 1994. “Equations for the soil-water characteristic curve.” *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (4): 521–532. NRC Research Press. https://doi.org/10.1139/t94-061.

Freeze, R. A., and J. A. Cherry. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Gao, M., H.-Y. Li, D. Liu, J. Tang, X. Chen, X. Chen, G. Blöschl, and L. Ruby Leung. 2018. “Identifying the dominant controls on macropore flow velocity in soils: A meta-analysis.” *Journal of Hydrology*, 567: 590–604. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.044.

Gee, G. W., and J. W. Bauder. 1986. “Particle-size analysis.” *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5: 383–411. Wiley Online Library.

van Genuchten, M. Th. 1980. “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.” *Soil Science Society of America Journal*, 44 (5): 892–898. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

Gerke, H. H. 2006. “Preferential flow descriptions for structured soils.” *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169 (3): 382–400. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/jpln.200521955.

Gimenez-Maranges, M., J. Breuste, and A. Hof. 2020. “Sustainable Drainage Systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: A review.” *Journal of Cleaner Production*, 255: 120191. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120191.

Girard, M. C., C. Walter, J. Berthelin, and J. C. Rémy. 2011. *Sols et environnement un cours complet des exercices des suppléments en ligne-master - écoles d'ingénieur - CAPES/AGREG*. Dunod.

Golden, H. E., and N. Hoghooghi. 2018. "Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science." *WIREs Water*, 5 (1): e1254. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/wat2.1254.

Goutaland, D., T. Winiarski, J.-S. Dubé, G. Bièvre, J.-F. Buoncristiani, M. Chouteau, and B. Giroux. 2008. "Hydrostratigraphic Characterization of Glaciofluvial Deposits Underlying an Infiltration Basin Using Ground Penetrating Radar." *Vadose Zone J.*, 7 (1): 194–207.

Goutaland, D., T. Winiarski, L. Lassabatere, J. S. Dubé, and R. Angulo-Jaramillo. 2013. "Sedimentary and hydraulic characterization of a heterogeneous glaciofluvial deposit: Application to the modeling of unsaturated flow." *Engineering Geology*, 166: 127–139. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.09.006.

"Haïti : une évaluation post-séisme révèle une augmentation de la faim dans les zones touchées (FAO)." 2021. *ONU Info*. Accessed June 29, 2022. https://news.un.org/fr/story/2021/09/1103392.

Hartemink, A. E., Y. Zhang, J. G. Bockheim, N. Curi, S. H. G. Silva, J. Grauer-Gray, D. J. Lowe, and P. Krasilnikov. 2020. "Soil horizon variation: A review." *Advances in Agronomy*, 160 (1): 125–185. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.10.003.

Haverkamp, R., P. J. Ross, K. R. J. Smettem, and J. Y. Parlange. 1994. "Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation." *Water Resources Research*, 30 (11): 2931–2935. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1029/94WR01788.

Hendrickx, J. M., and M. Flury. 2001. "Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone." *Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone*, 149–187. National Academy Press, Washington, DC, USA.

Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier. San Diego, CA, USA: Academic press.

Horn, R., H. Domżżał, A. Słowińska-Jurkiewicz, and C. van Ouwerkerk. 1995. "Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment." *Soil Compaction and the Environment*, 35 (1): 23–36. https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00479-C.

INSEE. 2011. "Un maillage du territoire français - Insee Première - 1333." Accessed January 5, 2026. https://www.insee.fr/fr/statistiques/1280952.

IUSS Working Group, null. 2022. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 4th edition.* Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS).

Jackson, R. D. 1972. "On the Calculation of Hydraulic Conductivity." *Soil Science Society of America Journal*, 36 (2): 380–382. https://doi.org/10.2136/sssaj1972.03615995003600020047x.

Jankowfsky, S., F. Branger, I. Braud, F. Rodriguez, S. Debionne, and P. Viallet. 2014. "Assessing anthropogenic influence on the hydrology of small peri-urban catchments: Development of the object-oriented PUMMA model by integrating urban and rural hydrological models." *Journal of Hydrology*, 517: 1056–1071. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.034.

Jansen, L., and A. Di Gregorio. 2000. *Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual*.

Jarvis, N. J. 2007. "A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality." *European Journal of Soil*

Science, 58 (3): 523–546. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00915.x.

Jenny, H. 1994. *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Courier Corporation.

Jury, W. A., and R. Horton. 2004. *Soil physics*. John Wiley & Sons.

Kinzli, K.-D., M. Nkosinathi, and O. Ramchand. 2012. "Comparison of Laboratory and Field Calibration of a Soil-Moisture Capacitance Probe for Various Soils." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138 (4): 310–321. American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000418.

Kodešová, R., J. Šimůnek, A. Nikodem, and V. Jirků. 2010. "Estimation of the Dual-Permeability Model Parameters using Tension Disk Infiltrometer and Guelph Permeameter." *Vadose Zone Journal*, 9 (2): 213–225. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/vzj2009.0069.

Köhne, J. M., S. Köhne, and J. Šimůnek. 2009. "A review of model applications for structured soils: a) Water flow and tracer transport." *Preferential Flow*, 104 (1): 4–35. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2008.10.002.

Kutilek, M., and D. R. Nielsen. 1994. *Soil Hydrology*. Cremlingen, Germany: Catena Verlag.

Lal, R. 2001. "Soil degradation by erosion." *Land Degradation & Development*, 12 (6): 519–539. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/ldr.472.

Lal, R., and M. K. Shukla. 2004. *Principles of soil physics*. CRC Press.

Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, D. Goutaland, L. Letellier, J. P. Gaudet, T. Winiarski, and C. Delolme. 2010. "Effect of the settlement of sediments on water infiltration in two urban infiltration basins." *Geoderma*, 156 (3): 316–325. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.031.

Lassabatère, L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. Soria Ugalde, R. Cuenca, I. Braud, and R. Haverkamp. 2006. "Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST." *Soil Science Society of America Journal*, 70 (2): 521–532. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026.

Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. Soria-Ugalde, J. Šimůnek, and R. Haverkamp. 2009. "Numerical evaluation of a set of analytical infiltration equations." *Water Resources Research*, 45 (12): W12415. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1029/2009WR007941.

Lassabatere, L., A.-C. De Giacomoni, R. Angulo-Jaramillo, G. Lipeme Kouyi, M. Martini, C. Louis, P.-E. Peyneau, V. Rodriguez-Nava, B. Cournoyer, A. Aigle, E. Bergeron, J. Bonneau, S. Bouarafa, Y. Colin, P. Concialdi, S. Di Prima, W. Galia, T. H. Lai, A. Marais, M. Laurence, and following co-authors. 2020. *INFILTRON package for assessing infiltration & filtration functions of urban soils*. other. pico.

Lassabatere, L., S. Di Prima, S. Bouarafa, M. Iovino, V. Bagarello, and R. Angulo-Jaramillo. 2019. "BEST-2K method for characterizing dual-permeability unsaturated soils with ponded and tension infiltrometers." *Vadose Zone Journal*, 18 (1): 180124. Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/vzj2018.06.0124.

Lassabatere, L., P.-E. Peyneau, D. Yilmaz, J. Pollacco, J. Fernández-Gálvez, B. Latorre, D. Moret-Fernández, S. Di Prima, M. Rahmati, R. D. Stewart, M. Abou Najm, C. Hammecker, and R. Angulo-Jaramillo. 2021. "A scaling procedure for straightforward computation of sorptivity." *Hydrology and Earth System Sciences*, 25 (9): 5083–5104. https://doi.org/10.5194/hess-25-5083-2021.

Lassabatere, L., P.-E. Peyneau, D. Yilmaz, J. Pollacco, J. Fernández-Gálvez, B. Latorre, D. Moret-Fernández, S. Di Prima, M. Rahmati, R. D. Stewart, M. Abou Najm, C. Hammecker, and R. Angulo-Jaramillo. 2023. "Mixed formulation for an easy and robust numerical computation of

sorptivity." *Hydrology and Earth System Sciences*, 27 (4): 895–915. https://doi.org/10.5194/hess-27-895-2023.

Lassabatere, L., L. Spadini, C. Delolme, L. Février, R. Galvez Cloutier, and T. Winiarski. 2007. "Concomitant Zn-Cd and Pb retention in a carbonated fluvio-glacial deposit under both static and dynamic conditions." *Chemosphere*, 69 (9): 1499–1508. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.04.053.

Lassabatere, L., T. Winiarski, and R. Galvez Cloutier. 2004. "Retention of three heavy metals (Zn, Pb, and Cd) in a calcareous soil controlled by the modification of flow with geotextiles." *Environmental Science and Technology*, 38 (15): 4215–4221. https://doi.org/10.1021/es035029s.

Lehmann, J., D. A. Bossio, I. Kögel-Knabner, and M. C. Rillig. 2020. "The concept and future prospects of soil health." *Nature Reviews Earth & Environment*, 1 (10): 544–553. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8.

Li, F., X. Liu, X. Zhang, D. Zhao, H. Liu, C. Zhou, and R. Wang. 2017. "Urban ecological infrastructure: an integrated network for ecosystem services and sustainable urban systems." *Urban ecological infrastructure for healthier cities: governance, management and engineering*, 163: S12–S18. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.079.

Li, W. C., and K. K. A. Yeung. 2014. "A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective." *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3 (1): 127–134. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.05.001.

Linn, D. M., and J. W. Doran. 1984. "Aerobic and Anaerobic Microbial Populations in No-till and Plowed Soils." *Soil Science Society of America Journal*, 48 (4): 794–799. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800040019x.

Loizeau, S., Y. Rossier, J.-P. Gaudet, A. Refloch, K. Besnard, R. Angulo-Jaramillo, and L. Lassabatere. 2017. "Water infiltration in an aquifer recharge basin affected by temperature and air entrapment." *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65 (3): 222–233. https://doi.org/10.1515/johh-2017-0010.

Makki, M., K. Thestorf, S. Hilbert, M. Thelemann, and L. Makowsky. 2021. "Guideline for the description of soils in the Berlin metropolitan area: an extension for surveying and mapping anthropogenic and natural soils in urban environments within the German soil classification system." *Journal of Soils and Sediments*. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02832-8.

Marsalek, J., and B. Chocat. 2002. "International Report: Stormwater management." *Water Science and Technology*, 46 (6–7): 1–17. https://doi.org/10.2166/wst.2002.0657.

Montgomery, D. R. 2007. "Soil erosion and agricultural sustainability." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (33): 13268–13272. Proceedings of the National Academy of Sciences. https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104.

Morel-Seytoux, H. J., and J. Khanji. 1974. "Derivation of an equation of infiltration." *Water Resources Research*, 10 (4): 795–800. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1029/WR010i004p00795.

Moret-Fernández, D., B. Latorre, M. V. López, Y. Pueyo, L. Lassabatere, R. Angulo-Jaramilo, M. Rahmati, J. Tormo, and J. M. Nicolau. 2020. "Three- and four-term approximate expansions of the Haverkamp formulation to estimate soil hydraulic properties from disc infiltrometer measurements." *Hydrological Processes*, 34 (26): 5543–5556. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/hyp.13966.

Mualem, Y. 1976. “A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.” *Water Resources Research*, 12 (3): 513–522. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513.

Mubarak, I., R. Angulo-Jaramillo, J. C. Mailhol, P. Ruelle, M. Khaledian, and M. Vauclin. 2010. “Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent?” *Agricultural Water Management*, 97 (10): 1517–1526. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.005.

Muriel Saulais et Bruno Kerloc’h. 2021. “Intégrer la gestion des eaux pluviales dans l’urbanisme : le zonage pluvial | Cerema.” Accessed October 5, 2024. http://www.cerema.fr/fr/actualites/integrer-gestion-eaux-pluviales-urbanisme-zonage-pluvial.

Musy, A., C. Higy, and E. Reynard. 2014. *Hydrologie 1: une science de la nature, une gestion sociétale*. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Musy, A., and M. Soutter. 1991. *Physique du sol*. EPFL Press.

Nearing, A. M., R. G. Foster, J. L. Lane, and C. S. Finkner. 1989. “A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology.” *Transactions of the ASAE*, 32 (5): 1587–1593. St. Joseph, MI: ASAE. https://doi.org/10.13031/2013.31195.

Nimmo, J. R. 2007. “Simple predictions of maximum transport rate in unsaturated soil and rock.” *Water Resources Research*, 43 (5). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1029/2006WR005372.

Novotny, V., J. Ahern, and P. Brown. 2010. *Water centric sustainable communities: planning, retrofitting, and building the next urban environment*. John Wiley & Sons.

Oades, J. M. 1984. “Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management.” *Plant and Soil*, 76 (1): 319–337. https://doi.org/10.1007/BF02205590.

Pachepsky, Y., and G. Karahan. 2022. “On shapes of cumulative infiltration curves.” *Geoderma*, 412: 115715. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115715.

Perroux, K. M., and I. White. 1988. “Designs for Disc Permeameters.” *Soil Science Society of America Journal*, 52 (5): 1205–1215. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200050001x.

Philip, J. 1957a. “The theory of infiltration: 2. The profile of infinity.” *Soil Science*, 83 (6): 435–448. LWW.

Philip, J. 1957b. “The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution.” *Soil science*, 83 (5): 345–358. LWW.

Philip, J. 1969. “Early stages of infiltration in two- and three-dimensional systems.” *Soil Research*, 7 (3): 213–221.

Porse, E. C. 2013. “Stormwater Governance and Future Cities.” *Water*, 5 (1): 29–52. https://doi.org/10.3390/w5010029.

Radcliffe, D. E., and J. Simunek. 2010. *Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications*. Taylor&Francis Group. Raton: CRC press.

Rahmati, M., L. Weihermüller, J. Vanderborght, Y. A. Pachepsky, L. Mao, S. H. Sadeghi, N. Moosavi, H. Kheirfam, C. Montzka, K. Van Looy, B. Toth, Z. Hazbavi, W. Al Yamani, A. A. Albalasmeh, M. Z. Alghzawi, R. Angulo-Jaramillo, A. C. D. Antonino, G. Arampatzis, R. A. Armindo, H. Asadi, Y. Bamutaze, J. Batlle-Aguilar, B. Béchet, F. Becker, G. Blöschl, K. Bohne, I. Braud, C. Castellano, A. Cerdà, M. Chalhoub, R. Cichota, M. Císlerová, B. Clothier, Y. Coquet, W. Cornelis, C. Corradini, A. P. Coutinho, M. B. De Oliveira, J. R. De Macedo, M. F. Durães, H. Emami, I. Eskandari, A. Farajnia, A. Flammini, N. Fodor, M. Gharaibeh, M. H. Ghavimipanah, T. A. Ghezzehei, S. Giertz, E. G. Hatzigiannakis, R. Horn, J. J. Jiménez, D.

Jacques, S. D. Keesstra, H. Kelishadi, M. Kiani-Harchegani, M. Kouselou, M. K. Jha, L. Lassabatere, X. Li, M. A. Liebig, L. Lichner, M. V. López, D. Machiwal, D. Mallants, M. S. Mallmann, J. D. De Oliveira Marques, M. R. Marshall, J. Mertens, F. Meunier, M. H. Mohammadi, B. P. Mohanty, M. Pulido-Moncada, S. Montenegro, R. Morbidelli, D. Moret-Fernández, A. A. Moosavi, M. R. Mosaddeghi, S. B. Mousavi, H. Mozaffari, K. Nabiollahi, M. R. Neyshabouri, M. V. Ottoni, T. B. Ottoni Filho, M. R. Pahlavan-Rad, A. Panagopoulos, S. Peth, P.-E. Peyneau, T. Picciafuoco, J. Poesen, M. Pulido, D. J. Reinert, S. Reinsch, M. Rezaei, F. P. Roberts, D. Robinson, J. Rodrigo-Comino, O. C. Rotunno Filho, T. Saito, H. Suganuma, C. Saltalippi, R. Sándor, B. Schütt, M. Seeger, N. Sepehrnia, E. Sharifi Moghaddam, M. Shukla, S. Shutaro, R. Sorando, A. A. Stanley, P. Strauss, Z. Su, R. Taghizadeh-Mehrjardi, E. Taguas, W. G. Teixeira, A. R. Vaezi, M. Vafakhah, T. Vogel, I. Vogeler, J. Votrubova, S. Werner, T. Winarski, D. Yilmaz, M. H. Young, S. Zacharias, Y. Zeng, Y. Zhao, H. Zhao, and H. Vereecken. 2018. “Development and analysis of the Soil Water Infiltration Global database.” *Earth System Science Data*, 10 (3): 1237–1263. https://doi.org/10.5194/essd-10-1237-2018.

Rawls, W. J., T. J. Gish, and D. L. Brakensiek. 1991. “Estimating Soil Water Retention from Soil Physical Properties and Characteristics.” *Advances in Soil Science: Volume 16*, edited by B. A. Stewart, 213–234. New York, NY: Springer.

Regalado, C. M., A. Ritter, J. Álvarez-Benedí, and R. Muñoz-Carpena. 2005. “Simplified Method to Estimate the Green–Ampt Wetting Front Suction and Soil Sorptivity with the Philip–Dunne Falling-Head Permeameter.” *Vadose Zone Journal*, 4 (2): 291–299. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/vzj2004.0103.

Reynolds, W. D., B. T. Bowman, R. R. Brunke, C. F. Drury, and C. S. Tan. 2000. “Comparison of Tension Infiltrometer, Pressure Infiltrometer, and Soil Core Estimates of Saturated Hydraulic Conductivity.” *Soil Science Society of America Journal*, 64 (2): 478–484. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642478x.

Reynolds, W. D., B. T. Bowman, C. F. Drury, C. S. Tan, and X. Lu. 2002. “Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters.” *Geoderma*, 110 (1): 131–146. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8.

Reynolds, W. D., and D. E. Elrick. 1991a. “Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer.” *Soil Science Society of America Journal*, 55 (3): 633–639. https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500030001x.

Reynolds, W. D., and D. E. Elrick. 1991b. “Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tension Infiltrometer.” *Soil Science Society of America Journal*, 55 (3): 633–639. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500030001x.

Reynolds, W. D., and J. K. Lewis. 2012. “A drive point application of the Guelph Permeameter method for coarse-textured soils.” *Geoderma*, 187–188: 59–66. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.04.004.

Reynolds, W., D. Elrick, and G. Topp. 1983. “A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table1.” *Soil Science*, 136 (4): 250. LWW.

Richards, L. A. 1931. “Capillary conduction of liquids through porous mediums.” *Physics*, 1 (5): 318–333. https://doi.org/10.1063/1.1745010.

Ritsema, C. J., and L. W. Dekker. 2000. “Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications.” *Journal of Hydrology*, 231–232: 308–319. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00203-1.

Saint-Louis, S.-M., A. Traullé, G. Fernandes, S. Di Prima, R. Angulo-Jaramillo, and L. Lassabatere. 2023. “Infiltrometer ring-size effects on infiltration and macropore hydraulic activation.” EGU23-3409. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023: Copernicus Meetings.

Salifu, A., F. K. Abagale, and G. Kranjac-Berisavljevic. 2021. “Estimation of Infiltration Models’ Parameters Using Regression Analysis in Irrigation Fields of Northern Ghana.” Scientific Research Publishing Inc.

Saxton, K. E., and W. J. Rawls. 2006. “Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions.” *Soil Science Society of America Journal*, 70 (5): 1569–1578. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117.

Schad, P. 2015. “The International Soil Classification System WRB, Third Edition, 2014.”

Sébastien. 2022. “Eaux souterraines Article 2 - Les nappes et processus hydrogéologiques.” *Eau’Dyssée*. Accessed February 10, 2025. https://www.eaudyssee.org/serie-eaux-souterraines-article-2-les-nappes-et-les-processus/.

Shillito, R. M., M. Berli, and T. A. Ghezzehei. 2020. “Quantifying the Effect of Subcritical Water Repellency on Sorptivity: A Physically Based Model.” *Water Resources Research*, 56 (11): e2020WR027942. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1029/2020WR027942.

Šimůnek, J., and M. Th. van Genuchten. 2008. “Modeling Nonequilibrium Flow and Transport Processes Using HYDRUS.” *Vadose Zone Journal*, 7 (2): 782–797. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/vzj2007.0074.

Šimůnek, J., N. J. Jarvis, M. Th. Van Genuchten, and A. Gärdenäs. 2003. “Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone.” *Journal of hydrology*, 272 (1–4): 14–35. Elsevier.

Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, and K. Denef. 2004. “A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics.” *Advances in Soil Structure Research*, 79 (1): 7–31. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008.

Smettem, K. R. J., J. Y. Parlange, P. J. Ross, and R. Haverkamp. 1994. “Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 1. A capillary-based theory.” *Water Resources Research*, 30 (11): 2925–2929. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1029/94WR01787.

Smettem, K. R. J., P. J. Ross, R. Haverkamp, and J. Y. Parlange. 1995. “3-Dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer .3. parameter-estimation using a double-disk tension infiltrometer.” *Water Resources Research*, 31 (10): 2491–2495.

Sojka, R. E., and D. R. Upchurch. 1999. “Reservations Regarding the Soil Quality Concept.” *Soil Science Society of America Journal*, 63 (5): 1039–1054. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351039x.

Sorensen, J. P. R., D. J. Lapworth, D. C. W. Nkhuwa, M. E. Stuart, D. C. Gooddy, R. A. Bell, M. Chirwa, J. Kabika, M. Liemisa, M. Chibesa, and S. Pedley. 2015. “Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa.” *Occurrence, fate, removal and assessment of emerging contaminants in water in the water cycle (from wastewater to drinking water)*, 72: 51–63. https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.002.

Srishantha, U., and U. Rathnayake. 2017. “Sustainable urban drainage systems (SUDS)–what it is and where do we stand today?” *Engineering and Applied Science Research*, 44 (4).

Tamoh, K., and A. Maslouhi. 2004. “Mesures in situ par infiltrométrie des propriétés hydrodynamiques des sols de Mnasra (Maroc).” *Comptes Rendus. Géoscience*, 336 (6): 535–545. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.04.001.

Tang, S., J. Jiang, Y. Zheng, Y. Hong, E.-S. Chung, A. Y. Shamseldin, Y. Wei, and X. Wang. 2021. “Robustness analysis of storm water quality modelling with LID infrastructures from natural

event-based field monitoring." *Science of The Total Environment*, 753: 142007. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142007.

"The World Bank annual report 2014 : Main report." n.d. *World Bank*. Text/HTML. Accessed November 17, 2024. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/111781468170952958/Main-report.

Toy, T. J., G. R. Foster, and K. G. Renard. 2002. *Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control*. John Wiley & Sons.

Traullé, A. 2022. *Infiltrométrie & ring size: Influence de la taille d'un dispositif innovant pour la mesure de l'infiltration et de la filtration dans le sols*. 98. Master. Lyon, France.

Vandervaere, J. P., C. Peugeot, M. Vauclin, R. Angulo Jaramillo, and T. Lebel. 1997. "Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers." *Journal of Hydrology*, 188–189: 203–223. Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03160-5.

Ventura, F., O. Facini, S. Piana, and P. Rossi Pisa. 2010. "Soil moisture measurements: Comparison of instrumentation performances." *Journal of irrigation and drainage engineering*, 136 (2): 81–89. American Society of Civil Engineers.

Vereecken, H., J. A. Huisman, Y. Pachepsky, C. Montzka, J. van der Kruk, H. Bogena, L. Weihermüller, M. Herbst, G. Martinez, and J. Vanderborght. 2014. "On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale." *Determination of soil moisture: Measurements and theoretical approaches*, 516: 76–96. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.061.

Vereecken, H., L. Weihermüller, S. Assouline, J. Šimůnek, A. Verhoef, M. Herbst, N. Archer, B. Mohanty, C. Montzka, J. Vanderborght, and others. 2019. "Infiltration from the Pedon to Global Grid Scales: An Overview and Outlook for Land Surface Modeling." *Vadose Zone Journal*, 18 (1).

Vidal-beaudet, L., and J.-P. Rossignol. 2018. "Urban Soils: Artificialization and Management." *Soils as a Key Component of the Critical Zone 5*, 189–210. John Wiley & Sons, Ltd.

WRB, I. 2014. *World Reference Base for soil resources 2014: international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*.

Yilmaz, D., S. Di Prima, R. D. Stewart, M. R. Abou Najm, D. Fernandez-Moret, B. Latorre, and L. Lassabatere. 2022. "Three-term formulation to describe infiltration in water-repellent soils." *Geoderma*, 427: 116127. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116127.

Yilmaz, D., L. Lassabatere, R. Angulo-Jaramillo, D. Deneele, and M. Legret. 2010. "Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method." *Vadose Zone Journal*, 9 (1): 107–116. https://doi.org/10.2136/vzj2009.0039.

Zhang, R. 1997. "Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer." *Soil Science Society of America Journal*, 61 (4): 1024–1030. John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040005x.

VII ANNEXE

VII.1 Les scripts pour l'axe 1

VII.1.1 Script_R_1_PSD.R

```
# Ce script :
# + Trace et exporte les courbes de distribution ET distribution cumulées pour les 3 mesures + moyenne
# réalisées par le granulo laser Mastersizer 3000
# + calcule le pourcentage argile/limons/sable puis exporte un fichier texte avec les valeurs
# + calcule les fractions correspondant aux tamis usuels.

# IMPORTANT :
# Premières étapes pré-traitement R : passage en colonnes, première et dernière lignes supprimées (Numéro d'enregistrement et Résultat dans la gamme  (0,1;99,9) ??m),
# virgules changées en points, et enregistré au format csv avec s?parateur ";"

# Penser à bien noter le nom du fichier à traiter (ligne 24) +
# quelles sont les colonnes à supprimer (nettoyage et calibration) lignes 41 et 45 + setwd() ligne 30

######## Initialization ############################################################################

rm(list=ls())

## kills all the graphic windows
while (dev.cur() != 1) {dev.off()}

ltds <- 0.25          # reading time, i.e., time for sys.sleep

renew_fig     <- "yes"
renew_results <- "yes"

print("")
print("# Initialization - directory creation & loading functions")
Sys.sleep(ltds)

######## Library ###################################################################

#library(here)
#library(dplyr)
library(latex2exp)
library(fs)                              ## functions for file management


######## Working directory ###########################################################

T_wd <- getwd()                                  ##defines the root folder

T_data      <- paste(T_wd,"/1_Data/1_PSD",sep="")
T_figs      <- paste(T_wd,"/2_Figs/1_PSD",sep="")
T_results   <- paste(T_wd,"/3_Results/1_PSD",sep="")
T_results_2 <- paste(T_wd,"/1_Data/2_Rhod-thi",sep="")

# data_file_name_1 <- "Granulo_TPE_SMSL_FB_2023"
# data_file_name_2 <- "Granulo_TPE_SMSL_FB_2023"
# data_file_name_3 <- "Granulo_TPE_SMSL_FB_28092023"

ifelse(!dir.exists(T_data), dir.create(T_data), "Folder exists already")
ifelse(!dir.exists(T_figs), dir.create(T_figs), "Folder exists already")
ifelse(!dir.exists(T_results), dir.create(T_results), "Folder exists already")
ifelse(!dir.exists(T_results_2), dir.create(T_results_2), "Folder exists already")

## kills all the files in the result folders  - to comment to discard

if (renew_fig == "yes")  {
  unlink(paste(T_figs,"/*",sep=""))
}

if (renew_results == "yes")  {
  unlink(paste(T_results,"/*",sep=""))
}

## !! Do no use for second folder [T_results_2], because it may erase
## other files corresponding to other data

######## Changing names ############################################################

## section for the simplification of naming samples.

names_sample_LL_0a <- c("A","B","C","D","E","F","G","H","I","J","K","L","M","N",
                        "O","P","Q","R","S","T","U","V","W","X","Y","Z")

names_sample_LL_0b <- paste("A",names_sample_LL_0a,sep="")

names_sample_LL_2 <- paste("S",as.character(seq(1,42,1)),sep="")

names_sample_LL_ <- c(names_sample_LL_0a,names_sample_LL_0b,names_sample_LL_2)

names_sample_LL <- character()

# add_char <- c(as.character(seq(1,3,1))," ")

for (i in 1:length(names_sample_LL_)) {
  add_char <- paste(names_sample_LL_[i],c(as.character(seq(1,3,1)),"moy"),sep=".")
  names_sample_LL <- c(names_sample_LL,add_char)
}

######## Uploading data ###################################################################################

print("")
print("# Uploading data to create databases")
Sys.sleep(ltds)

setwd(T_data)

file_names <- list.files(pattern= "*.csv")      ## list all the files of type csv
n_files <- length(file_names)

```

```
granulos <- list()
#
for (j in 1:n_files)   {                                          # To load the data
  granulos[[j]] <- read.csv2(file_names[j], sep=";", fill=TRUE, header=TRUE)
  # View(granulos[[j]])
}

#
names(granulos) <- file_names

setwd(T_wd)

# Selecting the rows and columns to keep.

n_1st_row <- 11                  ## n-1 rows to ignore at the beginning
n_1st_col <- 2                   ## first example to consider

xn_row <- list()
xn_col <- list()
#
for (j in 1:n_files)   {                                          # Rows and columns indexes
  xn_row[[j]] <- seq(n_1st_row,nrow(granulos[[j]]))
  xn_col[[j]] <- c(1,seq(n_1st_col,ncol(granulos[[j]])))
}
#
names(xn_row) <- file_names
names(xn_col) <- file_names

# Names of samples

sample_name <- list()
#
for (j in 1:n_files)   {                                          # Names of samples
  sample_name[[j]] <- colnames(granulos[[j]])
}
#
names(sample_name) <- file_names

print(" * Checking uploaded data")
Sys.sleep(ltds)

print("   - Number of dataframes?")
Sys.sleep(ltds)
print(n_files)

print("   - Are the sample names unique for each dataframe?")
Sys.sleep(ltds)

#
for (j in 1:n_files)   {                                          # Names of samples
  print(length(sample_name[[j]]) == length(unique(sample_name[[j]])))
}

######## Computation of cumulative distributions ##############################################################################

print("")
print("# Computing cumulative frequencies for all databases")
Sys.sleep(ltds)

granulo_cum <- list()
#
for (j in 1:n_files)   {                                  # selecting the sub dataframe
  granulo_cum[[j]] <- granulos[[j]][xn_row[[j]],xn_col[[j]]]
  # View(granulo_cum[[j]])
}
#
names(granulo_cum) <- file_names

## Transformation into numeric values

for (j in 1:n_files) {
  for (k in 1:ncol(granulo_cum[[j]])) {                           # To convert formats to numeric
  granulo_cum[[j]][,k] <- as.numeric(granulo_cum[[j]][,k])
  # warnings()
  }
}

granulo_freq <- list()

granulo_freq <- granulo_cum              ## Storing the frequencies


## Computation of cumulative frequencies

for (j in 1:n_files) {
  for (k in 2:ncol(granulo_cum[[j]])) {                           # To compute the cumulative frequencies
    a <- cumsum(granulo_cum[[j]][,k])
    granulo_cum[[j]][,k] <- a/max(a)
  }
}
```

```
192
193  ### Gathering the data for cumulative frequencies
194
195  print("")
196  print("# Gathering the different databases")
197  Sys.sleep(ltds)
198
199  print(" * Checking the particle sizes for the databases")
200  Sys.sleep(ltds)
201
202  print("   - Are the 1st columns of dataframes equal to that of the first dataframe?")
203  Sys.sleep(ltds)
204
205  for (j in 2:n_files)   {                                    # Equality of psd thrersholds
206    print(unique(granulo_cum[[j]][,1] == granulo_cum[[1]][,1]))
207  }
208
209  ## Gathering the names of the samples
210
211  print(" * Gathering sample names")
212  Sys.sleep(ltds)
213
214  sample_name_tot <- sample_name[[1]]
215
216  for (j in 2:n_files)   {                                    # gathering sample names
217    sample_name_tot <- c(sample_name_tot,sample_name[[j]][2:ncol(granulo_cum[[j]])])
218  }
219
220  sample_name_tot_r <- sample_name_tot[2:length(sample_name_tot)] ## removal of the 1st name
221  n_sample <- length(sample_name_tot_r)
222
223  print("  - Are the names of samples unique for the whole dataset?")
224  Sys.sleep(ltds)
225
226  print(length(unique(sample_name_tot)) == length(sample_name_tot))
227
228  length(unique(sample_name[[2]])) == length(sample_name[[2]])
229
230  ## names from LL
231
232  sample_name_tot_r <- names_sample_LL     ##!! in order to simplify
233
234  ## Gathering the dataframes for cumulative frequencies & frequencies
235
236  granulo_cum_tot <- granulo_cum[[1]]
237
238  for (j in 2:n_files)   {                                    # Equality of psd thersholds
239    granulo_cum_tot <- cbind(granulo_cum_tot,granulo_cum[[j]][,2:ncol(granulo_cum[[j]])])
240  }
241
242  # print("  - Is the number of columns of the whole database equal to the number of samples?")
243  # Sys.sleep(ltds)
244  #
245  # print(ncol(granulo_cum_tot) == length(sample_name_tot))       # verification of the number of columns
246
247  ### binding dataframes
248
249  granulo_freq_tot <- granulo_freq[[1]]
250
251  for (j in 2:n_files)   {                                  # Equality of psd thersholds
252    granulo_freq_tot <- cbind(granulo_freq_tot,granulo_freq[[j]][,2:ncol(granulo_freq[[j]])])
253  }
254
255
256  ######## Computation of clay, loam and sand contents ###########################################################################
257
258  print("")
259  print("# Computation of the soil texture")
260  Sys.sleep(ltds)
261
262  print(" * computing the percentages of sand, laom and clay")
263  Sys.sleep(ltds)
264
265  # clay < 2 microns
266
267  pclay_1 <- vector()
268  pclay_2 <- vector()
269
270  for (j in 1:n_sample) {
271    pclay_1[j] <- approx(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j+1],2)$y
272    pclay_2[j] <- as.numeric(granulo_cum_tot[max(which(as.numeric(granulo_cum_tot[,1])<2)),j+1])
273  }
274
275  names(pclay_1) <- sample_name_tot_r
276  names(pclay_2) <- names(pclay_1)
277
278
279  ##### Computation of the soil texture ######
280  #" clay < 2 microns - loam [2-50 microns] - sand [50-2000] micro
281
282  dd_clay <- 2
283  dd_silt <- 50
284  dd_sand <- 2000
285
286  xdd <- c(dd_clay,dd_silt,dd_sand)
287
288  pclay <- vector()                                           # percentage of fractions
289  psilt <- vector()
290  psand <- vector()
```

```
pclay_psd <- vector()                                          # percentage of fractions (< 2mm)
psilt_psd <- vector()
psand_psd <- vector()

xclay <- vector()                                              # contribution of fractions (< 2mm)
xsilt <- vector()
xsand <- vector()

for (j in 1:n_sample) {

  pclay[j] <- approx(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j+1],dd_clay)$y
  psilt[j] <- approx(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j+1],dd_silt)$y
  psand[j] <- approx(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j+1],dd_sand)$y

  pclay_psd[j] <- pclay[j]/psand[j]
  psilt_psd[j] <- psilt[j]/psand[j]
  psand_psd[j] <- 1

  xclay[j] <- pclay_psd[j]
  xsilt[j] <- psilt_psd[j]-pclay_psd[j]
  xsand[j] <- psand_psd[j]-psilt_psd[j]

}

names(pclay) <- sample_name_tot_r
names(psilt) <- sample_name_tot_r
names(psand) <- sample_name_tot_r

names(pclay_psd) <- sample_name_tot_r
names(psilt_psd) <- sample_name_tot_r
names(psand_psd) <- sample_name_tot_r

names(xclay) <- sample_name_tot_r
names(xsilt) <- sample_name_tot_r
names(xsand) <- sample_name_tot_r

##### Computation of the soil texture - table ######

FF_txtr <- data.frame(nrow=9,ncol=n_sample)                    # For the texture

  FF_txtr[1,1] <- dd_clay
  FF_txtr[2,1] <- dd_silt
  FF_txtr[3,1] <- dd_sand
  FF_txtr[4,1] <- dd_clay
  FF_txtr[5,1] <- dd_silt
  FF_txtr[6,1] <- dd_sand
  FF_txtr[7,1] <- dd_clay
  FF_txtr[8,1] <- dd_silt
  FF_txtr[9,1] <- dd_sand

for (j in 1:n_sample){

  FF_txtr[1,j+1] <- pclay[j]
  FF_txtr[2,j+1] <- psilt[j]
  FF_txtr[3,j+1] <- psand[j]
  FF_txtr[4,j+1] <- pclay_psd[j]
  FF_txtr[5,j+1] <- psilt_psd[j]
  FF_txtr[6,j+1] <- psand_psd[j]
  FF_txtr[7,j+1] <- xclay[j]
  FF_txtr[8,j+1] <- xsilt[j]
  FF_txtr[9,j+1] <- xsand[j]

}

  names(FF_txtr) <- c("size_(micro_m)",sample_name_tot_r)

  rownames(FF_txtr) <- c("%clay_s","%silt_s","%sand_s",
                         "%clay_s_norm","%silt_s_norm","%sand_s_norm",
                         "D%clay_norm","D%silt_norm","D%sand_norm")

  ##### Computation of the soil texture ######
# Computation of the psd for regular sizes with BEST method

print(" * Predicting the PSD for BEST methods")
Sys.sleep(ltds)

xd <- c(0.0001,0.00025,0.0005,0.001,0.002,0.003,0.00425,0.006,0.0085,0.012,
        0.016,0.022,0.033,0.050,0.075,0.100,0.150,0.250,
        0.500,0.750,1.000,1.250,1.500,2.000)*1000

# adapted from regular size for PSD
# !! the last value must correspond to 2 mm (i.e., 2000 micro_m)


FF_xd     <- data.frame(nrow=length(xd),ncol=n_sample+1)
FF_xd_psd <- data.frame(nrow=length(xd),ncol=n_sample+1)

for (i in 1:length(xd)) {

    FF_xd[i,1]     <- xd[i]
    FF_xd_psd[i,1] <- xd[i]

}

for (i in 1:length(xd)) {
  for (j in 2:n_sample+1) {

    FF_xd[i,j] <- approx(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j],xd[i])$y

  }
}
```

```r
for (i in 1:length(xd)) {
  for (j in 2:n_sample+1) {

    FF_xd_psd[i,j] <- FF_xd[i,j]/FF_xd[length(xd),j]

  }
}


names(FF_xd)     <- c("size_(micro_m)", sample_name_tot_r)
names(FF_xd_psd) <- c("size_(micro_m)", sample_name_tot_r)


######## Figures for PSD ###############################################################################

print("")
print("# Plotting frequencies and cumulative frequencies")
Sys.sleep(ltds)

print(" * Specific case - first case")
Sys.sleep(ltds)


## Choose the case to plot

kj<- 0
jj <- 2+kj*4

windows(width = 800, height = 1000)
layout(matrix(1:3,3,1))

#Subfigure for the frequency distributions

  plot(granulo_freq_tot[,1],granulo_freq_tot[,jj],col="blue", pch=10,
       xlab=TeX("$d\\, \\[\\mu m\\]$"),ylab=TeX("$f_{d}$"),
       log="x",
       main=paste("Frequency distributions for: ", sample_name_tot_r[jj-1],sep=""))

  points(granulo_freq_tot[,1],granulo_freq_tot[,jj+1], col="green", pch=15)
  points(granulo_freq_tot[,1],granulo_freq_tot[,jj+2], col="red", pch=16)
  lines(granulo_freq_tot[,1],granulo_freq_tot[,jj+3], col="black")


#Subfigure for the cumulative frequency distributions

  plot(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,jj],col="blue", pch=10,
       xlab=TeX("$d\\, \\[\\mu m\\]$"),ylab=TeX("$f_{d}$"),
       log="x")

  points(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,jj+1], col="green", pch=15)
  points(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,jj+2], col="red", pch=16)
  lines(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,jj+3], col="black")


#Subfigure for the sampled cumulative frequency distributions

  plot(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,jj+3], col="black", type = "l",
       xlab=TeX("$d\\, \\[\\mu m\\]$"),ylab=TeX("$FF_{d}$"),
       log="x", main="Sampling for BEST and soil texture")

  points(c(dd_clay,dd_clay),c(0,1), col="green", type = "l", lty = 2)
  points(c(dd_silt,dd_silt),c(0,1), col="green", type = "l", lty = 2)
  points(c(dd_sand,dd_sand),c(0,1), col="green", type = "l", lty = 2)

  points(FF_xd_psd[,1],FF_xd_psd[,jj+3], col="red", pch=16)

  legend(x="topleft", legend=c("Mean","clay-silt-sand", "FFd-BEST"),
         col=c("black","green","red"), pch=c(NA,NA,16), lty = c(1,2,0),
         bty = "n")

# ### Automatic plot of all the figures - uncomment if necessary

  if (renew_fig == "yes")  {

    Sys.sleep(ltds)
    print(" * Plotting and saving all the cases")

    setwd(T_figs)

    j<- 2

    for (i in 1:floor(n_sample/4)) {

      png(file = paste(sample_name_tot_r[j-1],"_PSD.png", sep=""), width = 800, height = 700)
      layout(matrix(1:3,3,1))

      #Subfigure for the frequency distributions

      plot(granulo_freq_tot[,1],granulo_freq_tot[,j],col="blue", pch=10,
           xlab=TeX("$d\\, \\[\\mu m\\]$"),ylab=TeX("$f_{d}$"),
           log="x",
           main=paste("Frequency distributions for: ",sample_name_tot_r[j-1],sep=""))

      points(granulo_freq_tot[,1],granulo_freq_tot[,j+1], col="green", pch=15)
      points(granulo_freq_tot[,1],granulo_freq_tot[,j+2], col="red", pch=16)
      lines(granulo_freq_tot[,1],granulo_freq_tot[,j+3], col="black")

      legend(x="topleft", legend=c("Meas. 1","Meas. 2", "Meas. 3", "Mean"),
             col=c("blue","green","red", "black"), pch=c(10,15,16,NA), lty = c(0,0,0,1),
             bty = "n")
```

```
495
496       #Subfigure for the cumulative frequency distributions
497
498       plot(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j],col="blue", pch=10,
499            xlab=TeX("$d\\, \\[\\mu m\\]$"),ylab=TeX("$FF_{d}$"),
500            log="x", main="Cumulative frequency distributions")
501
502       points(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j+1], col="green", pch=15)
503       points(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j+2], col="red", pch=16)
504       lines(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j+3], col="black")
505
506       #Subfigure for the sampled cumulative frequency distributions
507
508       plot(granulo_cum_tot[,1],granulo_cum_tot[,j+3], col="black", type = "l",
509            xlab=TeX("$d\\, \\[\\mu m\\]$"),ylab=TeX("$FF_{d}$"),
510            log="x", main="Sampling for BEST and soil texture")
511
512       points(c(dd_clay,dd_clay),c(0,1), col="green", type = "l", lty = 2)
513       points(c(dd_silt,dd_silt),c(0,1), col="green", type = "l", lty = 2)
514       points(c(dd_sand,dd_sand),c(0,1), col="green", type = "l", lty = 2)
515
516       points(FF_xd_psd[,1],FF_xd_psd[,j+3], col="red", pch=16)
517
518       legend(x="topleft", legend=c("Mean","clay-silt-sand", "FFd-BEST"),
519              col=c("black","green","red"), pch=c(NA,NA,16), lty = c(1,2,0),
520              bty = "n")
521
522       dev.off()
523       j <- j+4
524     }
525
526     setwd(T_wd)
527 }
528
529   ######## Savings ##########################################################################
530
531   if (renew_results == "yes")  {
532
533   print("")
534   print("# Saving soil textures and SD for BEST methods")
535   Sys.sleep(ltds)
536
537     setwd(T_results)
538
539     ncol_reduc <- c(1,seq(5,ncol(FF_txtr),4))
540
541     data_txtr <-  FF_txtr[,ncol_reduc]
542     write.csv(data_txtr, file="FF_txtr.csv")
543
544     data_psd <-  FF_xd_psd[,ncol_reduc]
545     write.csv(data_psd, "FF_psd.csv")
546
547     Rdata_file_PSD <- "PSD.RData"
548
549     save(file = Rdata_file_PSD,
550          data_txtr)
551
552     setwd(T_wd)
553
554     ## saving to the data folder for "\1_Data\2_Rhod-thi"
555
556     srce_file <- paste(T_results,Rdata_file_PSD,sep="/")
557     destin_file <- paste(T_results_2,Rdata_file_PSD,sep="/")
558
559     if (file.exists(destin_file)) { file.remove(destin_file) }  ## to remove the file
560     file_copy(srce_file, destin_file)     ## to copy the same file in the folder data
561
562   }
563
564 print("")
565 print("# That's all folks")
566 Sys.sleep(ltds)
567 print(" !! Don't forget to move your files to a safe place!!")
568 print(" !! All files will be overwritten at next round!!")
```

VII.1.2 Script_R_2_Rhod_thetai.R (Scripts des caractérisations du sol)

```r
########## Initialization ####################################################

rm(list =ls())      # efface les data

## kills all the graphic windows
while (dev.cur() != 1) {dev.off()}

ltds <- 0.25           # reading time, i.e., time for sys.sleep

renew_results <- "yes"
renew_figs    <- "yes"

print("")
print("# Initialization - directory creation & loading functions")
Sys.sleep(ltds)

######### libraries ###########################################################

library(fs)                                ## functions for file management
library(splines)
library(car)
library(sandwich)
library(RcmdrMisc)
library(latex2exp)
library(stringr)

library(ggplot2)
library(gridExtra)
library(patchwork)

library(soiltexture)

# library(here)

######## setting data and saving directory ####################################


## Main directory #####

T_wd <- getwd()

## Other directories and source files

T_source    <- paste(T_wd,'/0_Functions',sep="")
T_data      <- paste(T_wd,"/1_Data/2_Rhod-thi",sep="")
T_figs      <- paste(T_wd,"/2_Figs/2_Rhod-thi",sep="")
T_results   <- paste(T_wd,"/3_Results/2_Rhod-thi",sep="")
T_results_2 <- paste(T_wd,"/1_Data/4_AOV",sep="")

file_source <- paste(T_source,'/0_tool_func.r',sep="")
source(file_source)

ifelse(!dir.exists(T_data), dir.create(T_data), "Folder exists already")
ifelse(!dir.exists(T_figs), dir.create(T_figs), "Folder exists already")
ifelse(!dir.exists(T_results), dir.create(T_results), "Folder exists already")
ifelse(!dir.exists(T_results_2), dir.create(T_results_2), "Folder exists already")

## kills all the files in the result folders - to comment to discard

if (renew_results == "yes")  {
  unlink(paste(T_results,"/*",sep=""))
  unlink(paste(T_figs,"/*",sep=""))
  }

######### Upload data #################

print("")
print("# Uploading the data")
Sys.sleep(ltds)

setwd(T_data)

# Uploading field data from csv file

file_names <- list.files(pattern = ".csv")
nbr_files <- length(file_names)

iff <- ifelse(nbr_files>1,
       print("Please, stop & gather all your data in one file"),
       file_name <- file_names[1])

mat_ <- read.csv2(file_name, sep=";", na.strings=TRUE, header=TRUE)

nbr_point <- dim(mat_)[1]

# Uploading field data from Rdata file --> PSD data

file_names_R <- list.files(pattern = ".RData")
nbr_files_R <- length(file_names_R)

iff <- ifelse(nbr_files_R>1,
              print("Please, stop & gather all your Rdata in one file"),
              file_name_R <- file_names_R[1])

load(file_name_R)

setwd(T_wd)

```

```r
######### Define variables for imported data (cvs file) ##################

print("")
print("# Defining variables")
Sys.sleep(ltds)

mat_$Site     <- as.factor(mat_$Site)
mat_$Transect <- as.factor(mat_$Transect)
mat_$Point    <- as.factor(mat_$Point)

mat_$Tra_pos <- as.factor(paste(mat_$Site,mat_$Transect,sep="."))

mat_$Rho_d   <- as.numeric(mat_$Rho_d)
mat_$th_i_B  <- as.numeric(mat_$th_i_B)
mat_$th_i_AB <- as.numeric(mat_$th_i_AB)


######### Combination of the data and design of one database ##################

print("")
print("# Gathering the data")
Sys.sleep(ltds)

## Extracting textural data

nS <- vector()

for (k in 1:nbr_point) {

  aa <- paste(mat_$Ref_Rho_d[k],".moy",sep="")
  nS[k] <- which(names(data_txtr) == aa)          ## to get corresponding txtr data

}

tab <- as.data.frame(t(data_txtr[seq(7,9,1),nS]))

## reordering the column positions

nC <- c(seq(1,3),8,seq(4,7))

mat_ <- mat_[,nC]                                ## to reorder the columns

Data_field <- cbind(mat_,tab*100)

names(Data_field)[9:11] <- c("pclay","psilt","psand")

row.names(Data_field) <- paste(mat_$Tra_pos,mat_$Point,sep=".")

######### Creating database for soil texture ##################

print("")
print("# Creating database for Soil texture")

## Soil texture

Data_field_txtr <- Data_field[,c("pclay","psilt","psand","Rho_d")]

######### Texture triangle ##################


# stop("interruption of the program", call. = FALSE)


## Soil texture - plot

# pch_tr <- rep(c(rep(3,7),rep(1,3),rep(7,3)),3)
pch_tr <- c(rep(1,16),rep(2,8),rep(3,8),rep(4,8))
col_tr <- c(rep("#0000FF",16),rep("#006633",8),rep("#FF8040",8),rep("#FF0033",8))

## Texture triangle

windows(width = 5, height = 7)

TT.plot(
  class.sys   = "USDA.TT",
  tri.data    = Data_field_txtr,
  css.names = c("pclay", "psilt", "psand"),
  z.name      = "Rho_d",
  z.cex.range = c(1,1),
  z.pch       = pch_tr,
  col         = col_tr,
  main        = "Soil texture - ENTPE",
  cex.axis    = 0.8,
  cex.lab     = 0.8
)  #
```

```r
## First stats on the spatial variation of texture and porosity

### Study of rho_d

print("")
print("# Studying bulk density")
Sys.sleep(ltds)

## Graphical options

colg <- c(rep("#0000FF",4),rep("#006633",2),rep("#FF8040",2),rep("#FF0033",2))
colg2 <- unique(colg)

# dimensions for png files

width_g  <- 1200 ## height of the first plot
width_g2 <- 800 ## height of the second plot
height_g <- 800

# Police size and format

cex.lab_g   <- 1.5
cex.axis_g  <- 1.25
cex.leg     <- 1.5
font.lab_g  <- 2  ## 2 for bold

## Text for the legend

leg.txt <- c("Site 1", "Site 2", "Site 3","Site 4")

## Gathering per transects

windows(height = 7, width = 10)

Boxplot(Rho_d ~ Tra_pos, data = Data_field,
        # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
        xlab = "Site-Transect", ylab = "Rho_d", col = colg)

legend("bottomright", legend = leg.txt,
       col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n")

## Gathering per sites

windows(height = 7, width = 7)

Boxplot(Rho_d ~ Site, data = Data_field,
        # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
        xlab = "Site", ylab = "Rho_d", col = colg2)

legend("bottomright", legend = leg.txt,
       col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n")

## Anovas

aov.Rhod_Site          <- aov(Rho_d ~ Site, data=Data_field)
aov.Rhod_Site_Transect <- aov(Rho_d ~ Site + Transect + Site:Transect, data=Data_field)

sum.aov.Rhod_Site          <- summary.aov(aov.Rhod_Site)           # significant
sum.aov.Rhod_Site_Transect <- summary.aov(aov.Rhod_Site_Transect)   # significant for site and slighly for Site:Transect

print(sum.aov.Rhod_Site)
print(sum.aov.Rhod_Site_Transect)

## Saving the figures

if (renew_figs == "yes") {

  setwd(T_figs)

  ## Fig 1

  fig_name <- "1a_Rhod_Transect.png"

  png(file = fig_name, width = width_g, height = height_g)

  Boxplot(Rho_d ~ Tra_pos, data = Data_field,
          # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
          xlab = "Site-Transect", ylab = "Rho_d", col = colg,
          cex.axis = cex.axis_g, cex.lab = cex.lab_g, font.lab = font.lab_g)

  legend("bottomright", legend = leg.txt,
         col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n", cex = cex.leg)

  dev.off()

  ## Fig 2

  fig_name <- "1b_Rhod_Sites.png"

  png(file = fig_name, width = width_g2, height = height_g)

  Boxplot(Rho_d ~ Site, data = Data_field,
          # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
          xlab = "Site", ylab = "Rho_d", col = colg2,
          cex.axis = cex.axis_g, cex.lab = cex.lab_g, font.lab = font.lab_g)

  legend("bottomright", legend = leg.txt,
         col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n", cex = cex.leg)

  dev.off()

  setwd(T_wd)

}
```

```r

### Study of clay content

print("")
print("# Studying clay content")
Sys.sleep(ltds)

## Gathering per transects

# colg <- c(rep(2,4),rep(3,2),rep(4,2),rep(5,2))

windows(height = 7, width = 10)

Boxplot(pclay ~ Tra_pos, data = Data_field,
        # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
        xlab = "Site-Transect", ylab = "Clay (%)", col = colg)

legend("topright", legend = leg.txt,
       col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n")

## Gathering per sites

# colg <- c(2,3,4,5)

windows(height = 7, width = 7)

Boxplot(pclay ~ Site, data = Data_field,
        # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
        xlab = "Site", ylab = "Clay (%)", col = colg2)

legend("topright", legend = leg.txt,
       col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n")

## Anovas

aov.pclay_Site          <- aov(pclay ~ Site, data=Data_field)
aov.pclay_Site_Transect <- aov(pclay ~ Site + Transect + Site:Transect, data=Data_field)

sum.aov.pclay_Site          <- summary.aov(aov.pclay_Site)            # significant
sum.aov.pclay_Site_Transect <- summary.aov(aov.pclay_Site_Transect)   # significant for site and slighly for Site:Transect

print(sum.aov.pclay_Site)
print(sum.aov.pclay_Site_Transect)

## Saving the figures

if (renew_figs == "yes") {

  setwd(T_figs)

  ## Fig 1

  fig_name <- "2a_Clay_Transect.png"

  png(file = fig_name, width = width_g, height = height_g)

  Boxplot(pclay ~ Tra_pos, data = Data_field,
          # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
          xlab = "Site-Transect", ylab = "Clay (%)", col = colg,
          cex.axis = cex.axis_g, cex.lab = cex.lab_g, font.lab = font.lab_g)

  legend("bottomright", legend = leg.txt,
         col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n", cex = cex.leg)

  dev.off()

  ## Fig 2

  fig_name <- "2b_Clay_Sites.png"

  png(file = fig_name, width = width_g2, height = height_g)

  Boxplot(pclay ~ Site, data = Data_field,
          # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
          xlab = "Site", ylab = "Clay (%)", col = colg2,
          cex.axis = cex.axis_g, cex.lab = cex.lab_g, font.lab = font.lab_g)

  legend("bottomright", legend = leg.txt,
         col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n", cex = cex.leg)

  dev.off()

  setwd(T_wd)

}

### Study of silt content

print("")
print("# Studying silt content")
Sys.sleep(ltds)

## Gathering per transects

# colg <- c(rep(2,4),rep(3,2),rep(4,2),rep(5,2))

windows(height = 7, width = 10)

Boxplot(psilt ~ Tra_pos, data = Data_field,
        # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
        xlab = "Site-Transect", ylab = "Silt (%)", col = colg)

legend("topright", legend = leg.txt,
       col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n")

```

```r
## Gathering per sites

#  colg <- c(2,3,4,5)

windows(height = 7, width = 7)

Boxplot(psilt ~ Site, data = Data_field,
        # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
        xlab = "Site", ylab = "Silt (%)", col = colg2)

legend("topright", legend = leg.txt,
       col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n")

## Anovas

aov.psilt_Site          <- aov(psilt ~ Site, data=Data_field)
aov.psilt_Site_Transect <- aov(psilt ~ Site + Transect + Site:Transect, data=Data_field)

sum.aov.psilt_Site          <- summary.aov(aov.psilt_Site)            # significant
sum.aov.psilt_Site_Transect <- summary.aov(aov.psilt_Site_Transect)   # significant for site and slighly for Site:Transect

print(sum.aov.psilt_Site)
print(sum.aov.psilt_Site_Transect)

## Saving the figures

if (renew_figs == "yes") {

  setwd(T_figs)

  ## Fig 1

  fig_name <- "3a_Silt_Transect.png"

  png(file = fig_name, width = width_g, height = height_g)

  Boxplot(psilt ~ Tra_pos, data = Data_field,
          # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
          xlab = "Site-Transect", ylab = "Silt (%)", col = colg,
          cex.axis = cex.axis_g, cex.lab = cex.lab_g, font.lab = font.lab_g)

  legend("bottomright", legend = leg.txt,
         col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n", cex = cex.leg)

  dev.off()

  ## Fig 2

  fig_name <- "3b_Silt_Sites.png"

  png(file = fig_name, width = width_g2, height = height_g)

  Boxplot(psilt ~ Site, data = Data_field,
          # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
          xlab = "Site", ylab = "Silt (%)", col = colg2,
          cex.axis = cex.axis_g, cex.lab = cex.lab_g, font.lab = font.lab_g)

  legend("bottomright", legend = leg.txt,
         col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n", cex = cex.leg)

  dev.off()

  setwd(T_wd)

}

### Study of sand content

print("")
print("# Studying sand content")
Sys.sleep(ltds)

## Gathering per transects

# colg <- c(rep(2,4),rep(3,2),rep(4,2),rep(5,2))

windows(height = 7, width = 10)

Boxplot(psand ~ Tra_pos, data = Data_field,
        # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
        xlab = "Site-Transect", ylab = "sand (%)", col = colg)

legend("topright", legend = leg.txt,
       col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n")

## Gathering per sites

# colg <- c(2,3,4,5)

windows(height = 7, width = 7)

Boxplot(psand ~ Site, data = Data_field,
        # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
        xlab = "Site", ylab = "Sand (%)", col = colg2)

legend("topright", legend = leg.txt,
       col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n")

## Anovas

aov.psand_Site          <- aov(psand ~ Site, data=Data_field)
aov.psand_Site_Transect <- aov(psand ~ Site + Transect + Site:Transect, data=Data_field)

```

```r
sum.aov.psand_Site          <- summary.aov(aov.psand_Site)           # significant
sum.aov.psand_Site_Transect <- summary.aov(aov.psand_Site_Transect)   # significant for site and slighly for Site:Transect

print(sum.aov.psand_Site)
print(sum.aov.psand_Site_Transect)

## Saving the figures

if (renew_figs == "yes") {

  setwd(T_figs)

  ## Fig 1

  fig_name <- "4a_Sand_Transect.png"

  png(file = fig_name, width = width_g, height = height_g)

  Boxplot(psand ~ Tra_pos, data = Data_field,
          # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
          xlab = "Site-Transect", ylab = "Sand (%)", col = colg,
          cex.axis = cex.axis_g, cex.lab = cex.lab_g, font.lab = font.lab_g)

  legend("bottomright", legend = leg.txt,
         col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n", cex = cex.leg)

  dev.off()

  ## Fig 2

  fig_name <- "4b_Sand_Sites.png"

  png(file = fig_name, width = width_g2, height = height_g)

  Boxplot(psand ~ Site, data = Data_field,
          # yaxp = c_axp_IR, ylim = c_lim_IR,
          xlab = "Site", ylab = "Sand (%)", col = colg2,
          cex.axis = cex.axis_g, cex.lab = cex.lab_g, font.lab = font.lab_g)

  legend("bottomright", legend = leg.txt,
         col = colg2, pch = rep(15,4), bty = "n", cex = cex.leg)

  dev.off()

  setwd(T_wd)

}


######## Savings ########################################################################

## saving the data

Rdata_file_field <- "Field_data.RData"

if (renew_results == "yes")  {

  setwd(T_results)

  save(file = Rdata_file_field,
       Data_field)

  setwd(T_wd)

  srce_file   <- paste(T_results,Rdata_file_field,sep="/")
  destin_file <- paste(T_results_2,Rdata_file_field,sep="/")

  if (file.exists(destin_file)) { file.remove(destin_file) }  ## to remove the file
  file_copy(srce_file, destin_file)     ## to copy the same file in the folder data

}

print("")
print("# That's all folks")
Sys.sleep(ltds)
print(" !! Don't forget to move your files to a safe place!!")
print(" !! All files will be overwritten at next round!!")
```

VII.1.3 Script_R_3a_Infiltrations_data. R

```r
########## Initialization ####################################################

  rm(list =ls())      # efface les data

  ## kills all the graphic windows
  while (dev.cur() != 1) {dev.off()}

  ltds <- 1           # reading time, i.e., time for sys.sleep

  renew <- "yes"

print("")
print("# Initialization - directory creation & loading functions")
Sys.sleep(ltds)

######### libraries ##########################################################

  library(fs)                                ## functions for file management
  library(splines)
  library(car)
  library(sandwich)
  library(RcmdrMisc)
  library(latex2exp)
  library(stringr)
  library(hydroGOF)
  library(openxlsx)

# library(here)

######## setting data and saving directory ###################################


## Main directory #####

  T_wd <- getwd()

## Other directories and source files

  T_source    <- paste(T_wd,'/0_Functions',sep="")
  T_data      <- paste(T_wd,"/1_Data/3_CI",sep="")
  T_figs      <- paste(T_wd,"/2_Figs/3_CI",sep="")
  T_results   <- paste(T_wd,"/3_Results/3_CI",sep="")
  T_results_2 <- paste(T_wd,"/1_Data/4_AOV",sep="")

  file_source <- paste(T_source,'/0_tool_func.r',sep="")
  source(file_source)

  ifelse(!dir.exists(T_data), dir.create(T_data), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_figs), dir.create(T_figs), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results), dir.create(T_results), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results_2), dir.create(T_results_2), "Folder exists already")

  ## kills all the files in the result folders - to comment to discard

  if (renew == "yes")  { unlink(paste(T_results,"/*",sep="")) }

######### Upload data #################

print("")
print("# Uploading the data")
Sys.sleep(ltds)

  setwd(T_data)

  file_names <- list.files(pattern = ".csv")
  nbr_files <- length(file_names)

  ifelse(nbr_files>1,
         print("Please, stop & gather all your data in one file"),
         file_name <- file_names[1])

  # Uploading cumulative infiltrations

  mat_ <- read.csv2(file_name, sep=";", na.strings=TRUE, header=TRUE)

  nbr_CI <- length(mat_)/2                          ## number of infiltrations

  setwd(T_wd)                                      ## to come back to working folder

  # Extracting the names of measures

  # list names

  sample_names_ <- names(mat_)[seq(2,nbr_CI*2,2)]

  sample_names <- substr(sample_names_,3,200)     ## 200 because > all lengths

  # creating lists with cumulative infiltrations

  print("")
  print("# Creating lists with the data")
  Sys.sleep(ltds)

  I <- list()
  t <- list()
  IR <- as.numeric()

  for (k in 1:nbr_CI){

    kk <- 2*(k-1)+1

    t_ <- as.numeric(mat_[,kk])/60            ## units: from s to min
    I_ <- as.numeric(mat_[,kk+1])             ## already in mm
```

```
    t[[k]] <- t_[!is.na(t_)]
    I[[k]] <- I_[!is.na(I_)]

    IR[k]  <- max(I[[k]])/max(t[[k]])

  }

  names(t)  <- sample_names
  names(I)  <- sample_names
  names(IR) <- sample_names


 # Corresponding sites, transects, points, and devices

  print("")
  print("# Creating factors (site, transect, device, etc.)")
  Sys.sleep(ltds)

  site     <- as.factor(substr(sample_names,1,2))
  transect <- as.factor(substr(sample_names,4,5))
  point    <- as.factor(substr(sample_names,7,8))

  tra_pos <- as.factor(substr(sample_names,1,5))
  tpos_level <- levels(tra_pos)
  nbr_tpos   <- nlevels(tra_pos)

  device    <- factor(substr(sample_names,10,200),levels = c("B","AB"))

  point_pos <- unique(sub("\\.[^.]+$", "", sample_names))     ## to remove char after the dot
  nbr_pos     <- length(point_pos)

  ######### Building the difference between datasets #################

  print("")
  print("# Building the difference between AB and B")
  Sys.sleep(ltds)

  ## matrix of CI per points

  kkAB <- matrix(NA, nrow = nbr_pos, ncol = 2)        ## indices of the position of corresponding B & AB exp.

  for (i in 1:nbr_pos) {
     kkAB[i,1]  <- which(sample_names == paste(point_pos[i],".B",sep=""))
     kkAB[i,2]  <- which(sample_names == paste(point_pos[i],".AB",sep=""))
  }

  colnames(kkAB) <- c("B","AB")
  rownames(kkAB) <- point_pos

  t_max <- matrix(NA, nrow = nbr_pos, ncol = 2)

  for (i in 1:nbr_pos) {
    t_max[i,1]  <- max(t[[kkAB[i,1]]])*60
    t_max[i,2]  <- max(t[[kkAB[i,2]]])*60
  }

  I_max <- matrix(NA, nrow = nbr_pos, ncol = 2)

  for (i in 1:nbr_pos) {
    I_max[i,1]  <- max(I[[kkAB[i,1]]])
    I_max[i,2]  <- max(I[[kkAB[i,2]]])
  }

  colnames(I_max) <- c("B","AB")
  rownames(I_max) <- point_pos

  ## predicting CI for beerkan times

  t_ref    <- list()                                    ## creation of lists of CI for same times
  t_ref_r  <- list()

  I_ref_B  <- list()                                    ## CI data for times given by Beerkan exp.
  I_ref_AB <- list()                                    ## AB for Automated Beerkan & B for Beerkan
  xd_t_AB  <- list()
  yd_I_AB  <- list()

  DI_ref   <- list()
  DI_ref_r <- list()

  for (i in 1:nbr_pos) {

    kimax <- which(t[[kkAB[i,1]]] < max(t[[kkAB[i,2]]])) ## to select data below the maximum value of AB

    t_ref[[i]]   <- t[[kkAB[i,1]]][kimax]
    I_ref_B[[i]] <- I[[kkAB[i,1]]][kimax]

    aa           <- t[[kkAB[i,1]]][kimax]/max(t_ref[[i]])
    t_ref_r[[i]] <- aa[2:length(aa)]
    rm(aa)

    ## selecting the right indices for smoothing (duplicates in AB data)

    ntot <- length(t[[kkAB[i,2]]])

    kk1  <- which(duplicated(t[[kkAB[i,2]]]))
    kk2  <- which(duplicated(I[[kkAB[i,2]]]))
    kk3_ <- which(t[[kkAB[i,2]]] > max(t_ref[[i]]))
    kk3  <- kk3_[2:length(kk3_)]

    kkr <- c(kk1,kk2,kk3)              ## union of wrong indices (duplicates)

    kk <- seq(1,ntot)
```

```
    kk <- kk[!(kk %in% kkr)]       ## to remove the wrong indices

    xd <- t[[kkAB[i,2]]][kk]
    yd <- I[[kkAB[i,2]]][kk]

    xd_t_AB[[i]]  <- xd
    yd_I_AB[[i]]  <- yd

    I_ref_AB[[i]] <- Fspline(xd,yd,t_ref[[i]])

    DI_ref[[i]]   <- I_ref_AB[[i]]-I_ref_B[[i]]

    bb            <- Rel_Er(I_ref_AB[[i]],I_ref_B[[i]])
    DI_ref_r[[i]] <- bb[2:length(bb)]
    rm(bb)

  }

  names(t_ref)     <- point_pos
  names(t_ref_r)   <- point_pos

  names(I_ref_B)   <- point_pos
  names(I_ref_AB)  <- point_pos
  names(xd_t_AB)   <- point_pos
  names(yd_I_AB)   <- point_pos

  names(DI_ref)    <- point_pos
  names(DI_ref_r)  <- point_pos

  ######### Computing GOF indicators between A and AB ##################

  print("")
  print("# Computing GOF indicators between A and AB")
  Sys.sleep(ltds)

  ## Computing the gof indicators for all cases

  ygof   <- list()

  for (i in 1:nbr_pos) {

    ygof[[i]] <- gof(sim = I_ref_AB[[i]], obs = I_ref_B[[i]])

  }

  names(ygof)  <- point_pos

## Gathering the whole data as a table

nc <- seq(1,length(site),2)                                    ### !! two occurrences with same name of point and site

gof_tab1 <- data.frame(factor(site[nc], levels=levels(site)))  ## addition of the site
gof_tab2 <- data.frame(factor(tra_pos[nc], levels=levels(tra_pos)))   ## transect

gof_tab3 <- t(data.frame(ygof[[1]]))                           ## gof for the first point

for (i in 2:nbr_pos) {

  gof_tab3 <- rbind(gof_tab3,t(data.frame(ygof[[i]])))

}

colnames_tab <- c("site","transect",colnames(gof_tab3))

gof_tab <- cbind(gof_tab1,gof_tab2,gof_tab3)

row.names(gof_tab) <- point_pos
colnames(gof_tab)  <- colnames_tab

### Selection of the statistics for the paper

stats<- c("ME","PBIAS %","NRMSE %","R2")  ### choose your favorite statistics

gof_tab_stats <- gof_tab[,stats]

## function for computing the mean and sd per subgroups

## group_msd stored in tool functions (see tool_function file)

gof_tab_transect <- group_msd(gof_tab,stats,"transect")
gof_tab_site     <- group_msd(gof_tab,stats,"site")


######### Save image of the results ####################

print("")
print("# Saving an image of the results (Rdata files)")
Sys.sleep(ltds)

Rdata_file_CI <- "CI_tot.RData"
Rdata_file_IR <- "IR_tot.RData"

if (renew == "yes")  {

setwd(T_results)
```

```
  save(file = Rdata_file_CI,
       t,I,t_ref,t_ref_r,I_ref_B,I_ref_AB,xd_t_AB,yd_I_AB,DI_ref,DI_ref_r,
       gof_tab_stats,gof_tab_site,gof_tab_transect,
       site,transect,point,tra_pos,point_pos,
       device,tpos_level,nbr_tpos,nbr_pos)

  save(file = Rdata_file_IR,
       IR,gof_tab_stats,
       site,transect,point,tra_pos,device,tpos_level,nbr_tpos)

  wb <- createWorkbook()

  addWorksheet(wb, "gof_points")
  addWorksheet(wb, "gof_transects")
  addWorksheet(wb, "gof_sites")

  writeData(wb, "gof_points", gof_tab_stats, rowNames = TRUE)
  writeData(wb, "gof_transects", gof_tab_transect, rowNames = TRUE)
  writeData(wb, "gof_sites", gof_tab_site, rowNames = TRUE)

  saveWorkbook(wb, "zz_gof_stats.xlsx", overwrite = TRUE)

  setwd(T_wd)

  ## Copying files to Data folder "1_Data\3_CI"

  srce_file <- paste(T_results,Rdata_file_CI,sep="/")
  destin_file <- paste(T_data,Rdata_file_CI,sep="/")

  if (file.exists(destin_file)) { file.remove(destin_file) }  ## to remove the file
  file_copy(srce_file, destin_file)     ## to copy the same file in the folder data

  srce_file <- paste(T_results,Rdata_file_IR,sep="/")
  destin_file <- paste(T_data,Rdata_file_IR,sep="/")

  if (file.exists(destin_file)) { file.remove(destin_file) }
  file_copy(srce_file, destin_file)

  ## Copying files to Data folder "1_Data\4_AOV"

  srce_file <- paste(T_results,Rdata_file_IR,sep="/")
  destin_file <- paste(T_results_2,Rdata_file_IR,sep="/")

  if (file.exists(destin_file)) { file.remove(destin_file) }
  file_copy(srce_file, destin_file)

  }

print("")
print("# That's all folks")
Sys.sleep(ltds)
print(" !! Don't forget to move your files to a safe place!!")
print(" !! All files will be overwritten at next round!!")

# stop("interruption of the program", call. = FALSE)

```

VII.1.4 Scripts_R_3b_BEST_Input.R

```
#

######### Initialization #########################################################

  rm(list =ls())      # efface les data

  ## kills all the graphic windows
  while (dev.cur() != 1) {dev.off()}

  ltds <- 1           # reading time, i.e., time for sys.sleep

  num_digits <- 7     # number of digits

  renew <- "yes"

  print("")
  print("# Initialization - directory creation & loading functions")
  Sys.sleep(ltds)

######### libraries ##############################################################

  library(fs)                                ## functions for file management
  library(splines)
  library(car)
  library(sandwich)
  library(RcmdrMisc)
  library(latex2exp)
  library(stringr)

# library(here)

######## setting data and saving directory ########################################


## Main directory #####

  T_wd <- getwd()

## Other directories and source files

  T_source      <- paste(T_wd,'/0_Functions',sep="")
  T_data        <- paste(T_wd,"/1_Data/3_CI",sep="")
  T_data_2      <- paste(T_wd,"/3_Results/1_PSD",sep="")    ## /R/3_Results/1_PSD
  T_data_3      <- paste(T_wd,"/3_Results/2_Rhod-thi",sep="")    ## /R/3_Results/2_Rhod-thi

  T_figs        <- paste(T_wd,"/2_Figs/3_CI",sep="")
  T_results     <- paste(T_wd,"/3_Results/3_CI/BEST",sep="")

  file_source <- paste(T_source,'/0_tool_func.r',sep="")
  source(file_source)

  ifelse(!dir.exists(T_data), dir.create(T_data), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_data_2), dir.create(T_data_2), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_data_3), dir.create(T_data_3), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_figs), dir.create(T_figs), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results), dir.create(T_results), "Folder exists already")

  ## kills all the files in the result folders - to comment to discard

  if (renew == "yes")  { unlink(paste(T_results,"/*",sep="")) }

  ## Names of the Rdata files created

  Rdata_file_CI    <- "CI_tot.RData"
  Rdata_file_IR    <- "IR_tot.RData"
  Rdata_file_field <- "Field_data.RData"    ## Field_data.RData

######### Upload data ##################

  print("")
  print("# Uploading the data")
  Sys.sleep(ltds)

  ## Loading Rdata data file for cumulative infiltrations

    setwd(T_data)

    load(Rdata_file_CI)
    rm(site,transect,point,tra_pos,device,tpos_level,nbr_tpos) ## removes uninteresting data

    setwd(T_wd)

    nbr_CI <- length(I)

    names_CI <- names(I)

  ## Loading Rdata data file for PSD

    setwd(T_data_3)

    load(Rdata_file_field)

    setwd(T_wd)

    Data_field_0 <- Data_field     ## to stock the matrix

    # Building the data frame of field data for all AB & B runs

      # Data for AB experiments
```

```
100
101       Data_field_a <- Data_field
102
103       row.names(Data_field_a) <- paste(row.names(Data_field), "AB", sep=".")
104
105       Data_field_a$th_i <- Data_field_a$th_i_AB
106
107       Data_field_a <- Data_field_a[,c(seq(1,6),12)]
108
109       Rdata_field <- rbind(Rdata_file_field, Rdata_file_field)
110
111
112       # Data for B experiments
113
114       Data_field_b <- Data_field
115
116       row.names(Data_field_b) <- paste(row.names(Data_field), "B", sep=".")
117
118       Data_field_b$th_i <- Data_field_b$th_i_B
119
120       Data_field_b <- Data_field_b[,c(seq(1,6),12)]
121
122       # Combination of the two matrices
123
124       nbr_data <- dim(Data_field)[1]*2     ## expected number of WI exp.
125
126       rm(Data_field)
127
128       Data_field <- data.frame()
129
130       for (i in 1:(nbr_data/(2*4))) {   ## to order in the same way as names(I)
131
132         kk <- vector()
133         kk <- seq((i-1)*4+1,(i-1)*4+4)
134
135         Data_field <- rbind(Data_field,
136                             Data_field_b[kk,],rbind(Data_field_a[kk,]))
137
138       }
139
140    ## Loading sample PSD
141
142     file_names_PSD <- "FF_psd.csv"
143
144     setwd(T_data_2)
145     mat_psd <- read.csv(file_names_PSD, sep=",", na.strings=TRUE, header=TRUE)
146     setwd(T_wd)
147
148     nbr_psd <- length(mat_psd)-2                          ## number of infiltrations
149
150     # if (nbr_CI != nbr_psd) {
151     #   print("Caution!! The number of CI and PSD do not correspond")}
152
153     xk   <- list()
154     xd   <- list()
155     ypsd <- list()
156
157     for (i in 1:nbr_psd) {
158
159       xk[[i]]   <- which(mat_psd[,i+2] != 1 & mat_psd[,i+2]>10^(-num_digits))
160       xd[[i]]   <- mat_psd[xk[[i]],2]/1000
161       ypsd[[i]] <- mat_psd[xk[[i]],i+2]
162
163     }
164
165     names_PSD_ <- names(mat_psd)[3:length(mat_psd)]
166     names_PSD  <- gsub(".moy", "", names_PSD_)
167
168     names(xk)   <- names_PSD
169     names(xd)   <- names_PSD
170     names(ypsd) <- names_PSD
171
172  # Corresponding sites, transects, points, and devices
173
174    print("")
175    print("# Creating the txt files for BEST inputs")
176    Sys.sleep(ltds)
177
178    ## Correspondence of indices for Data field versus CI
179
180      kk_field_CI <- vector()
181      kk_psd_CI   <- vector()
182
183      for (i in 1:nbr_CI) {
184        kk_field_CI[i] <- which(row.names(Data_field) == names_CI[i])
185        kk_psd_CI[i]   <- which(names(ypsd) ==  Data_field$Ref_Rho_d[kk_field_CI[i]])
186      }
187
188    ## New data bases for BEST inputs
189
190      Data_field_BEST  <- Data_field[kk_field_CI,]
191      yPSD_BEST        <- ypsd[kk_psd_CI]
192      xd_BEST          <- xd[kk_psd_CI]
193
194      # Validation
195
196      unique(row.names(Data_field_BEST) == names_CI)          ## Data_field_BEST properly ranked
197      unique(names(yPSD_BEST) == Data_field_BEST$Ref_Rho_d)   ## yPSD_BEST corresponds to Data_field_BEST
198
```

```
    # Changing the name of yPSD_BEST (as a function of CI names)

    names(yPSD_BEST) <- names_CI
    names(xd_BEST)   <- names_CI

## Building the vector for BEST input

    ring_size <- rep(75,nbr_CI)             ## Radius of the infiltration device

    BEST_input <- list()

    for (i in 1:nbr_CI) {

      BEST_input[[i]] <- data.frame()

      BEST_input[[i]] <- rbind(BEST_input[[i]], c(Data_field_BEST$Rho_d[i],0))
      names(BEST_input[[i]]) <- c("V1","V2")        ## necessary to allow the combination with other data.frames

      BEST_input[[i]] <- rbind(BEST_input[[i]], c(2.65,0))
      BEST_input[[i]] <- rbind(BEST_input[[i]], c(Data_field_BEST$th_i[i],0))
      BEST_input[[i]] <- rbind(BEST_input[[i]], c(ring_size[i],0))

      aa <- as.data.frame(cbind(xd_BEST[[i]],yPSD_BEST[[i]]))
      BEST_input[[i]] <- rbind(BEST_input[[i]], aa)

      bb <- as.data.frame(cbind(t[[i]]*60,I[[i]]))          ## to convert into s (t is already in min)
      BEST_input[[i]] <- rbind(BEST_input[[i]], unique(bb))

      BEST_input[[i]] <- rbind(BEST_input[[i]], c(0,0))

      ## changing the formats

      aa <- BEST_input[[i]]

      aa[, sapply(aa, is.numeric)] <- lapply(aa[, sapply(aa, is.numeric)],
                                             function(x) sprintf(paste("%.", num_digits, "f", sep = ""), x))

      BEST_input[[i]] <- aa

    }

    names(BEST_input) <- names_CI

    ######### Save image of the results ####################

    print("")
    print("# Saving input files for BEST")
    Sys.sleep(ltds)

    file_name_txt <- paste(gsub("\\.", "_", names_CI),"txt",sep=".")

    if (renew == "yes")  {

      setwd(T_results)

      for (i in 1:nbr_CI)  {

        write.table(BEST_input[[i]], file = file_name_txt[i],
                    row.names = FALSE, col.names = FALSE, quote = FALSE)
      }

      setwd(T_wd)

    }

print("")
print("# That's all folks")
Sys.sleep(ltds)
print(" !! Don't forget to move your files to a safe place!!")
print(" !! All files will be overwritten at next round!!")

# stop("interruption of the program", call. = FALSE)
```

VII.1.5 Script_R_3c_Infiltrations_graphs.R

```r

######### Initialization #########################################################

  rm(list =ls())      # efface les data

  ## kills all the graphic windows
  while (dev.cur() != 1) {dev.off()}

  ltds <- 0.25           # reading time, i.e., time for sys.sleep

  renew <- "yes"

print("")
print("# Initialization - directory creation & loading functions")
Sys.sleep(ltds)

######## libraries ###############################################################

  library(splines)
  library(carData)
  library(car)
  library(sandwich)
  library(RcmdrMisc)
  library(latex2exp)
  library(stringr)

# library(here)

######## setting data and saving directory ###################################

## Main directory #####

  T_wd <- getwd()

## Other directories and source files

  T_source  <- paste(T_wd,'/0_Functions',sep="")
  T_data    <- paste(T_wd,"/1_Data/3_CI",sep="")
  T_figs    <- paste(T_wd,"/2_Figs/3_CI",sep="")
  T_results <- paste(T_wd,"/3_Results/3_CI",sep="")

  file_source <- paste(T_source,'/0_tool_func.r',sep="")
  source(file_source)

  ifelse(!dir.exists(T_data), dir.create(T_data), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_figs), dir.create(T_figs), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results), dir.create(T_results), "Folder exists already")

  ## kills all the files in the result folders - to comment to discard

  if (renew == "yes")  { unlink(paste(T_figs,"/*",sep="")) }


######### Upload data ##################

print("")
print("# Loading the data")
Sys.sleep(ltds)

## Loading the data already extracted and treated (with data file)

  setwd(T_data)
  load("CI_tot.RData")
  setwd(T_wd)


################### Figures of cumulative infiltrations ########################

print("")
print("# Plotting the cumulative infiltrations per site")
Sys.sleep(ltds)

## Graphs of the cumulative infiltrations

  # title and graphical options

  pch_ <- seq(15,18,1)
  pch_cex <- c(rep(1.25,3),1.75)
  col_ <- rep(c("#0000FF","#006633","#FF8040","#FF0033"),2)

  xng <- list()

  xng[[1]] <- seq(1,4,1)
  xng[[2]] <- seq(5,8,1)
  xng[[3]] <- seq(1,8,1)

  ## Specific choice                                      ## !!!!!

  print("#  - Plotting one specific case")
  Sys.sleep(ltds)

  xposition <- "S1.T1"
  ytitle <- "yes"

  ## selection of the data

  xnd <- list()
```

```
xnd[[1]] <- which(tra_pos == xposition & device == "B")
xnd[[2]] <- which(tra_pos == xposition & device == "AB")
xnd[[3]] <- which(tra_pos == xposition)

if (ytitle == "yes") {
  title_ <- c("Beerkan","Automated Beerkan",
              paste("All - Position",as.character(xposition), sep = ": "))
  } else {
    title_ <- rep(" ",3) }

## selection of min and max values for axes

ndtot <- xnd[[3]]

t_max <- ceiling(max(unlist(t[ndtot]))/10)*10        ## for axes precision of 10
I_max <- ceiling(max(unlist(I[ndtot]))/50)*50        ## for axes precision of 50

xlim_ <- rep(t_max,3)
ylim_ <- rep(I_max,3)

####### Plotting one figure ###

windows(width = 4*2.5,height = 3)

## Layout and plot parameters ##

par(mfrow = c(1,3), mar = c(4,5,2,2))
par(mgp=c(3,1,0)) # espace entre le graph et les l?gendes : valeurs originales (3,1,0)


for (i in 1:3) {

  nd <- xnd[[i]]                          ## indices for data
  ng <- xng[[i]]                          ## indices for graphical features

  I_graph <- I[nd]                        ## data to be plotted
  t_graph <- t[nd]

  plot(t_graph[[1]],I_graph[[1]],         ## empty plot for setting coordinates
       xlab = expression(t*" [min]"), ylab= expression(I(t)*" [mm]"),
       xlim = c(0,xlim_[i]), ylim = c(0,ylim_[i]), cex.axis=1.25, cex.lab=1.5,
       yaxs ="i",xaxs = "i", type = "n",
       col = col_[ng[1]], pch = pch_[ng[1]])

  for (k in 1:length(nd)) {

    if (ng[k] <5) {
      points(t_graph[[k]],I_graph[[k]], col = col_[ng[k]],
             pch = pch_[ng[k]], cex = pch_cex[ng[k]])
    }
    else
    {
      lines(t_graph[[k]],I_graph[[k]], col = col_[ng[k]], lwd = 1.5)
    }
  }

  title(title_[i], cex.main=1.5)

}

legend("bottomright", legend = c("Point 1", "Point 2", "Point 3", "Point 4"),
       col = col_, pch = pch_, pt.cex = pch_cex, cex = 1.25, bty = "n")

####### Saving the figures of all positions ###

print("#  - Plotting all the figures")
Sys.sleep(ltds)

### Function for saving the figures ###

Fig_CI <- function(xposition, ytitle) {

  setwd(T_figs)

  fig_name <- paste("1_",xposition,"_CI.png", sep="")

  ### selection of the data ###

  xnd <- list()

  xnd[[1]] <- which(tra_pos == xposition & device == "B")
  xnd[[2]] <- which(tra_pos == xposition & device == "AB")
  xnd[[3]] <- which(tra_pos == xposition)

  if (ytitle == "yes") {
    title_ <- c("Beerkan","Automated Beerkan", paste("All - Position",as.character(xposition), sep = ": "))
  } else {
    title_ <- rep(" ",3) }

  ### selection of min and max values for axes ###

  ndtot <- xnd[[3]]

  t_max <- ceiling(max(unlist(t[ndtot]))/10)*10        ## for axes precision of 10
  I_max <- ceiling(max(unlist(I[ndtot]))/50)*50        ## for axes precision of 50

  xlim_ <- rep(t_max,3)
  ylim_ <- rep(I_max,3)

  ####### plotting one figure ###

  png(file = fig_name, width = 900, height = 300)

```

```
    ## Layout and plot parameters

    par(mfrow = c(1,3), mar = c(4,5,2,2))
    par(mgp=c(3,1,0)) # espace entre le graph et les l?gendes : valeurs originales (3,1,0)


    for (i in 1:3) {

      nd <- xnd[[i]]                          ## indices for data
      ng <- xng[[i]]                          ## indices for graphical features

      I_graph <- I[nd]                        ## data to be plotted
      t_graph <- t[nd]

      plot(t_graph[[1]],I_graph[[1]],
           xlab = expression(t*" [min]"), ylab= expression(I(t)*" [mm]"),
           xlim = c(0,xlim_[i]), ylim = c(0,ylim_[i]), cex.axis=1.25, cex.lab=1.5,
           yaxs ="i",xaxs = "i", type = "n",          ## empty plot for setting coordinates
           col = col_[ng[1]], pch = pch_[ng[1]])

      for (k in 1:length(nd)) {

        if (ng[k] <5) {
          points(t_graph[[k]],I_graph[[k]], col = col_[ng[k]],
                 pch = pch_[ng[k]], cex = pch_cex[ng[k]])
        }
        else
        {
          lines(t_graph[[k]],I_graph[[k]], col = col_[ng[k]], lwd = 1.5)
        }
      }

      title(title_[i], cex.main=1.5)

    }

    legend("bottomright", legend = c("Point 1", "Point 2", "Point 3", "Point 4"),
           col = col_, pch = pch_, pt.cex = pch_cex, cex = 1.25, bty = "n")

    dev.off()                                          ## to stop the figure

    setwd(T_wd)

  }

  ### Saving figures in the Figs folder ###

  title_f <- rep("yes",nbr_tpos)
  # title_f <- rep(c("yes","no"),nbr_tpos/2)

  if (renew == "yes")  {

      for (k in 1:nbr_tpos) {
        Fig_CI(xposition = tpos_level[k], ytitle = title_f[k])
      }

    }


#################### Figures of comparison between B v.s. AB ##########

    print("")
    print("# Comparing Beerkan with automated Beerkan")
    Sys.sleep(ltds)

    ## Graphs of the cumulative infiltrations

    # title and graphical options

    pch_ <- seq(15,18,1)
    pch_cex <- c(rep(1.25,3),1.75)
    col_ <- rep(c("#0000FF","#006633","#FF8040","#FF0033"),2)

    ## Specific choice                                          ## !!!!!

    print("#  - Plotting one specific case")
    Sys.sleep(ltds)

    xposition <- "S1.T1"
    ytitle <- "yes"

    if (ytitle == "yes") {
      title_ <- c("AB","AB v.s. B",
                  paste("Er for",as.character(xposition), sep = " "))
    } else {
      title_ <- rep(" ",3) }

    ## selection of the data -> build a list for the data ##

    xpoint     <- vector()
    xpoint_pos <- vector()

    for (i in 1:4) {
      xpoint[i]     <- paste("P", as.character(i), sep="")
      xpoint_pos[i] <- paste(xposition, xpoint[i], sep=".")
    }

    tgraph <- list()
    Igraph <- list()

```

```
  ## Beerkan

for (i in 1:length(xpoint_pos)) {
  ki <- which(point_pos == xpoint_pos[i])
  tgraph[[i]] <- t_ref[[ki]]
  Igraph[[i]] <- I_ref_B[[ki]]
}

kk0 <- length(tgraph)

  ## Automated Beerkan

for (i in 1:length(xpoint_pos)) {
  ki <- which(point_pos == xpoint_pos[i])
  tgraph[[i+kk0]] <- t_ref[[ki]]
  Igraph[[i+kk0]] <- I_ref_AB[[ki]]
}

kk0 <- length(tgraph)

for (i in 1:length(xpoint_pos)) {
  ki <- which(point_pos == xpoint_pos[i])
  tgraph[[i+kk0]] <- xd_t_AB[[ki]]
  Igraph[[i+kk0]] <- yd_I_AB[[ki]]
}

  ## Relative Errors

kk0 <- length(tgraph)

for (i in 1:length(xpoint_pos)) {
  ki <- which(point_pos == xpoint_pos[i])
  tgraph[[i+kk0]] <- t_ref_r[[ki]]
  Igraph[[i+kk0]] <- DI_ref_r[[ki]]
}

aa <- paste(xpoint_pos,"A",sep=".")
bb <- paste(xpoint_pos,"AB",sep=".")
cc <- paste(xpoint_pos,"AB_sm",sep=".")
dd <- paste(xpoint_pos,"DI",sep=".")

names(tgraph) <- c(aa,bb,cc,dd)
names(Igraph) <- c(aa,bb,cc,dd)

rm(aa,bb,cc,dd)

## Selection of data to plot

xnd <- list()                ## selection of data

xnd[[1]] <- seq(5,12)
xnd[[2]] <- c(seq(1,4),seq(9,12))
xnd[[3]] <- seq(13,16)

xng <- list()                ## selection of graphical features

xng[[1]] <- seq(1,8)
xng[[2]] <- seq(1,8)
xng[[3]] <- seq(1,4)

## selection of min and max values for axes

t_max  <- ceiling(max(unlist(xd_t_AB[xpoint_pos]))/10)*10        ## for axes precision of 10
I_max  <- ceiling(max(unlist(yd_I_AB[xpoint_pos]))/50)*50        ## for axes precision of 50

DI_r_max0    <- max(unlist(DI_ref_r[xpoint_pos]))        ## max
DI_r_min0    <- min(unlist(DI_ref_r[xpoint_pos]))        ## min
DI_r_max_abs <- max(c(abs(DI_r_max0),abs(DI_r_min0)))

DI_r_max  <- ceiling(DI_r_max_abs)        ## for axes precision of 50

xlim_ <- list()

xlim_[[1]]  <- c(0,t_max)
xlim_[[2]]  <- c(0,t_max)
xlim_[[3]]  <- c(0,1)

ylim_ <- list()

ylim_[[1]]  <- c(0,I_max)
ylim_[[2]]  <- c(0,I_max)
ylim_[[3]]  <- c(-DI_r_max,DI_r_max)

####### Plotting one figure ###

windows(width = 4*2.5,height = 3)

## Layout and plot parameters ##

par(mfrow = c(1,3), mar = c(4,5,2,2))
par(mgp=c(3,1,0))              # spaces between the graphs and the legends.

## plot 1 & 2

for (i in 1:2)  {

  nd <- xnd[[i]]                          ## indices for data
  ng <- xng[[i]]                          ## indices for graphical features

  I_graph <- Igraph[nd]                        ## data to be plotted
  t_graph <- tgraph[nd]
```

```
  plot(t_graph[[1]],I_graph[[1]],          ## empty plot for setting coordinates
       xlab = expression(t*" [min]"), ylab=expression(I(t)*" [mm]"),
       xlim = xlim_[[i]], ylim = ylim_[[i]], cex.axis=1.25, cex.lab=1.5,
       yaxs ="i",xaxs = "i", type = "n",
       col = col_[ng[1]], pch = pch_[ng[1]])

  for (k in 1:length(nd)) {

    if ((ng[k]-ng[1]) < 4) {     ## points for the 4th first series
      points(t_graph[[k]],I_graph[[k]], col = col_[ng[k]],
             pch = pch_[ng[k]], cex = pch_cex[ng[k]])
    }
    else                         ## lines for the others
    {
      lines(t_graph[[k]],I_graph[[k]], col = col_[ng[k]], lwd = 1.5)
    }
  }

  title(title_[i], cex.main=1.5)

}

legend("bottomright", legend = c("Point 1", "Point 2", "Point 3", "Point 4"),
       col = col_, pch = pch_, pt.cex = pch_cex, cex = 1.25, bty = "n")

## subplot 3

i <- i+1

nd <- xnd[[i]]                           ## indices for data
ng <- xng[[i]]                           ## indices for graphical features

I_graph <- Igraph[nd]                    ## data to be plotted
t_graph <- tgraph[nd]

plot(t_graph[[1]],I_graph[[1]],          ## empty plot for setting coordinates
     xlab = expression(t/t[max]), ylab=expression((I[AB]-I[B])/I[B]*" [%]"),
     xlim = xlim_[[i]], ylim = ylim_[[i]]*100, cex.axis=1.25, cex.lab=1.5,
     yaxs ="i",xaxs = "i", type = "n",
     col = col_[ng[1]], pch = pch_[ng[1]])

abline(0,0)

for (k in 1:length(nd)) {
    points(t_graph[[k]],I_graph[[k]]*100, col = col_[ng[k]],
           pch = pch_[ng[k]], cex = pch_cex[ng[k]], type = "b", lty = 2)
}

title(title_[i], cex.main=1.5)

# ############ Program Interruption ##########################
# stop("Interruption of the program", call. = FALSE)
# ############################################################

####### Saving the figures of all positions ###

print("#  - Plotting all the figures")
Sys.sleep(ltds)

### Function for saving the figures ###

Fig_CI_ABB <- function(xposition, ytitle) {

  setwd(T_figs)

  fig_name <- paste("2_",xposition,"_AB_vs_B.png", sep="")

  if (ytitle == "yes") {
    title_ <- c("AB","AB v.s. B",
                paste("Er for",as.character(xposition), sep = " "))
  } else {
    title_ <- rep(" ",3) }

  ### selection of the data ###

  ## selection of the data -> build a list for the data ##

  xpoint     <- vector()
  xpoint_pos <- vector()

  for (i in 1:4) {
    xpoint[i]     <- paste("P", as.character(i), sep="")
    xpoint_pos[i] <- paste(xposition, xpoint[i], sep=".")
  }

  tgraph <- list()
  Igraph <- list()

  ## Beerkan

  for (i in 1:length(xpoint_pos)) {
    ki <- which(point_pos == xpoint_pos[i])
    tgraph[[i]] <- t_ref[[ki]]
    Igraph[[i]] <- I_ref_B[[ki]]
  }

  kk0 <- length(tgraph)
```

```
## Automated Beerkan

for (i in 1:length(xpoint_pos)) {
  ki <- which(point_pos == xpoint_pos[i])
  tgraph[[i+kk0]] <- t_ref[[ki]]
  Igraph[[i+kk0]] <- I_ref_AB[[ki]]
}

kk0 <- length(tgraph)

for (i in 1:length(xpoint_pos)) {
  ki <- which(point_pos == xpoint_pos[i])
  tgraph[[i+kk0]] <- xd_t_AB[[ki]]
  Igraph[[i+kk0]] <- yd_I_AB[[ki]]
}

## Relative difference

kk0 <- length(tgraph)

for (i in 1:length(xpoint_pos)) {
  ki <- which(point_pos == xpoint_pos[i])
  tgraph[[i+kk0]] <- t_ref_r[[ki]]
  Igraph[[i+kk0]] <- DI_ref_r[[ki]]
}

## names of lists

aa <- paste(xpoint_pos,"A",sep=".")
bb <- paste(xpoint_pos,"AB",sep=".")
cc <- paste(xpoint_pos,"AB_sm",sep=".")
dd <- paste(xpoint_pos,"DI",sep=".")

names(tgraph) <- c(aa,bb,cc,dd)
names(Igraph) <- c(aa,bb,cc,dd)

rm(aa,bb,cc,dd)

## selection of data to plot

xnd <- list()                ## selection of data

xnd[[1]] <- seq(5,12)
xnd[[2]] <- c(seq(1,4),seq(9,12))
xnd[[3]] <- seq(13,16)

xng <- list()                 ## selection of graphical features

xng[[1]] <- seq(1,8)
xng[[2]] <- seq(1,8)
xng[[3]] <- seq(1,4)

### selection of min and max values for axes ###

t_max  <- ceiling(max(unlist(xd_t_AB[xpoint_pos]))/10)*10        ## for axes precision of 10
I_max  <- ceiling(max(unlist(yd_I_AB[xpoint_pos]))/50)*50        ## for axes precision of 50

DI_r_max0    <- max(unlist(DI_ref_r[xpoint_pos]))        ## max
DI_r_min0    <- min(unlist(DI_ref_r[xpoint_pos]))        ## min
DI_r_max_abs <- max(c(abs(DI_r_max0),abs(DI_r_min0)))

DI_r_max  <- ceiling(DI_r_max_abs)        ## for axes precision of 50

xlim_ <- list()

xlim_[[1]]  <- c(0,t_max)
xlim_[[2]]  <- c(0,t_max)
xlim_[[3]]  <- c(0,1)

ylim_ <- list()

ylim_[[1]]  <- c(0,I_max)
ylim_[[2]]  <- c(0,I_max)
ylim_[[3]]  <- c(-DI_r_max,DI_r_max)

####### plotting one figure ###

png(file = fig_name, width = 900, height = 300)

## Layout and plot parameters

par(mfrow = c(1,3), mar = c(4,5,2,2))
par(mgp=c(3,1,0)) # espace entre le graph et les l?gendes : valeurs originales (3,1,0)

par(mfrow = c(1,3), mar = c(4,5,2,2))
par(mgp=c(3,1,0))             # spaces between the graphs and the legends.

## plot 1 & 2

for (i in 1:2)  {

  nd <- xnd[[i]]                          ## indices for data
  ng <- xng[[i]]                          ## indices for graphical features

  I_graph <- Igraph[nd]                        ## data to be plotted
  t_graph <- tgraph[nd]

  plot(t_graph[[1]],I_graph[[1]],         ## empty plot for setting coordinates
       xlab = expression(t*" [min]"), ylab = expression(I(t)*" [mm]"),
       xlim = xlim_[[i]], ylim = ylim_[[i]], cex.axis=1.25, cex.lab=1.5,
       yaxs ="i",xaxs = "i", type = "n",
       col = col_[ng[1]], pch = pch_[ng[1]])

  for (k in 1:length(nd)) {
```

```
        if ((ng[k]-ng[1]) < 4) {     ## points for the 4th first series
          points(t_graph[[k]],I_graph[[k]], col = col_[ng[k]],
                 pch = pch_[ng[k]], cex = pch_cex[ng[k]])
        }
        else                         ## lines for the others
        {
          lines(t_graph[[k]],I_graph[[k]], col = col_[ng[k]], lwd = 1.5)
        }
      }

      title(title_[i], cex.main=1.5)

    }

    legend("bottomright", legend = c("Point 1", "Point 2", "Point 3", "Point 4"),
           col = col_, pch = pch_, pt.cex = pch_cex, cex = 1.25, bty = "n")

    ## subplot 3

    i <- i+1

    nd <- xnd[[i]]                          ## indices for data
    ng <- xng[[i]]                          ## indices for graphical features

    I_graph <- Igraph[nd]                   ## data to be plotted
    t_graph <- tgraph[nd]

    plot(t_graph[[1]],I_graph[[1]],         ## empty plot for setting coordinates
         xlab = expression(t/t[max]), ylab=expression((I[AB]-I[B])/I[B]*" [%]"),
         xlim = xlim_[[i]], ylim = ylim_[[i]]*100, cex.axis=1.25, cex.lab=1.5,
         yaxs ="i",xaxs = "i", type = "n",
         col = col_[ng[1]], pch = pch_[ng[1]])

    abline(0,0)

    for (k in 1:length(nd)) {
      points(t_graph[[k]],I_graph[[k]]*100, col = col_[ng[k]],
             pch = pch_[ng[k]], cex = pch_cex[ng[k]], type = "b", lty = 2)
    }

    title(title_[i], cex.main=1.5)

    dev.off()                                           ## to stop the figure

    setwd(T_wd)

  }

  ### Saving figures in the Figs folder ###

  title_f <- rep("yes",nbr_tpos)
  # title_f <- rep(c("yes","no"),nbr_tpos/2)

  if (renew == "yes")  {

    for (k in 1:nbr_tpos) {
      Fig_CI_ABB(xposition = tpos_level[k], ytitle = title_f[k])
    }

  }

  print("")
  print("# That's all folks")
  Sys.sleep(ltds)
  print(" !! Don't forget to move your files to a safe place!!")
  print(" !! All files will be overwritten at next round!!")

  # stop("interruption of the program", call. = FALSE)
```

VII.1.6 Script_R_4a_Analysis.R

```r
########## Initialization ####################################################

rm(list =ls())      # efface les data

## kills all the graphic windows
while (dev.cur() != 1) {dev.off()}

ltds <- 0.25           # reading time, i.e., time for sys.sleep

renew_results <- "yes"        ## to renew figs stored in folder T_figs
renew_figs    <- "yes"        ## to renew results stored in folder T_results
print_rep     <- "yes"         ## to print aov results

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Initialization - directory creation & loading variables #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

######### libraries ##########################################################

  library(fs)                                  ## functions for file management
  library(splines)
  library(car)
  library(sandwich)
  library(RcmdrMisc)
  library(latex2exp)
  library(stringr)
  library(ggplot2)
  library(patchwork)
  library(openxlsx)


# library(here)

######## setting data and saving directory ###################################


## Main directory #####

  T_wd <- getwd()

## Other directories and source files

  T_source    <- paste(T_wd,'/0_Functions',sep="")
  T_data      <- paste(T_wd,"/1_Data/4_AOV",sep="")
  T_figs      <- paste(T_wd,"/2_Figs/4_AOV",sep="")
  T_results   <- paste(T_wd,"/3_Results/4_AOV",sep="")
  T_results_2 <- paste(T_wd,"/1_Data/5_Comp_BEST",sep="")
  T_results_3 <- paste(T_wd,"/1_Data/6_Dist_BEST",sep="")

  file_source <- paste(T_source,'/0_tool_func.r',sep="")
  source(file_source)

  ifelse(!dir.exists(T_data), dir.create(T_data), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_figs), dir.create(T_figs), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results), dir.create(T_results), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results_2), dir.create(T_results_2), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results_3), dir.create(T_results_3), "Folder exists already")

## kills all the files in the result folders - to comment to discard

  if (renew_results == "yes")  {
    unlink(paste(T_results,"/*",sep=""))
  }

  if (renew_figs == "yes")  {
    unlink(paste(T_figs,"/*",sep=""))
  }


######### upload data #################

  ## Data from BEST inversions

    setwd(T_data)

    Data_best <- read.csv2("BEST_inputs-3.csv", sep=";", fill=TRUE, header=TRUE)

    row.names(Data_best) <- Data_best$ID

    setwd(T_wd)

  ## Rdata from previous computations

   setwd(T_data)

   file_names_R <- list.files(pattern = ".RData")

   for (i in 1:length(file_names_R)) {

     load(file_names_R[i])

   }

   setwd(T_wd)

```

```r
## Creation of a data.frame with all the data

  Data_inf <- as.data.frame(site)
  Data_inf <- cbind(Data_inf,transect)
  Data_inf <- cbind(Data_inf,tra_pos)
  Data_inf <- cbind(Data_inf,point)
  Data_inf <- cbind(Data_inf,device)

  Data_inf$device <- factor(Data_inf$device, levels = c("B", "AB"))
  ## to rearrange the different levels in a different order

  Data_inf$site_dev <- factor(paste(Data_inf$site,Data_inf$device,sep="."),
                              levels = c("S1.B","S1.AB","S2.B","S2.AB","S3.B","S3.AB","S4.B","S4.AB"))
  ## to rearrange the different levels in a different order

  nbr_exp <- nrow(Data_inf)

  row.names(Data_inf) <- paste(site,transect,point,device,sep=".")

## Combination of IR

 # Validation of the correspondence

  unique(row.names(Data_inf) == names(IR))       ## We can gather the data

 # Combination of IR

  IR <- IR*60                                    ## conversion to mm.h^-1

  Data_inf <- cbind(Data_inf,IR)

## Addition of other variables

for (i in 1:nbr_exp) {

  aa <- paste(site[i],transect[i],point[i],sep=".")
  nn <- which(row.names(Data_field)==aa)

  Data_inf[i,"Rho_d"] <- Data_field[nn,"Rho_d"]

  Data_inf[i,"th_i"]  <- ifelse(device[i] == "B", Data_field[nn,"th_i_B"],
                                Data_field[nn,"th_i_AB"])

  Data_inf[i,"pclay"] <- Data_field[nn,"pclay"]

  Data_inf[i,"psilt"] <- Data_field[nn,"psilt"]

  Data_inf[i,"psand"] <- Data_field[nn,"psand"]

}

   ## picking up the data from Data_best basis


   for (i in 1:nbr_exp) {

     nn <- which(row.names(Data_best)== names(IR)[i])

     Data_inf[i,"theta_r"] <- as.numeric(Data_best[nn,"theta_r"])

     Data_inf[i,"theta_s"] <- as.numeric(Data_best[nn,"theta_s"])

     Data_inf[i,"n"]       <- as.numeric(Data_best[nn,"n"])

     Data_inf[i,"eta"]     <- as.numeric(Data_best[nn,"eta"])

     Data_inf[i,"hg_BS"]   <- as.numeric(Data_best[nn,"hg_BS"])

     Data_inf[i,"Ks_BS"]   <- as.numeric(Data_best[nn,"Ks_BS"])

     Data_inf[i,"hg_BI"]   <- as.numeric(Data_best[nn,"hg_BI"])

     Data_inf[i,"Ks_BI"]   <- as.numeric(Data_best[nn,"Ks_BI"])

     Data_inf[i,"hg_BSst"] <- as.numeric(Data_best[nn,"hg_BSst"])

     Data_inf[i,"Ks_BSst"] <- as.numeric(Data_best[nn,"Ks_BSst"])

     Data_inf[i,"hg_BWR"] <- as.numeric(Data_best[nn,"hg_BWR"])

     Data_inf[i,"Ks_BWR"] <- as.numeric(Data_best[nn,"Ks_BWR"])

     Data_inf[i,"hg_BWR3T"] <- as.numeric(Data_best[nn,"hg_BWR3T"])

     Data_inf[i,"Ks_BWR3T"] <- as.numeric(Data_best[nn,"Ks_BWR3T"])

     Data_inf[i,"hg"] <- as.numeric(Data_best[nn,"hg_moy"])

     Data_inf[i,"Ks"] <- as.numeric(Data_best[nn,"Ks_moy"])

   }

   ## to remove unecessary previous variables

   rm(site, transect, tra_pos, point, device, IR)

   ## Additional selection of data

   Data_inf_v0 <- Data_inf
   Data_inf <- Data_inf                          ## Selection of data (if any)
   # Data_inf <- Data_inf[Data_inf$transect=="T1",]
```

```
  ############ Computing the mean and std per transect and site  ##################

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Computing the mean and std per site and device          #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)


   yvar <- c("Rho_d", "pclay", "psilt", "psand", "th_i", "theta_s", "IR",
             "n", "eta", "hg_BS", "Ks_BS", "hg_BI", "Ks_BI", "hg_BSst", "Ks_BSst",
           "hg_BWR", "Ks_BWR","hg_BWR3T", "Ks_BWR3T","hg", "Ks")

    ##           "hg_BWR", "Ks_BWR","hg_BWR3T", "Ks_BWR3T","hg_moy", "Ks_moy")

  ## Means and sd per site (A and B)

  Data_inf_site_dev <- group_msd(Data_inf, yvar,"site_dev")  ## grouped per site*dev
  Data_inf_site     <- group_msd(Data_inf, yvar,"site")      ## grouped per site
  Data_inf_device   <- group_msd(Data_inf, yvar,"device")    ## grouped per site

  ## min and max for each variable

  range_hgBS <- c(min(Data_inf$hg_BS), max(Data_inf$hg_BS))
  range_hgBI <- c(min(Data_inf$hg_BI), max(Data_inf$hg_BI))
  range_hgBSst <- c(min(Data_inf$hg_BSst), max(Data_inf$hg_BSst))
  range_hgBWR <- c(min(Data_inf$hg_BWR), max(Data_inf$hg_BWR))
  range_hgBWR3T <- c(min(Data_inf$hg_BWR3T), max(Data_inf$hg_BWR3T))

  length(which(Data_inf$hg_BWR >0))    ## number of inappropriate values

  range_KsBS <- c(min(Data_inf$Ks_BS), max(Data_inf$Ks_BS))
  range_KsBI <- c(min(Data_inf$Ks_BI), max(Data_inf$Ks_BI))
  range_KsBSst <- c(min(Data_inf$Ks_BSst), max(Data_inf$Ks_BSst))
  range_KsBWR <- c(min(Data_inf$Ks_BWR), max(Data_inf$Ks_BWR))
  range_KsBWR3T <- c(min(Data_inf$Ks_BWR3T), max(Data_inf$Ks_BWR3T))

  length(which(Data_inf$Ks_BWR <0))    ## number of inappropriate values

############ Plots of the data  ##########################################################

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Functions for plotting results                         #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

## Figures de IR ~ Device

## Graphical options

colg <- c(rep("#0000FF",4),rep("#006633",2),rep("#FF8040",2),rep("#FF0033",2))
colg2 <- unique(colg)
colg3 <- c("#0000FF","#FF0033")

# dimensions for png files

width_g   <- 5 ## height of the first plot
width_g2  <- 5*1.5 ## height of the second plot
height_g  <- 5
height_g2 <- 8

# Police size and format

cex.lab_g   <- 1.5
cex.axis_g  <- 1.25
cex.leg     <- 1.5
font.lab_g  <- 2  ## 2 for bold

## Text for the legend

leg.txt <- c("Site 1", "Site 2", "Site 3","Site 4")


############ Function for Analysis of variables ################

## Function for AOV versus site

Fig_AOV_site <- function(yvar, unit, c_lim, pprint) {

  ykk <- which(colnames(Data_inf) == yvar)
  Y <- Data_inf[,ykk]

  ## Scales for axes

  if (length(unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) == 1) {
    if (unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) {
      c_lim <- c(min(Y), max(Y))
    }
  }

```

```r
  ## Y ~ site

  p1 <- ggplot(Data_inf, aes(x = site, y = Y, fill = site)) +
    geom_boxplot() +
    ylim(c_lim) +
    labs(title = paste(yvar," ~ Site", sep=""),
         x = "Site",
         y = paste(yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg2,
                      labels = c("Site 1", "Site 2", "Site 3", "Site 4")) +
    guides(fill = "none") +
    theme(plot.title = element_text(size = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 18),
          axis.title.y = element_text(size = 18),
          axis.text.x  = element_text(size = 14),
          axis.text.y  = element_text(size = 14))

  ## Plotting the fig.

  if (pprint == "yes") {
          windows(width = 4, height = 4)
          print(p1)
    }

  return(p1)

}

## Function for AOV versus device + site

Fig_AOV_dev_site <- function(yvar, unit, c_lim, pprint) {

  ykk <- which(colnames(Data_inf) == yvar)
  Y <- Data_inf[,ykk]

  ## Scales for axes

  if (length(unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) == 1) {
    if (unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) {
      c_lim <- c(min(Y), max(Y))
    }
  }

  ## Y ~ device + site + site:device

  p1 <- ggplot(Data_inf, aes(x = site_dev, y = abs(Y), fill = site)) +
        geom_boxplot() +
        ylim(c_lim) +
        labs(title = paste(yvar," ~ Device + Site + Device:Site", sep=""),
             x = "Device and Site",
             y = paste(yvar," (",unit,")",sep="")) +
        scale_fill_manual(values = colg2,
                          labels = c("Site 1", "Site 2", "Site 3", "Site 4")) +
        guides(fill = "none") +
        theme(plot.title = element_text(size = 12),
              axis.title.x = element_text(size = 0))

  ## Y ~ device

  p2 <- ggplot(Data_inf, aes(x = device, y = abs(Y), fill = device)) +
        geom_boxplot() +
        ylim(c_lim) +
        labs(title = paste(yvar," ~ Device", sep=""),
             x = "Device",
             y = paste(yvar," (",unit,")",sep="")) +
        scale_fill_manual(values = colg3) +
        guides(fill = "none")  +
        theme(plot.title = element_text(size = 0),
              axis.title.x = element_text(size = 0))

  ## Y ~ site

  p3 <- ggplot(Data_inf, aes(x = site, y = abs(Y), fill = site)) +
        geom_boxplot() +
        ylim(c_lim) +
        labs(title = paste(yvar," ~ Site", sep=""),
             x = "Site", y = "") +
        scale_fill_manual(values = colg2) +
        guides(fill = "none") +                    # to suppress legend
        theme(plot.title = element_text(size = 0),
              axis.title.x = element_text(size = 0))

  ## Figure de Y ~ site | Device

  p4 <- ggplot(Data_inf, aes(x = site, y = abs(Y), fill = site)) +
        geom_boxplot() +
        ylim(c_lim) +
        labs(title = paste(yvar," ~ Site | Device",sep=""),
             x = "Site", y = paste(yvar," (",unit,")",sep="")) +
        scale_fill_manual(values = colg2) +
        facet_grid(. ~ device, scales = "fixed") +
        guides(fill = "none") +                    # to suppress legend
        theme(plot.title = element_text(size = 0),
              axis.title.x = element_text(size = 0))

```

```r
  ## Combining the figures

 cplot_tot  <- (p1 / (p2 + p3) / p4) +
               plot_layout(ncol = 1, heights = c(1, 1, 1))


  ## Plotting the fig.

 if (pprint == "yes") {
         windows(width = 10, height = 12)
         print(cplot_tot)
 }

  return(cplot_tot)

}

######### Functions for computing the AOV ########################

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Functions for computing the AOV                        #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

######### AOV Y ~ site  ####

print("# AOV Y ~ site                                           #")
print("  ...                                                     ")
Sys.sleep(ltds)

  AOV_site <- function(yvar) {

    Y <- Data_inf[,which(colnames(Data_inf) == yvar)]

    aov_1 <- aov(abs(Y) ~ site, data=Data_inf)
    aov_2 <- summary.aov(aov_1)

    return(list(aov_result = aov_1, aov_sum = aov_2))

  }

  ######### AOV Y ~ device + site + site:device   ####

  print("# AOV Y ~ device + site + site:device                    #")
  print("  ...                                                     ")
  Sys.sleep(ltds)

  AOV_dev_site <- function(yvar) {

    Y <- Data_inf[,which(colnames(Data_inf) == yvar)]

    aov_1 <- aov(abs(Y) ~ device + site + device:site, data=Data_inf)
    aov_2 <- summary.aov(aov_1)

    return(list(aov_result = aov_1, aov_sum = aov_2))

  }


############## Computing the AOV for all variables ###########################

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Computing the AOV for all variables                    #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

## AOV Y ~ Site

print("## AOV Y ~ Site                                          #")
print("  ...                                                     ")
Sys.sleep(ltds)


  site_var <- c("Rho_d", "pclay", "psilt", "psand", "theta_s", "n", "eta")

  aov_site_r <- list()

  for (i in 1:length(site_var))  {

    aov_site_r[[i]] <- AOV_site(site_var[i])[[2]]

  }

  names(aov_site_r) <- site_var

  ## AOV Y ~ Device + Site + Site: Device

print("## AOV ~ Device + Site + Site: Device                     #")
print("   ...                                                    ")
Sys.sleep(ltds)

dev_site_var <- c("IR", "hg_BS", "hg_BI", "hg_BSst", "hg_BWR", "hg_BWR3T", "hg",
                  "Ks_BS", "Ks_BI", "Ks_BSst", "Ks_BWR", "Ks_BWR3T", "Ks")

aov_dev_site_r <- list()

for (i in 1:length(dev_site_var))  {

  aov_dev_site_r[[i]] <- AOV_dev_site(dev_site_var[i])[[2]]

}
```

```
496  names(aov_dev_site_r) <- dev_site_var
497
498
499  ############## Plots of the experimental results and AOV ####################
500
501  print("                                                                    ")
502  print("############################################################")
503  print("# Plots of the experimental results and AOV                #")
504  print("############################################################")
505  print("                                                                    ")
506  Sys.sleep(ltds)
507
508  gg_plot <- list()
509  gg_plot_width   <- vector()
510  gg_plot_height  <- vector()
511
512  ## Soil characteristics at surface
513
514  print("# Soil characteristics at surface                          #")
515  print("   ...                                                      ")
516  Sys.sleep(ltds)
517
518    gg_plot[[1]] <- Fig_AOV_site("Rho_d", "g/cm3", c(0.80,1.40), "no")
519    gg_plot[[2]] <- Fig_AOV_site("pclay", "%", c(3,6), "no")
520    gg_plot[[3]] <- Fig_AOV_site("psilt", "%", c(45,65), "no")
521    gg_plot[[4]] <- Fig_AOV_site("psand", "%", c(30,55), "no")
522
523    if (print_rep == "yes") {
524
525        print(aov_site_r["Rho_d"])       ## Results of AOV
526        print("   ...                                                   ")
527        print(aov_site_r["pclay"])       ## Results of AOV
528        print("   ...                                                   ")
529        print(aov_site_r["psilt"])       ## Results of AOV
530        print("   ...                                                   ")
531        print(aov_site_r["psand"])       ## Results of AOV
532        print("   ...                                                   ")
533
534    }
535
536    names(gg_plot) <- c("Rho_d", "pclay", "psilt", "psand")
537
538    gg_plot_width   <- rep(width_g,4)      ## Dimensions of the fugs to be saved.
539    gg_plot_height  <- rep(height_g,4)
540
541  ## Water infiltration at the surface
542
543  print("# Water infiltration at the surface - IR                  #")
544  print("   ...                                                      ")
545  Sys.sleep(ltds)
546
547    gg_plot[[5]] <- Fig_AOV_dev_site("IR", "mm/h", c(0,1600), "no")
548
549    if (print_rep == "yes") {
550
551        print(aov_dev_site_r["IR"])
552        print("   ...                                                   ")
553
554    }
555
556    names(gg_plot)[5] <- "IR"
557
558    gg_plot_width[5]   <- width_g2
559    gg_plot_height[5]  <- height_g2
560
561  ############## Plots of BEST results and AOV ####################
562
563  print("                                                                    ")
564  print("############################################################")
565  print("# Plots of BEST results and AOV                            #")
566  print("############################################################")
567  print("                                                                    ")
568  Sys.sleep(ltds)
569
570  ## BEST - Soil hydraulic parameters
571     ## Shape parameters & theta_s
572
573  print("# BEST - shape parameter & theta_s                         #")
574  print("   ...                                                      ")
575  Sys.sleep(ltds)
576
577    gg_plot[[6]] <- Fig_AOV_site("theta_s", "-", c(0.45,0.70), "no")
578    gg_plot[[7]] <- Fig_AOV_site("n", "-", c(2.30,2.45), "no")
579    gg_plot[[8]] <- Fig_AOV_site("eta", "-", c(7.5,9.5), "no")
580
581    if (print_rep == "yes") {
582
583        print(aov_site_r["theta_s"])       ## Results of AOV
584        print("   ...                                                   ")
585        print(aov_site_r["n"])             ## Results of AOV
586        print("   ...                                                   ")
587        print(aov_site_r["eta"])           ## Results of AOV
588        print("   ...                                                   ")
589
590    }
591
592    names(gg_plot)[6:8] <- c("theta_s", "n", "eta")
593
594    gg_plot_width[6:8]   <- rep(width_g,3)
595    gg_plot_height[6:8]  <- rep(height_g,3)
596
```

```
## BEST - Soil hydraulic parameters
  ## Scale parameters: BEST Slope

print("# BEST scale parameter: BEST-Slope                        #")
print("   ...                                                    ")
Sys.sleep(ltds)

  gg_plot[[9]]  <- Fig_AOV_dev_site("hg_BS", "mm", c(0,1000), "no")
  gg_plot[[10]] <- Fig_AOV_dev_site("Ks_BS", "mm/h", c(0,0.3), "no")

  if (print_rep == "yes") {

      print(aov_dev_site_r["hg_BS"])     ## Results of AOV
      print("   ...                                                 ")
      print(aov_dev_site_r["Ks_BS"])     ## Results of AOV
      print("   ...                                                 ")

  }

  names(gg_plot)[9:10] <- c("hg_BS", "Ks_BS")

  gg_plot_width[9:10]   <- rep(width_g2,2)
  gg_plot_height[9:10]  <- rep(height_g2,2)

## BEST - Soil hydraulic parameters
  ## Scale parameters: BEST Intercept

print("# BEST scale parameter: BEST-Intercept                    #")
print("   ...                                                    ")
Sys.sleep(ltds)

  gg_plot[[11]] <- Fig_AOV_dev_site("hg_BI", "mm", c(0,500), "no")
  gg_plot[[12]] <- Fig_AOV_dev_site("Ks_BI", "mm/h", c(0,0.3), "no")

  if (print_rep == "yes") {

      print(aov_dev_site_r["hg_BI"])     ## Results of AOV
      print("   ...                                                 ")
      print(aov_dev_site_r["Ks_BI"])     ## Results of AOV
      print("   ...                                                 ")

  }

  names(gg_plot)[11:12] <- c("hg_BI", "Ks_BI")

  gg_plot_width[11:12]   <- rep(width_g2,2)
  gg_plot_height[11:12]  <- rep(height_g2,2)

  ## BEST - Soil hydraulic parameters
  ## Scale parameters: BEST Steady

print("# BEST scale parameter: BEST-Steady                       #")
print("   ...                                                    ")
Sys.sleep(ltds)

  gg_plot[[13]] <- Fig_AOV_dev_site("hg_BSst", "mm", c(0,500), "no")
  gg_plot[[14]] <- Fig_AOV_dev_site("Ks_BSst", "mm/h", c(0,0.30), "no")

  if (print_rep == "yes") {

      print(aov_dev_site_r["hg_BSst"])     ## Results of AOV
      print("   ...                                                 ")
      print(aov_dev_site_r["Ks_BSst"])     ## Results of AOV
      print("   ...                                                 ")

  }

  names(gg_plot)[13:14] <- c("hg_BSst", "Ks_BSst")

  gg_plot_width[13:14]   <- rep(width_g2,2)
  gg_plot_height[13:14]  <- rep(height_g2,2)

  ## BEST - Soil hydraulic parameters
   ## Scale parameters: BEST WR

  print("# BEST scale parameter: BEST-WR                          #")
  print("   ...                                                   ")
  Sys.sleep(ltds)

  gg_plot[[15]] <- Fig_AOV_dev_site("hg_BWR", "mm", c(0,500), "no")
  gg_plot[[16]] <- Fig_AOV_dev_site("Ks_BWR", "mm/h", c(0,0.30), "no")

  if (print_rep == "yes") {

    print(aov_dev_site_r["hg_BWR"])     ## Results of AOV
    print("   ...                                                 ")
    print(aov_dev_site_r["Ks_BWR"])     ## Results of AOV
    print("   ...                                                 ")

  }

  names(gg_plot)[15:16] <- c("hg_BWR", "Ks_BWR")

  gg_plot_width[15:16]   <- rep(width_g2,2)
  gg_plot_height[15:16]  <- rep(height_g2,2)
```

```
  ## BEST - Soil hydraulic parameters
  ## Scale parameters: BEST WR -3T
  print("# BEST scale parameter: BEST-WR3T                          #")
  print("   ...                                                     ")
  Sys.sleep(ltds)

  gg_plot[[17]] <- Fig_AOV_dev_site("hg_BWR3T", "mm", c(0,500), "no")
  gg_plot[[18]] <- Fig_AOV_dev_site("Ks_BWR3T", "mm/h", c(0,0.30), "no")

  if (print_rep == "yes") {

    print(aov_dev_site_r["hg_BWR3T"])     ## Results of AOV
    print("   ...                                                   ")
    print(aov_dev_site_r["Ks_BWR3T"])     ## Results of AOV
    print("   ...                                                   ")

  }

  names(gg_plot)[17:18]  <- c("hg_BWR3T", "Ks_BWR3T")

  gg_plot_width[17:18]   <- rep(width_g2,2)
  gg_plot_height[17:18]  <- rep(height_g2,2)


## BEST - Soil hydraulic parameters
  ## Scale parameters: BEST mean

print("# BEST scale parameter: BEST-Average                       #")
print("   ...                                                     ")
Sys.sleep(ltds)

  gg_plot[[19]] <- Fig_AOV_dev_site("hg", "mm", c(0,350), "no")
  gg_plot[[20]] <- Fig_AOV_dev_site("Ks", "mm/h", c(0,0.20), "no")

  if (print_rep == "yes") {

      print(aov_dev_site_r["hg"])     ## Results of AOV
      print("   ...                                                  ")
      print(aov_dev_site_r["Ks"])     ## Results of AOV
      print("   ...                                                  ")

  }

  names(gg_plot)[19:20] <- c("hg", "Ks")

  gg_plot_width[19:20]   <- rep(width_g2,2)
  gg_plot_height[19:20]  <- rep(height_g2,2)


######### Savings          ################################

## Saving the database

if (renew_results == "yes")  {

    print("                                                          ")
    print("##########################################################")
    print("# Saving the data including the data base, AOV et graphs  #")
    print("##########################################################")
    print("                                                          ")
    Sys.sleep(ltds)

    Rdata_file_AOV  <- "AOV-data_tot.RData"
    Rdata_file_BEST <- "BEST-data_tot.RData"

    ## Saving the file 1

    setwd(T_results)

    save(file = Rdata_file_AOV,
         Data_inf, aov_site_r, aov_dev_site_r, gg_plot)

    print(Rdata_file_AOV)

    setwd(T_wd)

    ## Saving the file 2 in T_results 2 & 3

    setwd(T_results_2)

    save(file = Rdata_file_BEST, Data_inf)

    setwd(T_results_3)

    save(file = Rdata_file_BEST, Data_inf)

    setwd(T_wd)

    print(Rdata_file_BEST)

}

  ## Saving the figures

  if (renew_figs == "yes")  {
```

```
    print("                                                          ")
    print("##########################################################")
    print("# Saving the figures                                     #")
    print("##########################################################")
    print("                                                          ")
    Sys.sleep(ltds)

    setwd(T_figs)

    for (i in 1:length(gg_plot)) {

      file_name <- paste(as.character(i), names(gg_plot)[i], "AOV.png", sep = "_")

      ggsave(file_name, plot = gg_plot[[i]],
             width = gg_plot_width[i], height = gg_plot_height[i], units = "in")

      print(file_name)

    }

    setwd(T_wd)

  }

  ######### Savings the numerical results of anova   ###################################

  ## Saving the database

  if (renew_results == "yes")  {

    print("                                                          ")
    print("##########################################################")
    print("# Saving ANOVA results                                   #")
    print("##########################################################")
    print("                                                          ")
    Sys.sleep(ltds)

    setwd(T_results)

    ## saving means and stds per groups

    zz1_name <- "zz1_mean_sd.xlsx"

    wb <- createWorkbook()

    addWorksheet(wb, "per_site_dev")
    addWorksheet(wb, "per_site")
    addWorksheet(wb, "per_device")

    writeData(wb, "per_site_dev", Data_inf_site_dev, rowNames = TRUE)
    writeData(wb, "per_site", Data_inf_site, rowNames = TRUE)
    writeData(wb, "per_device", Data_inf_device, rowNames = TRUE)

    saveWorkbook(wb, zz1_name, overwrite = TRUE)
    print(zz1_name)

    zz2_name <- "zz2_AOV_site.xlsx"

    wb2 <- createWorkbook()

    for (i in 1:length(aov_site_r)) {
          addWorksheet(wb2, names(aov_site_r)[i])
          writeData(wb2, names(aov_site_r)[i], as.data.frame(aov_site_r[[i]][[1]]),
                    rowNames = TRUE)
    }

    saveWorkbook(wb2, zz2_name, overwrite = TRUE)
    print(zz2_name)

    zz3_name <- "zz3_AOV_dev_site.xlsx"

    wb3 <- createWorkbook()

    for (i in 1:length(aov_dev_site_r)) {
          addWorksheet(wb3, names(aov_dev_site_r)[i])
          writeData(wb3, names(aov_dev_site_r)[i], as.data.frame(aov_dev_site_r[[i]][[1]]),
                    rowNames = TRUE)
    }

    saveWorkbook(wb3, zz3_name, overwrite = TRUE)
    print(zz3_name)

    setwd(T_wd)

  }

############## END ########################################

# stop("interruption of the program", call. = FALSE)

print("")
print("# That's all folks")
Sys.sleep(ltds)
print(" !! Don't forget to move your files to a safe place!!")
print(" !! All files will be overwritten at next round!!")
```

VII.1.7 Script_R_5_comp_BEST_V2.R

```r
########## Initialization ####################################################

rm(list =ls())      # efface les data

## kills all the graphic windows
while (dev.cur() != 1) {dev.off()}

ltds <- 0.25           # reading time, i.e., time for sys.sleep

renew_results <- "yes"        ## to renew figs stored in folder T_figs
renew_figs    <- "yes"        ## to renew results stored in folder T_results
print_rst     <- "no"         ## to print results on the console

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Initialization - directory creation & loading variables #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

######### libraries ##########################################################

  library(fs)                                  ## functions for file management
  library(splines)
  library(car)
  library(sandwich)
  library(RcmdrMisc)
  library(latex2exp)
  library(stringr)
  library(ggplot2)
  library(ggbreak)
  library(patchwork)
  library(openxlsx)


# library(here)

######## setting data and saving directory ###################################


## Main directory #####

  T_wd <- getwd()

## Other directories and source files

  T_source    <- paste(T_wd,'/0_Functions',sep="")
  T_data      <- paste(T_wd,"/1_Data/5_Comp_BEST",sep="")
  T_figs      <- paste(T_wd,"/2_Figs/5_Comp_BEST",sep="")
  T_results   <- paste(T_wd,"/3_Results/5_Comp_BEST",sep="")
  # T_results_2 <- paste(T_wd,"/1_Data/5_Comp_BEST",sep="")

  file_source <- paste(T_source,'/0_tool_func.r',sep="")
  source(file_source)

  ifelse(!dir.exists(T_data), dir.create(T_data), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_figs), dir.create(T_figs), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results), dir.create(T_results), "Folder exists already")
  # ifelse(!dir.exists(T_results_2), dir.create(T_results_2), "Folder exists already")

## kills all the files in the result folders - to comment to discard

  if (renew_results == "yes")  {
    unlink(paste(T_results,"/*",sep=""))
  }

  if (renew_figs == "yes")  {
    unlink(paste(T_figs,"/*",sep=""))
  }

######### upload data #################

  ## Data from BEST inversions

  setwd(T_data)

  load("BEST-data_tot.RData")

  setwd(T_wd)

  nrow_data <- dim(Data_inf)[1]

  Best_methods <- c("BS","BI","BSst","BWR","BWR3T")
  nbest_m      <- length(Best_methods)

  row_names_AOV <- vector()

  for (i in 1:length(Best_methods)) {
    row_names_AOV <- c(row_names_AOV,paste(row.names(Data_inf),Best_methods[i],sep="."))
  }

  nrow_data_AOV <- nrow_data* nbest_m

  Data_AOV <- data.frame(row.names = row_names_AOV,
                         site = character(nrow_data_AOV),
                         device = character(nrow_data_AOV),
                         B_method = character(nrow_data_AOV),
                         hg = numeric(nrow_data_AOV),
                         Ks = numeric(nrow_data_AOV))

  Data_AOV$site <- rep(Data_inf$site,5)
  Data_AOV$device <- rep(Data_inf$device,5)

  aa <- vector()
```

```r
for (i in 1:nbest_m) {
  aa <- c(aa,rep(Best_methods[i],nrow_data))
}

Data_AOV$B_method <- factor(aa, levels = Best_methods)

Data_AOV$hg <- c(Data_inf$hg_BS, Data_inf$hg_BI, Data_inf$hg_BSst,
                 Data_inf$hg_BWR, Data_inf$hg_BWR3T)

Data_AOV$Ks <- c(Data_inf$Ks_BS, Data_inf$Ks_BI, Data_inf$Ks_BSst,
                 Data_inf$Ks_BWR, Data_inf$Ks_BWR3T)

######### Functions for computing the AOV ##########################

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Functions for computing the AOV                        #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

######### AOV Y ~ Best method  ####

print("# AOV Y ~ Best Method                                     #")
print("  ...                                                     ")
Sys.sleep(ltds)

AOV_BestM <- function(yvar,Dbf) {

  Y <- Dbf[,which(colnames(Dbf) == yvar)]

  aov_1 <- aov(Y ~ B_method, data = Dbf)
  aov_2 <- summary.aov(aov_1)

  return(list(aov_result = aov_1, aov_sum = aov_2))

}

######### AOV Y ~ Best method + site + Best method:site   ####

print("# AOV Y ~ Best method + site + Best method:site           #")
print("  ...                                                     ")
Sys.sleep(ltds)

AOV_BestM_site <- function(yvar,Dbf) {

  Y <- Dbf[,which(colnames(Dbf) == yvar)]

  aov_1 <- aov(Y ~ B_method + site + B_method:site, data = Dbf)
  aov_2 <- summary.aov(aov_1)

  return(list(aov_result = aov_1, aov_sum = aov_2))

}

############ Plots of the data  ###################################################

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Functions for plotting results                         #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

## Figures de Y ~ Best method

## Graphical options

colg_aov <- c(rep("#0000FF",4),rep("#006633",2),rep("#FF8040",2),rep("#FF0033",2))
colg2_aov <- unique(colg_aov)
colg3_aov <- rainbow(nbest_m)

# dimensions for png files

width_g_aov   <- 5 ## height of the first plot
width_g2_aov  <- 10 ## height of the second plot
height_g_aov  <- 6
height_g2_aov <- 6

# Police size and format

cex.lab_g_aov   <- 1.5
cex.axis_g_aov  <- 1.25
cex.leg_aov     <- 1.5
font.lab_g_aov  <- 2  ## 2 for bold

## Text for the legend

leg.txt_aov <- c("Site 1", "Site 2", "Site 3","Site 4")


############ Function for Analysis of variables ###############

## Function for AOV versus site

Fig_AOV_Best <- function(yvar, Dbf, unit, c_lim, pprint) {

  ykk <- which(colnames(Dbf) == yvar)
  Y <- Dbf[,ykk]

  ## Scales for axes

  if (length(unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) == 1) {
    if (unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) {
      c_lim <- c(min(Y), max(Y))
    }
```

```r
  }

  ## Y ~ Best

  p1 <- ggplot(Dbf, aes(x = B_method, y = Y, fill = B_method)) +
    geom_boxplot() +
    coord_cartesian(ylim = c_lim)  +
    labs(title = paste(yvar," ~ Best method", sep=""),
         x = "Best method",
         y = paste(yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg3_aov, labels = Best_methods) +
    guides(fill = "none") +
    geom_abline(slope = 0, intercept = 0, linetype = "dashed") +
    theme(plot.title = element_text(size = 12, hjust = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 0))


  ## Plotting the fig.

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = width_g_aov, height = height_g_aov)
    print(p1)
  }

  return(p1)

}

Fig_AOV_Best_hg <- function(yvar, Dbf, unit, pprint) {

  ykk <- which(colnames(Dbf) == yvar)
  Y <- -Dbf[,ykk]

  ## Y ~ Best

  p1 <- ggplot(Dbf, aes(x = B_method, y = Y, fill = B_method)) +
    geom_boxplot() +
    # ylim(c_lim) +
    scale_y_break(c(1000, 2000)) +
    scale_y_continuous(limits = c(-500, 2200)) +
    # scale_y_continuous(breaks = c(-2400, -2200, -2000, -1000, -800, -600, -400, -200,
    #                               0, 200, 400)) +
    labs(title = paste(yvar," ~ Best method", sep=""),
         x = "Best method",
         y = paste("-",yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg3_aov, labels = Best_methods) +
    guides(fill = "none") +
    geom_abline(slope = 0, intercept = 0, linetype = "dashed") +
    theme(plot.title = element_text(size = 12, hjust = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 0))


  ## Plotting the fig.

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = width_g_aov, height = height_g_aov)
    print(p1)
  }

  return(p1)

}

## Function for AOV versus Best method + site

Fig_AOV_Best_site_hg <- function(yvar, Dbf, unit, c_lim, pprint) {

  ykk <- which(colnames(Dbf) == yvar)
  Y <- -Dbf[,ykk]

  ## Scales for axes

  if (length(unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) == 1) {
    if (unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) {
      c_lim <- c(min(Y), max(Y))
    }
  }

  ## Y ~ Best method

  p2 <- ggplot(Dbf, aes(x = B_method, y = Y, fill = B_method)) +
    geom_boxplot() +
    # ylim(c_lim) +
    scale_y_break(c(1000, 2000)) +
    scale_y_continuous(limits = c(-500, 2200)) +
    # scale_y_continuous(breaks = c(-2400, -2200, -2000, -1000, -800, -600, -400, -200,
    #                               0, 200, 400)) +
    labs(title = paste("-",yvar," ~ Best method + Site + Best:Site", sep=""),
         x = "Best method",
         y = paste("-",yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg3_aov) +
    guides(fill = "none")  +
    theme(plot.title = element_text(size = 12, hjust = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Y ~ site

  p3 <- ggplot(Dbf, aes(x = site, y = Y, fill = site)) +
    geom_boxplot() +
    # ylim(c_lim) +
    scale_y_break(c(1000, 2000)) +
    scale_y_continuous(limits = c(-500, 2200)) +
    # scale_y_continuous(breaks = c(-2400, -2200, -2000, -1000, -800, -600, -400, -200,
    #                               0, 200, 400)) +
    labs(title = " ",
```

```
          x = "Site", y = "") +
    scale_fill_manual(values = colg2_aov) +
    guides(fill = "none") +                    # to suppress legend
    theme(plot.title = element_text(size = 12),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Figure de Y ~ B method | Site

  p4 <- ggplot(Dbf, aes(x = B_method, y = Y, fill = B_method)) +
    geom_boxplot() +
    coord_cartesian(ylim = c_lim)  +
    labs(title = paste("-",yvar," ~ Method | ",sep=""),
         x = "Site", y = paste("-",yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg3_aov) +
    facet_grid(. ~ site, scales = "fixed") +
    guides(fill = "none") +                    # to suppress legend
    theme(plot.title = element_text(size = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Combining the figures

  cplot_tot  <- ((p2 + p3) / p4) +
    plot_layout(ncol = 1, heights = c(2, 1))


  ## Plotting the fig.

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = 14, height = 8)
    print(cplot_tot)
  }

  return(cplot_tot)

}

## same with control on scales

## Function for AOV versus Best method + site

Fig_AOV_Best_site_hg_Sc <- function(yvar, Dbf, unit, c_lim, pprint) {

  ykk <- which(colnames(Dbf) == yvar)
  Y <- -Dbf[,ykk]

  ## Scales for axes

  if (length(unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) == 1) {
    if (unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) {
      c_lim <- c(min(Y), max(Y))
    }
  }

  ## Y ~ Best method

  p2 <- ggplot(Dbf, aes(x = B_method, y = Y, fill = B_method)) +
    geom_boxplot() +
    coord_cartesian(ylim = c_lim)  +
    labs(title = paste("-",yvar," ~ Best method + Site + Best:Site", sep=""),
         x = "Best method",
         y = paste("-",yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg3_aov) +
    guides(fill = "none")  +
    theme(plot.title = element_text(size = 12, hjust = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Y ~ site

  p3 <- ggplot(Dbf, aes(x = site, y = Y, fill = site)) +
    geom_boxplot() +
    coord_cartesian(ylim = c_lim)  +
    labs(title = " ",
         x = "Site", y = "") +
    scale_fill_manual(values = colg2_aov) +
    guides(fill = "none") +                    # to suppress legend
    theme(plot.title = element_text(size = 12),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Figure de Y ~ B method | Site

  p4 <- ggplot(Dbf, aes(x = B_method, y = Y, fill = B_method)) +
    geom_boxplot() +
    coord_cartesian(ylim = c_lim)  +
    labs(title = paste("-",yvar," ~ Method | ",sep=""),
         x = "Site", y = paste("-",yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg3_aov) +
    facet_grid(. ~ site, scales = "fixed") +
    guides(fill = "none") +                    # to suppress legend
    theme(plot.title = element_text(size = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Combining the figures

  cplot_tot  <- ((p2 + p3) / p4) +
    plot_layout(ncol = 1, heights = c(2, 1))


  ## Plotting the fig.

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = 14, height = 8)
    print(cplot_tot)
  }

```

```r
  return(cplot_tot)

}

##

Fig_AOV_Best_site <- function(yvar, Dbf, unit, c_lim, pprint) {

  ykk <- which(colnames(Dbf) == yvar)
  Y <- Dbf[,ykk]

  ## Scales for axes

  if (length(unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) == 1) {
    if (unique(c_lim == c(0,0)) == TRUE) {
      c_lim <- c(min(Y), max(Y))
    }
  }

  ## Y ~ Best method

  p2 <- ggplot(Dbf, aes(x = B_method, y = Y, fill = B_method)) +
    geom_boxplot() +
    coord_cartesian(ylim = c_lim)  +
    labs(title = paste(yvar," ~ Best method + Site + Best:Site", sep=""),
         x = "Best method",
         y = paste(yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg3_aov) +
    guides(fill = "none")  +
    theme(plot.title = element_text(size = 12, hjust = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Y ~ site

  p3 <- ggplot(Dbf, aes(x = site, y = Y, fill = site)) +
    geom_boxplot() +
    coord_cartesian(ylim = c_lim)  +
    labs(title = paste(yvar," ~ Site", sep=""),
         x = "Site", y = "") +
    scale_fill_manual(values = colg2_aov) +
    guides(fill = "none") +                    # to suppress legend
    theme(plot.title = element_text(size = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Figure de Y ~ B method | Site

  p4 <- ggplot(Dbf, aes(x = B_method, y = Y, fill = B_method)) +
    geom_boxplot() +
    coord_cartesian(ylim = c_lim)  +
    labs(title = paste(yvar," ~ Method | ",sep=""),
         x = "Site", y = paste(yvar," (",unit,")",sep="")) +
    scale_fill_manual(values = colg3_aov) +
    facet_grid(. ~ site, scales = "fixed") +
    guides(fill = "none") +                    # to suppress legend
    theme(plot.title = element_text(size = 0),
          axis.title.x = element_text(size = 12))

  ## Combining the figures

  cplot_tot  <- ((p2 + p3) / p4) +
    plot_layout(ncol = 1, heights = c(2, 1))


  ## Plotting the fig.

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = 14, height = 8)
    print(cplot_tot)
  }

  return(cplot_tot)

}

 ############ Computing Linear regression between estimates  ##################

print("                                                      ")
print("######################################################")
print("# Computing Linear regression between estimates      #")
print("######################################################")
print("                                                      ")
Sys.sleep(ltds)

 ## Linear regression model fo parameter hg

LRM.hg <- list()

LRM.hg[[1]] <- lm(hg_BS ~ hg, data=Data_inf)
LRM.hg[[2]] <- lm(hg_BI~ hg, data=Data_inf)
LRM.hg[[3]] <- lm(hg_BSst~ hg, data=Data_inf)
LRM.hg[[4]] <- lm(hg_BWR~ hg, data=Data_inf)
LRM.hg[[5]] <- lm(hg_BWR3T~ hg, data=Data_inf)

names(LRM.hg) <- paste0("hg.",c("BS","BI","BSst","BWR","BWR3T"))

LRM.hg.sum <- list() ## summary
```

```r
for (i in 1:length(LRM.hg)) {
  LRM.hg.sum[[i]] <- summary(LRM.hg[[i]])
}

names(LRM.hg.sum) <- names(LRM.hg)

## Linear regression model fo parameter Ks

LRM.Ks <- list()

LRM.Ks[[1]] <- lm(Ks_BS~Ks, data=Data_inf)
LRM.Ks[[2]] <- lm(Ks_BI~Ks, data=Data_inf)
LRM.Ks[[3]] <- lm(Ks_BSst~Ks, data=Data_inf)
LRM.Ks[[4]] <- lm(Ks_BWR~Ks, data=Data_inf)
LRM.Ks[[5]] <- lm(Ks_BWR3T~Ks, data=Data_inf)

names(LRM.Ks) <- paste0("Ks.",c("BS","BI","BSst","BWR","BWR3T"))

LRM.Ks.sum <- list() ## summary

for (i in 1:length(LRM.Ks)) {
  LRM.Ks.sum[[i]] <- summary(LRM.Ks[[i]])
}

names(LRM.Ks.sum) <- names(LRM.Ks)

if (print_rst == "yes") {
  print(LRM.hg.sum)
  print(LRM.Ks.sum)
}

############## Computing the AOV for all variables ############################

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Computing the AOV for all variables                    #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

## AOV Y ~ Best method

print("## AOV Y ~ Best method                                   #")
print("  ...                                                     ")
Sys.sleep(ltds)


BestM_var <- c("hg", "Ks")

aov_BestM_r <- list()

for (i in 1:length(BestM_var))  {

  aov_BestM_r[[i]] <- AOV_BestM(BestM_var[i],Data_AOV)[[2]]

}

names(aov_BestM_r) <- paste0("AOV1_", BestM_var)

## AOV Y ~ Best method + Site + Best method : Site

print("##AOV Y ~ Best method + Site + Best method : Site         #")
print("   ...                                                     ")
Sys.sleep(ltds)

BestM_site_var <- c("hg", "Ks")

aov_BestM_site_r <- list()

for (i in 1:length(aov_BestM_r))  {

  aov_BestM_site_r[[i]] <- AOV_BestM_site(BestM_site_var[i],Data_AOV)[[2]]

}

names(aov_BestM_site_r) <- paste0("AOV2_", BestM_site_var)

############ Plots of the data  ###############################################

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Functions for plotting results                         #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

## list of figures

gg_plot <- list()
gg_plot_width   <- vector()
gg_plot_height  <- vector()

# dimensions for png files

width_g   <- 8 ## height of the first plot
width_g2  <- 5 ## height of the second plot
height_g  <- 5
height_g2 <- 8

ifig <- 1

## Figure limits

c_lim_Ks = c(0,0.2)
c_lim_hg =  c(0,450)
```

```r
c_lim_Ks_list <- list()
c_lim_hg_list <- list()

for (i in 1:nbest_m) {
  yvar  <- paste("hg",Best_methods[i],sep="_")
  yvar2 <- paste("Ks",Best_methods[i],sep="_")

  c_lim_hg_list[[i]] <- -c(max(Data_inf[,yvar],Data_inf[,"hg"]),
                           min(Data_inf[,yvar],Data_inf[,"hg"]))

  c_lim_Ks_list[[i]] <- c(min(Data_inf[,yvar2],Data_inf[,"Ks"]),
                          max(Data_inf[,yvar2],Data_inf[,"Ks"]))
}

names(c_lim_hg_list) <- paste0("c_lim_hg_",Best_methods)
names(c_lim_Ks_list) <- paste0("c_lim_Ks_",Best_methods)

######### Plot of hg - regression lines ###################################

# Base plot style function

base_plot_hg <- function(yvar, ylab_text, c_lim_hg) {

  ggplot(Data_inf, aes(x = -hg, y = -.data[[yvar]])) +
    geom_point(color = "red", shape = 3) +
    geom_abline(slope = 1, intercept = 0, linetype = "dotdash")  + # 1:1 reference line
    geom_abline(slope = 0, intercept = 0, linetype = "dashed") +   # y = 0 line
    geom_vline(xintercept = 0, linetype = "dashed") +              # x = 0 line
    geom_smooth(method = "lm", formula = y ~ x, se = FALSE, color = "black") +      # regression line
    coord_cartesian(xlim = c_lim_hg, ylim = c_lim_hg) +
    labs(x = "-hg (mm)", y = ylab_text) +
    theme_minimal()

}

# Create the five plots

p1 <- base_plot_hg("hg_BS",    "-hg_BS (mm)",    c_lim_hg_list[[1]])
p2 <- base_plot_hg("hg_BI",    "-hg_BI (mm)",    c_lim_hg_list[[2]])
p3 <- base_plot_hg("hg_BSst",  "-hg_BSst (mm)",  c_lim_hg_list[[3]])
p4 <- base_plot_hg("hg_BWR",   "-hg_BWR (mm)",   c_lim_hg_list[[4]])
p5 <- base_plot_hg("hg_BWR3T", "-hg_BWR3T (mm)", c_lim_hg_list[[5]])


##  Violin + boxplot for -hg distribution (on y-axis)

p6 <- ggplot(Data_inf, aes(x = "", y = -hg)) +
  geom_violin(fill = "red", color = "black", alpha = 0.7, trim = FALSE) +
  geom_boxplot(width = 0.1, fill = "white", outlier.shape = NA) +
  labs(x = NULL, y = "-hg (mm)", title = "Distribution of -hg") +
  theme_minimal() +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5),
    axis.text.x = element_blank(),
    axis.ticks.x = element_blank()
  )

# Combine into a 2x3 layout with empty space in the 6th cell

gg_plot[[ifig]] <- ((p1 | p2 | p3) / (p4 | p5 | p6))

# print(gg_plot[[ifig]])

names(gg_plot)[ifig] <- "hg"

gg_plot_width[ifig]  <- width_g
gg_plot_height[ifig]  <- height_g

ifig <- ifig+1

########## Plot of Ks - regression lines ##########################################"

# Base plot style function

base_plot_Ks <- function(yvar, ylab_text, c_lim_Ks) {

  ggplot(Data_inf, aes(x = Ks, y = .data[[yvar]])) +
    geom_point(color = "red", shape = 4) +
    geom_abline(slope = 1, intercept = 0, linetype = "dotdash") +  # 1:1 reference line
    geom_abline(slope = 0, intercept = 0, linetype = "dashed") +   # y = 0 line
    geom_vline(xintercept = 0, linetype = "dashed") +              # x = 0 line
    geom_smooth(method = "lm", formula = y ~ x, se = FALSE, color = "black") +      # regression line
    coord_cartesian(xlim = c_lim_Ks, ylim = c_lim_Ks) +
    labs(x = "Ks (mm/h)", y = ylab_text) +
    theme_minimal()

}

# Create the five plots

p1 <- base_plot_Ks("Ks_BS",     "Ks_BS (mm/h)",    c_lim_Ks_list[[1]])
p2 <- base_plot_Ks("Ks_BI",     "Ks_BI (mm/h)",    c_lim_Ks_list[[2]])
p3 <- base_plot_Ks("Ks_BSst",   "Ks_BSst (mm/h)",  c_lim_Ks_list[[3]])
p4 <- base_plot_Ks("Ks_BWR",    "Ks_BWR (mm/h)",   c_lim_Ks_list[[4]])
p5 <- base_plot_Ks("Ks_BWR3T",  "Ks_BWR3T (mm/h)", c_lim_Ks_list[[5]])


##  Violin + boxplot for Ks distribution (on y-axis)

p6 <- ggplot(Data_inf, aes(x = "", y = Ks)) +
  geom_violin(fill = "red", color = "black", alpha = 0.7, trim = FALSE) +
  geom_boxplot(width = 0.1, fill = "white", outlier.shape = NA) +
  labs(x = NULL, y = "Ks (mm/h)", title = "Distribution of Ks") +
  theme_minimal() +
  theme(
    plot.title = element_text(hjust = 0.5),
```

```
    axis.text.x = element_blank(),
    axis.ticks.x = element_blank()
  )

# Combine into a 2x3 layout with empty space in the 6th cell

gg_plot[[ifig]] <- ((p1 | p2 | p3) / (p4 | p5 | p6))

# print(gg_plot[[ifig]])

names(gg_plot)[ifig] <- "Ks"

gg_plot_width[ifig]   <- width_g
gg_plot_height[ifig]  <- height_g

ifig <- ifig+1

########## Plot of hg - ANOVA ###################################

gg_plot[[ifig]] <- Fig_AOV_Best_hg("hg", Data_AOV, "mm", "no")
gg_plot_width[ifig]   <- width_g_aov
gg_plot_height[ifig]  <- height_g_aov
names(gg_plot)[ifig] <- "hg_aov"
ifig <- ifig+1

gg_plot[[ifig]] <- Fig_AOV_Best("Ks", Data_AOV, "mm/h", c(0,0), "no")
gg_plot_width[ifig]   <- width_g_aov
gg_plot_height[ifig]  <- height_g_aov
names(gg_plot)[ifig] <- "Ks_aov"
ifig <- ifig+1

gg_plot[[ifig]] <- Fig_AOV_Best_site_hg_Sc("hg", Data_AOV, "mm", c(0,350), "no")
gg_plot_width[ifig]   <- width_g2_aov
gg_plot_height[ifig]  <- height_g2_aov
names(gg_plot)[ifig] <- "hg_aov_2w"
ifig <- ifig+1

gg_plot[[ifig]] <- Fig_AOV_Best_site("Ks", Data_AOV, "mm/h", c(0,0.2), "no")
gg_plot_width[ifig]   <- width_g2_aov
gg_plot_height[ifig]  <- height_g2_aov
names(gg_plot)[ifig] <- "Ks_aov_2w"
ifig <- ifig+1


########## Savings          ################################

## Saving the figures

if (renew_figs == "yes")  {

  print("                                                    ")
  print("############################################################")
  print("# Saving the figures                                       #")
  print("############################################################")
  print("                                                           ")
  Sys.sleep(ltds)

  setwd(T_figs)

  for (i in 1:length(gg_plot)) {

    file_name <- paste(as.character(i), names(gg_plot)[i], "fig.png", sep = "_")

    ggsave(file_name, plot = gg_plot[[i]],
           width = gg_plot_width[i], height = gg_plot_height[i], units = "in")

    print(file_name)

  }

  setwd(T_wd)

}

  ########## Savings the numerical results of anova   ################################

  ## Saving the database

  if (renew_results == "yes")  {

    print("                                                    ")
    print("############################################################")
    print("# Saving ANOVA results                                     #")
    print("############################################################")
    print("                                                           ")
    Sys.sleep(ltds)

    setwd(T_results)

    ## saving regressions lines for hg and Ks

    zz1_name <- "zz1_Reg.xlsx"

    wb1 <- createWorkbook()

    for (i in 1:length(LRM.hg.sum)) {
          addWorksheet(wb1, names(LRM.hg.sum)[i])
          writeData(wb1, names(LRM.hg.sum)[i],  as.data.frame(LRM.hg.sum[[i]]$coefficients),
                    rowNames = TRUE)
    }

    for (i in 1:length(LRM.Ks.sum)) {
      addWorksheet(wb1, names(LRM.Ks.sum)[i])
      writeData(wb1, names(LRM.Ks.sum)[i],  as.data.frame(LRM.Ks.sum[[i]]$coefficients),
                rowNames = TRUE)
```

```
    }

    saveWorkbook(wb1, zz1_name, overwrite = TRUE)
    print(zz1_name)

    ## saving AOVs

    zz2_name <- "zz2_AOV.xlsx"

    wb2 <- createWorkbook()

    for (i in 1:length(aov_BestM_r)) {
      addWorksheet(wb2, names(aov_BestM_r)[i])
      writeData(wb2, names(aov_BestM_r)[i], as.data.frame(aov_BestM_r[[i]][[1]]),
                rowNames = TRUE)
    }

    for (i in 1:length(aov_BestM_site_r)) {
      addWorksheet(wb2, names(aov_BestM_site_r)[i])
      writeData(wb2, names(aov_BestM_site_r)[i], as.data.frame(aov_BestM_site_r[[i]][[1]]),
                rowNames = TRUE)
    }

    saveWorkbook(wb2, zz2_name, overwrite = TRUE)
    print(zz2_name)

    setwd(T_wd)

  }

############## END ########################################

# stop("interruption of the program", call. = FALSE)

print("")
print("# That's all folks")
Sys.sleep(ltds)
print(" !! Don't forget to move your files to a safe place!!")
print(" !! All files will be overwritten at next round!!")
```

VII.1.8 Script_R_6_dist_BEST_V2.R

```
########## Initialization ####################################################

rm(list =ls())      # efface les data

## kills all the graphic windows
while (dev.cur() != 1) {dev.off()}

ltds <- 0.25           # reading time, i.e., time for sys.sleep

renew_results <- "yes"        ## to renew figs stored in folder T_figs
renew_figs    <- "yes"        ## to renew results stored in folder T_results
print_rst     <- "yes"         ## to print results on the console

print("                                                          ")
print("##########################################################")
print("# Initialization - directory creation & loading variables #")
print("##########################################################")
print("                                                          ")
Sys.sleep(ltds)

######### libraries ##########################################################

  library(fs)                                  ## functions for file management
  library(splines)
  library(car)
  library(sandwich)
  library(RcmdrMisc)
  library(latex2exp)
  library(stringr)
  library(ggplot2)
  library(ggbreak)
  library(patchwork)
  library(openxlsx)


# library(here)

######## setting data and saving directory ###################################


## Main directory #####

  T_wd <- getwd()

## Other directories and source files

  T_source    <- paste(T_wd,'/0_Functions',sep="")
  T_data      <- paste(T_wd,"/1_Data/6_Dist_BEST",sep="")
  T_figs      <- paste(T_wd,"/2_Figs/6_Dist_BEST",sep="")
  T_results   <- paste(T_wd,"/3_Results/6_Dist_BEST",sep="")
  # T_results_2 <- paste(T_wd,"/1_Data/6_Dist_BEST",sep="")

  file_source <- paste(T_source,'/0_tool_func.r',sep="")
  source(file_source)

  ifelse(!dir.exists(T_data), dir.create(T_data), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_figs), dir.create(T_figs), "Folder exists already")
  ifelse(!dir.exists(T_results), dir.create(T_results), "Folder exists already")
  # ifelse(!dir.exists(T_results_2), dir.create(T_results_2), "Folder exists already")

## kills all the files in the result folders - to comment to discard

  if (renew_results == "yes")  {
    unlink(paste(T_results,"/*",sep=""))
  }

  if (renew_figs == "yes")  {
    unlink(paste(T_figs,"/*",sep=""))
  }

######## upload data #################

  ## Data from BEST inversions

  setwd(T_data)

  load("BEST-data_tot.RData")

  setwd(T_wd)

  nrow_data <- dim(Data_inf)[1]

  Best_methods <- c("BS","BI","BSst","BWR","BWR3T")
  nbest_m      <- length(Best_methods)

  ############ Plots of the data  ############################################

  print("                                                          ")
  print("##########################################################")
  print("# QQ plots                                               #")
  print("##########################################################")
  print("                                                          ")
  Sys.sleep(ltds)

  ## list of figures

  gg_plot <- list()
  gg_plot_width   <- vector()
  gg_plot_height  <- vector()

```

```r
# dimensions for png files

width_g   <- 8 ## height of the first plot
width_g2  <- 5 ## height of the second plot
height_g  <- 5
height_g2 <- 8

ifig <- 1

## Figure limits

c_lim_Ks = c(0,0.2)
c_lim_hg =  c(0,450)

c_lim_Ks_list <- list()
c_lim_hg_list <- list()

for (i in 1:nbest_m) {
  yvar  <- paste("hg",Best_methods[i],sep="_")
  yvar2 <- paste("Ks",Best_methods[i],sep="_")
  c_lim_hg_list[[i]] <- -c(max(Data_inf[,yvar]),min(Data_inf[,yvar]))
  c_lim_Ks_list[[i]] <- c(min(Data_inf[,yvar2]),max(Data_inf[,yvar2]))
}

names(c_lim_hg_list) <- paste0("c_lim_hg_",Best_methods)
names(c_lim_Ks_list) <- paste0("c_lim_Ks_",Best_methods)

########## Plot of distributions ###################################

# Base plot functions

bplot_qq <- function(yvar, Dbf) {

  ggplot(Dbf, aes(sample = .data[[yvar]])) +
#     geom_point(color = "red", shape = 3) +
    stat_qq() +
    stat_qq_line() +
    # labs(x = paste0(yvar,"_theor"), y = paste0(yvar)) +
    labs(x = "theor", y = yvar) +
    theme_minimal()
}

bplot_qq_hg <- function(yvar, Dbf) {

  ggplot(Dbf, aes(sample = -.data[[yvar]])) +
    stat_qq() +
    stat_qq_line() +
    # labs(x = paste0("-",yvar,"_theor"), y = paste0("-",yvar)) +
    labs(x = paste0("theor"), y = paste0("-",yvar)) +
    theme_minimal()
}

Fig_QQ <- function(yvar, Dbf, pprint) {

  p1 <- bplot_qq(yvar[1], Dbf)
  p2 <- bplot_qq(yvar[2], Dbf)
  p3 <- bplot_qq(yvar[3], Dbf)
  p4 <- bplot_qq(yvar[4], Dbf)
  p5 <- bplot_qq(yvar[5], Dbf)
  p6 <- bplot_qq(yvar[6], Dbf)

  ## Combining the figures

  cplot_tot  <- ((p1 + p2 + p3) / (p4 + p5 + p6)) +
    plot_layout(ncol = 1, heights = c(1, 1))

  ## Plotting the fig.?

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = 14, height = 8)
    print(cplot_tot)
  }

  return(cplot_tot)

}

Fig_QQ_hg <- function(yvar, Dbf, pprint) {

  p1 <- bplot_qq_hg(yvar[1], Dbf)
  p2 <- bplot_qq_hg(yvar[2], Dbf)
  p3 <- bplot_qq_hg(yvar[3], Dbf)
  p4 <- bplot_qq_hg(yvar[4], Dbf)
  p5 <- bplot_qq_hg(yvar[5], Dbf)
  p6 <- bplot_qq_hg(yvar[6], Dbf)

  ## Combining the figures

  cplot_tot  <- ((p1 + p2 + p3) / (p4 + p5 + p6)) +
    plot_layout(ncol = 1, heights = c(1, 1))

  ## Plotting the fig.?

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = 14, height = 8)
    print(cplot_tot)
  }

  return(cplot_tot)

}

```

```r
########## Plot of distributions - log ###################################

# Base plot functions

bplot_qqlog <- function(yvar, Dbf) {

  ggplot(Dbf, aes(sample = log10(.data[[yvar]]))) +
#     geom_point(color = "red", shape = 3) +
    stat_qq() +
    stat_qq_line() +
    # labs(x = paste0("log10(",yvar,")"), y = paste0("log10(",yvar,")")) +
    labs(x = "theor", y = paste0("log10(",yvar,")")) +
    theme_minimal()
}

bplot_qqlog_hg <- function(yvar, Dbf) {

  ggplot(Dbf, aes(sample = log(-.data[[yvar]]))) +
    stat_qq() +
    stat_qq_line() +
    # labs(x = paste0("log10(-",yvar,"_theor)"), y = paste0("log10(-",yvar,")")) +
    labs(x = "theor", y = paste0("log10(-",yvar,")")) +
    theme_minimal()
}

Fig_QQlog <- function(yvar, Dbf, pprint) {

  p1 <- bplot_qqlog(yvar[1], Dbf)
  p2 <- bplot_qqlog(yvar[2], Dbf)
  p3 <- bplot_qqlog(yvar[3], Dbf)
  p4 <- bplot_qqlog(yvar[4], Dbf)
  p5 <- bplot_qqlog(yvar[5], Dbf)
  p6 <- bplot_qqlog(yvar[6], Dbf)

  ## Combining the figures

  cplot_tot  <- ((p1 + p2 + p3) / (p4 + p5 + p6)) +
    plot_layout(ncol = 1, heights = c(1, 1))

  ## Plotting the fig.?

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = 14, height = 8)
    print(cplot_tot)
  }

  return(cplot_tot)

}

Fig_QQlog_hg <- function(yvar, Dbf, pprint) {

  p1 <- bplot_qqlog_hg(yvar[1], Dbf)
  p2 <- bplot_qqlog_hg(yvar[2], Dbf)
  p3 <- bplot_qqlog_hg(yvar[3], Dbf)
  p4 <- bplot_qqlog_hg(yvar[4], Dbf)
  p5 <- bplot_qqlog_hg(yvar[5], Dbf)
  p6 <- bplot_qqlog_hg(yvar[6], Dbf)

  ## Combining the figures

  cplot_tot  <- ((p1 + p2 + p3) / (p4 + p5 + p6)) +
    plot_layout(ncol = 1, heights = c(1, 1))

  ## Plotting the fig.?

  if (pprint == "yes") {
    windows(width = 14, height = 8)
    print(cplot_tot)
  }

  return(cplot_tot)

}

############### Plotting Figures ####################

hg_var <- c(paste0("hg_", Best_methods),"hg")
Ks_var <- c(paste0("Ks_", Best_methods),"Ks")

gg_plot[[ifig]]      <- Fig_QQ_hg(hg_var, Data_inf, "no")
gg_plot_width[ifig]  <- width_g
gg_plot_height[ifig] <- height_g
names(gg_plot)[ifig] <- "hg_norm"
ifig <- ifig+1

gg_plot[[ifig]]      <- Fig_QQ(Ks_var, Data_inf, "no")
gg_plot_width[ifig]  <- width_g
gg_plot_height[ifig] <- height_g
names(gg_plot)[ifig] <- "Ks_norm"
ifig <- ifig+1

gg_plot[[ifig]]      <- Fig_QQlog_hg(hg_var, Data_inf, "no")
gg_plot_width[ifig]  <- width_g
gg_plot_height[ifig] <- height_g
names(gg_plot)[ifig] <- "hg_lognorm"
ifig <- ifig+1

gg_plot[[ifig]]      <- Fig_QQlog(Ks_var, Data_inf, "no")
gg_plot_width[ifig]  <- width_g
gg_plot_height[ifig] <- height_g
names(gg_plot)[ifig] <- "Ks_lognorm"
ifig <- ifig+1
```

```r
######### Functions for computing the KS tests ########################

print("                                                      ")
print("######################################################")
print("# Kolmogorov Smirnov KS test                         #")
print("######################################################")
print("                                                      ")
Sys.sleep(1tds)

######### Functions for KS test of normality  ###

KS_norm <- function(yvar,Dbf) {

  Y <- Dbf[,which(colnames(Dbf) == yvar)]

  yKS_1 <- ks.test(Y,"pnorm",mean=mean(Y),sd=sd(Y))
  yKS_2 <- c(yKS_1$p.value, mean(Y), sd(Y))
  names(yKS_2) <- c("KS.p.value","mean","sd")

  return(list(KS_result = yKS_1, KS_p = yKS_2))

}

######### Functions for KS test of log-normality  ###

KS_normlog <- function(yvar,Dbf) {

  Y <- na.omit(log10(Dbf[,which(colnames(Dbf) == yvar)]))

  yKS_1 <- ks.test(Y,"pnorm",mean=mean(Y),sd=sd(Y))
  yKS_2 <- c(yKS_1$p.value, mean(Y), sd(Y))
  names(yKS_2) <- c("KS.p.value","mean","sd")

  return(list(KS_result = yKS_1, KS_p = yKS_2))

}

KS_normlog_hg <- function(yvar,Dbf) {

  Y <- na.omit(log10(-Dbf[,which(colnames(Dbf) == yvar)]))

  yKS_1 <- ks.test(Y,"pnorm",mean=mean(Y),sd=sd(Y))
  yKS_2 <- c(yKS_1$p.value, mean(Y), sd(Y))
  names(yKS_2) <- c("KS.p.value","mean","sd")

  return(list(KS_result = yKS_1, KS_p = yKS_2))

}

### computing the results for normality - hg ####################

KS_norm_hg_r      <- list()
KS_norm_hg.pvalue <- data.frame()

for (i in 1:length(hg_var))  {

  aa <- KS_norm(hg_var[i],Data_inf)
  KS_norm_hg_r[[i]]   <- aa$KS_result
  KS_norm_hg.pvalue   <- rbind(KS_norm_hg.pvalue,t(aa$KS_p))

  remove(aa)

}

names(KS_norm_hg_r)          <- hg_var
row.names(KS_norm_hg.pvalue) <- hg_var

hg_var_norm <- hg_var[which(KS_norm_hg.pvalue[,1] > 0.05)]
## test considering 0.05

### computing the results for normality - Ks ####################

KS_norm_Ks_r      <- list()
KS_norm_Ks.pvalue <- data.frame()

for (i in 1:length(Ks_var))  {

  aa <- KS_norm(Ks_var[i],Data_inf)
  KS_norm_Ks_r[[i]]   <- aa$KS_result
  KS_norm_Ks.pvalue   <- rbind(KS_norm_Ks.pvalue,t(aa$KS_p))

  remove(aa)

}

names(KS_norm_Ks_r)          <- Ks_var
row.names(KS_norm_Ks.pvalue) <- Ks_var

Ks_var_norm <- Ks_var[which(KS_norm_Ks.pvalue[,1] > 0.05)]
## test considering 0.05

### computing the results for log-normality - hg ####################

KS_normlog_hg_r      <- list()
KS_normlog_hg.pvalue <- data.frame()
```

```
  for (i in 1:length(hg_var))  {

    aa <- KS_normlog_hg(hg_var[i],Data_inf)
    KS_normlog_hg_r[[i]] <- aa$KS_result
    KS_normlog_hg.pvalue <- rbind(KS_normlog_hg.pvalue,t(aa$KS_p))

    remove(aa)

  }

  names(KS_normlog_hg_r)          <- hg_var
  row.names(KS_normlog_hg.pvalue) <- hg_var

  hg_var_normlog <- hg_var[which(KS_normlog_hg.pvalue[,1] > 0.05)]
  ## test considering 0.05

  ### computing the results for normality - Ks ###################

  KS_normlog_Ks_r      <- list()
  KS_normlog_Ks.pvalue <- data.frame()

  for (i in 1:length(Ks_var))  {

    aa <- KS_normlog(Ks_var[i],Data_inf)
    KS_normlog_Ks_r[[i]]   <- aa$KS_result
    KS_normlog_Ks.pvalue <- rbind(KS_normlog_Ks.pvalue,t(aa$KS_p))

  }

  names(KS_normlog_Ks_r)          <- paste0(Ks_var,"_log10")
  row.names(KS_normlog_Ks.pvalue) <- paste0(Ks_var,"_log10")

  Ks_var_normlog <- Ks_var[which(KS_normlog_Ks.pvalue[,1] > 0.05)]
  ## test considering 0.05

########## Savings          ################################

## Saving the figures

if (renew_figs == "yes")  {

  print("                                                          ")
  print("##########################################################")
  print("# Saving the figures                                     #")
  print("##########################################################")
  print("                                                          ")
  Sys.sleep(ltds)

  setwd(T_figs)

  for (i in 1:length(gg_plot)) {

    file_name <- paste(as.character(i), names(gg_plot)[i], "fig.png", sep = "_")

    ggsave(file_name, plot = gg_plot[[i]],
           width = gg_plot_width[i], height = gg_plot_height[i], units = "in")

    print(file_name)

   }

  setwd(T_wd)

}

 if (print_rst == "yes")  {

    print("                                                          ")
    print("##########################################################")
    print("# Printing the results                                   #")
    print("##########################################################")
    print("                                                          ")
    Sys.sleep(ltds)

    print("####                                ")
    print("#### Results for hg ##########     ")
    print("#### normal distribution           ")
    print("####                                ")
    print(KS_norm_hg_r)
    print("####                                ")

    print("####                                ")
    print("** Normal Distribution for hg **   ")
    print(hg_var_norm)
    print("####                                ")

    print("####                                ")
    print("#### log-normal distributions      ")
    print("####                                ")
    print(KS_normlog_hg_r)
    print("####                                ")

    print("####                                ")
    print("** Distributions log-normales for hg **")
    print(hg_var_normlog)
    print("####                                ")

    print("####                                ")
    print("#### Results for Ks ##########     ")
    print("#### normal distribution           ")
    print("####                                ")
    print(KS_norm_Ks_r)
    print("####                                ")
```

```
    print("####                                ")
    print("** Distributions normales for Ks **")
    print(Ks_var_norm)
    print("####                                ")

    print("#### log-normal distribution        ")
    print("####                                ")
    print(KS_normlog_Ks_r)
    print("####                                ")

    print("####                                ")
    print("** Distributions log-normales for Ks **")
    print(Ks_var_normlog)
    print("####                                ")

    setwd(T_wd)

  }


  ########## Savings the numerical results   ###################################

  ## Saving the database

  if (renew_results == "yes")  {

    print("                                                          ")
    print("##########################################################")
    print("# Saving results                                         #")
    print("##########################################################")
    print("                                                          ")
    Sys.sleep(ltds)

    setwd(T_results)

    ## saving regressions lines for hg and Ks

    zz1_name <- "zz1_KS.xlsx"

    wb1 <- createWorkbook()

    addWorksheet(wb1, "KS_norm_hg")
    addWorksheet(wb1, "KS_log-norm_hg")
    addWorksheet(wb1, "KS_norm_Ks")
    addWorksheet(wb1, "KS_log-norm_Ks")

    writeData(wb1, "KS_norm_hg",  KS_norm_hg.pvalue, rowNames = TRUE)
    writeData(wb1, "KS_log-norm_hg", KS_normlog_hg.pvalue, rowNames = TRUE)
    writeData(wb1, "KS_norm_Ks",  KS_norm_Ks.pvalue, rowNames = TRUE)
    writeData(wb1, "KS_log-norm_Ks", KS_normlog_Ks.pvalue, rowNames = TRUE)

    saveWorkbook(wb1, zz1_name, overwrite = TRUE)
    print(zz1_name)

  }

 setwd(T_wd)

############### END ##########################################

# stop("interruption of the program", call. = FALSE)

print("")
print("# That's all folks")
Sys.sleep(ltds)
print(" !! Don't forget to move your files to a safe place!!")
print(" !! All files will be overwritten at next round!!")
```

VII.1.9 Les scripts Scilab pour l'extraction des données brutes d'infiltration (Data-treatment_scilab_V6)

VII.1.9.1 SciFile_a_explore_data.sci

```
// Initialization

    clear
    mode(0);
    ieee(1);
    clearglobal;

    xdel(winsid()); ·········// deletes figs

//// Indices, constant and style

    i_fig = 1;
    i_sav = 1;

    xfs_title = 1.75;
    xfs_leg = 3;
    xfs_axis = 3;
    fs = 1;

    rrfig = 1; ··········// figure size factor
    rrpos = 0.75;

    pfig = 5;

//// initialisation of variables

    entry = [];
    t_exp = [];
    y_exp = [];
    t_exp_r = [];
    delta_t = [];
    delta_y = [];
    a1 = [];
    a2 = [];
    length_cell = [];
    tcell = cell();
    ycell = cell();
    na1 = [];
    na2 = [];
    t_exp_rr = [];
    y_exp_rr = [];
    delta_y_exp_rr = [];
    zna_ = [];
    znb_ = [];
    zna = [];
    t_exp_rrz = [];
    y_exp_rrz = [];
    t_select = [];
    y_select = [];
    t_staircase = [];
    y_staircase = [];

    rep_co = "yes";

// Directories
//
    rep = x_mdialog("Check data","Next","Press OK");

    if rep == [] then
        chdir(T_wd);
        x_mdialog("Program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
        abort;
    end

//
    pwd;

    T_wd = uigetdir(ans,"Go to the root folder (contains \0_functions \1_data, \2_results)");

    if T_wd == "" then
        chdir(T_wd);
        x_mdialog("Program ended","Caution: remove files from \2_results","Press ok");
        abort;
    end

    chdir(T_wd);

    T_functions = T_wd + "\0_functions";
    T_data = T_wd + "\1_data";
    T_results = T_wd + "\2_results";

// Upload tool functions and clean windows

    exec(T_functions+"\tool_functions.sce",-1);

// Upload experimental data

    while rep_co == "yes"

        chdir(T_data);

        name_ = uigetfile(["*.txt"],T_data,"Check data -- step #2: Select data file");
        if name_ == "" then
            chdir(T_wd);
            x_mdialog("Program ended","Caution: remove files from \2_results","Press ok");
            abort;
        end

        name = part(name_,length(T_data)+2:length(name_)-4);
```

```
        entry = read(name + ".txt",-1,6);                                    //--> data file

        chdir(T_wd);

        t = entry(:,1);
        ydata = cell();

        for i=2:size(entry,2)
        ydata{i-1} = entry(:,i);
        end

////// Plot of dataset ///////////////

        msize = [8;8;6;6;6];

        number = [];
        for i = 1:length(ydata)
            number = [number;i];
        end

        leg_txt = "Port "+string(number);

        clf(i_fig);
        gg = scf(i_fig);
        gg.figure_size = [1000,587];
        gg.figure_position = [100,100];

        i_fig = i_fig+1;

        for i = 1:length(ydata)
        plot(t,ydata{i},"^");
        end

        xlabel("$t\ [s]$","fontsize",xfs_axis);
        ylabel("$y\ [V]$","fontsize",xfs_axis);

        a = gca();

        for i = 1:length(ydata)
            a.children(i).children.mark_style = 5+i;
            a.children(i).children.mark_background = i;
            a.children(i).children.mark_foreground = i;
            a.children(i).children.mark_size = msize(i);
        end

        leg = legend(leg_txt);
        leg.marks_count = 1;

        rep_co = x_mdialog("Check data - step #3: End?","Would you like to chcek other data?","yes");

        if rep_co == "" then
            chdir(T_wd);
            x_mdialog("Program ended","Caution: remove files from \2_results","Press ok");
            abort;
        end

    end

////////////////// End ////////////////////////////////////////////////////////
```

VII.1.9.2 SciFile_a_run_filter_V6.sci

```
// Initialisation

  clear
  mode(0);
  ieee(1);
  clearglobal;

  close(winsid());  //deletes figs

//// Indices, constant and style

  i_fig = 1;
  i_sav = 1;

  xfs_title = 1.75;
  xfs_leg = 1;
  xfs_axis = 1;
  fs = 1;

  rrfig = 1;  //figure size factor
  rrpos = 0.75;

  figax_min = 0.99;
  figax_max = 1.01;

  pfig = 5;

//// initialisation of variables

  entry = [];
  t_exp = [];
  y_exp = [];
  t_exp_r = [];
  delta_t = [];
  delta_y = [];
  a1 = [];
  a2 = [];
  length_cell = [];
  tcell = cell();
  ycell = cell();
  na1 = [];
  na2 = [];
  t_exp_rr = [];
  y_exp_rr = [];
  delta_y_exp_rr = [];
  sna_ = [];
  snb_ = [];
  sna = [];
  t_exp_rrs = [];
  y_exp_rrs = [];
  t_select = [];
  y_select = [];
  t_staircase = [];
  y_staircase = [];
  t_pos_qt = [];
  t_pos_dt = [];
  t_pos_dy = [];
  k_checked_qt = [];
  k_checked_dt = [];
  k_checked_dy = [];
  kk_scan =[];

//
// Directories
//
  rep = x_mdialog("Filter Program - step #1: Root folder","Locate the root folder","Press OK");

  if rep == [] then
    chdir(T_wd);
      x_mdialog("Program interrupted!!","Caution: watch for temporary files in the Result folder","Press ok");
    abort;
  end

//
  pwd;

  T_wd = uigetdir(ans,"Go to the root folder (contains \0_functions \1_data, \2_results)");

  if T_wd == "" then
      x_mdialog("Program interrupted!!","Caution: watch for temporary files in the Result folder","Press ok");
      abort;
  end

  chdir(T_wd);

  T_functions = T_wd + "\0_functions";
  T_data = T_wd + "\1_data";
  T_results = T_wd + "\2_results";
  T_devices = T_wd + "\1_data\Devices";

// Upload tool functions

  chdir(T_functions);

  exec("tool_functions.sce",-1);

// Upload experimental data

  chdir(T_wd);

  rep_choice = [0,0];

  while rep_choice(2) <> 1

    l1=list("  Procedures      ",0,["        Treat new data      ","     Refine treated data     ","   "]);
    l2=list("                  ",0,["          View data         ","        Stop program       ","   "]);

    rep_choice = x_choices("Filter Program - step #2: import data",list(l1,l2));

    if rep_choice(2) == 2 then
      chdir(T_wd);
      x_mdialog("Program interrupted!!","Caution: watch for temporary files in the Result folder","Press ok");
      abort;
    end

    if rep_choice(1) == 1 then

      exec(T_functions+"\Select_SciFile_New_data.sci",-1);  //procedure for new data
      rep_choice(2) = 0;
```

```
    end

    if rep_choice(1) == 2 then

        exec(T_functions+"\Select_SciFile_Retreat_data.sci",-1);          // procedure for uploading alreday treated data

    end

    if rep_choice(2) == 1 then

        exec(T_functions+"\Select_SciFile_View_data.sci",-1);          // procedure for uploading alreday treated data

    end

// Plot of dataset

    clf(i_fig);
    gg = scf(i_fig);
    gg.figure_size = [1000,587];
    gg.figure_position = [100,100];

    i_fig = i_fig+1;

    subplot(121)

        plot(t_exp_0, y_exp_0,"black +","Markersize",7);
        plot(t_exp, y_exp,"red o","Markersize",7);

        xlabel("$t\ [s]$","fontsize",xfs_axis);
        ylabel("$y\ [V]$","fontsize",xfs_axis);
        title("$\textbf{Selection of the raw data to filter - file:\ "+name+"}$","fontsize",xfs_title);

        a = gca();
        a.data_bounds = [min(t_exp_0),min(y_exp_0);max(t_exp_0),max(y_exp_0)];

        leg = legend("$\text{Raw data}$","$\text{Selected raw dataset}$",1);
        leg.marks_count = 1;
        leg.line_width = 0.05;
        leg.line_mode = "off";
        leg.font_size = xfs_leg;

    subplot(122)

        plot(t_exp, y_exp,"red o","Markersize",7);

        xlabel("$t\ [s]$","fontsize",xfs_axis);
        ylabel("$y\ [V]$","fontsize",xfs_axis);
        title("$\textbf{Dataset to be filtered}$","fontsize",xfs_title);

        a = gca();
        a.data_bounds = [min(t_exp),min(y_exp);max(t_exp),max(y_exp)];


//////// Application of the automatic filter ////////////////////////////////////

    T_folder_name = T_results+"\"+T_folder_name_;

    chdir(T_folder_name);
    [names, typs, dims, vols] = listvarinfile(name_result_sod+".sod");
    a = find(names == "t_af");
    chdir(T_data);

    if a == [] then,
        rep_avail_1 = "no";
        rep_avail_2 = "yes";
    else,
        rep_avail_1 = "yes";
        rep_avail_2 = "no";
    end

    ltxt1 = ["Data for automatic filter available?";"Do you want to run the automatic filter?"];
    ltxt2 = [rep_avail_1;rep_avail_2];

    rep = x_mdialog("Filter Program - step #2: Automatic filter",ltxt1,ltxt2);

    close(winsid());          // deletes figs

    if rep == [] then
        chdir(T_wd);
        x_mdialog("Program interrupted!!","Caution: watch for temporary files in the Result folder","Press ok");
        abort;
    end

    if rep(2) == "yes" then,

        // parameters for filtering

        ex_tol = 0.01;          // precision of the measure
        x_tol = 1.75;          // security factor for tolerance : assumed (%)
        x_lgth = 7.5;          // ratio of length : assumed (%)

        // Results

        Mf = Filter(t_exp,y_exp,ex_tol,x_tol,x_lgth);

        t_af = Mf(:,1);
        y_af = Mf(:,2);

        n_af = size(t_af,1);

        t_af_moy = (t_af(1:(n_af-1))+t_af(2:n_af))/2;
        delta_t_af = t_af(2:n_af)-t_af(1:(n_af-1));
        delta_y_af = y_af(2:n_af)-y_af(1:(n_af-1));


    // Savings & cleaning

        chdir(T_folder_name);
        save(name_result_sod+".sod","-append","t_af","y_af","n_af");
        save(name_result_sod+".sod","-append","t_af_moy","delta_t_af","delta_y_af");
        chdir(T_data);

    end

    close(winsid())          // deletes figs
```

```
        i_fig = 1;

    // Figs of filtered data

        clf(i_fig);
        gg = scf(i_fig);
        gg.figure_position = [100,50]*rrpos;
        gg.figure_size = [1200,897]*rrfig;

        i_fig = i_fig+1;

        subplot(2,4,1)

            plot(t_exp,y_exp,"black-+","Markersize",6);
            plot(t_af,y_af,"blue-o","Markersize",7);


            xlabel("$t\ [s]$","fontsize",xfs_axis);
            ylabel("$y\ [V]$","fontsize",xfs_axis);

            leg = legend("$\text{Exp. data}$","$\text{Automatic filter}$",1);
            leg.marks_count = 1;
            leg.line_width = 0.05;
            leg.line_mode = "off";
            leg.font_size = xfs_leg;
            leg.fill_mode = "off";

            title("$\textbf{Automatic filter}$","fontsize",xfs_title);

        subplot(2,4,2)

            plot(t_af_moy,abs(delta_y_af./delta_t_af),"blue-o","Markersize",7);

            xlabel("$t\ [s]$","fontsize",xfs_axis);
            ylabel("$\Delta y/\Delta t\ [V/s]$","fontsize",xfs_axis);
            title("$\textbf{File:\-"+name+"}$","fontsize",xfs_title);

        subplot(2,4,3)

            plot(t_af_moy,delta_t_af,"blue-o","Markersize",7);

            xlabel("$t\ [s]$","fontsize",xfs_axis);
            ylabel("$\Delta t\ [s]$","fontsize",xfs_axis);

            a = gca();
            a.data_bounds = [min(t_exp),0;max(t_exp),ceil(1.25*max(delta_t_af))];

        subplot(2,4,4)


            plot(t_af_moy,abs(delta_y_af),"blue-o","Markersize",7);
            plot(t_af_moy,abs(mean(delta_y_af))*ones(n_af-1,1),"black--");

            xlabel("$t\ [s]$","fontsize",xfs_axis);
            ylabel("$\Delta y\ [V]$","fontsize",xfs_axis);

            xstring(0.25*max(t_af_moy),1.25*min(delta_y_af),["$\textbf{mean\-=\-"+string(mean(delta_y_af))+"}$"])
            gca().font_size = 3;

            a = gca();
            a.data_bounds = [min(t_exp),0;max(t_exp),1.25*max(abs(delta_y_af))];
//          a.tight_limits = ["on","on","on"];


////////  Determination of the moving mean ////////////////////

        chdir(T_data);

        chdir(T_folder_name);
        [names, typs, dims, vols] = listvarinfile(name_result_sod+".sod");
        a = find(names == "t_mavg_moy");
        chdir(T_data);

        if a == [] then,
            rep_avail_1 = "no";
            rep_avail_2 = "yes";
        else,
            rep_avail_1 = "yes";
            rep_avail_2 = "no";
        end

        ltxt1 = ["Moving mean dataset available?";"Do you want to run the moving mean procedure?"];
        ltxt2 = [rep_avail_1;rep_avail_2];

        rep2 = x_mdialog("Filter Program - step #4: moving mean",ltxt1,ltxt2);

        close(winsid());        //deletes figs

        if rep2 == [] then
            chdir(T_wd);
            x_mdialog("Program interrupted!!","Caution: watch for temporary files in the Result folder","Press ok");
            abort;
        end

        if rep2(2) == "yes" then

            exec(T_functions+"\Select_SciFile_Moving_Mean.sci",-1);              //procedure for moving average

        //Savings & Cleaning

            chdir(T_folder_name);
            save(name_result_sod+".sod","-append","delta_t_mavgt","delta_y_mavgt");
            save(name_result_sod+".sod","-append","t_exp_mavg","y_exp_mavg");
            save(name_result_sod+".sod","-append","t_mavg","y_mavg","n_mavg");
            save(name_result_sod+".sod","-append","t_mavg_moy","delta_t_mavg","delta_y_mavg");
            chdir(T_data);

        end

        close(winsid());        //deletes figs
        i_fig = 1;


//////////////  Plot of the raw data, automatic filter & moving mean ////////////////////////////

        chdir(T_folder_name);
        [names, typs, dims, vols] = listvarinfile(name_result_sod+".sod");
        asel = find(names == "t_select");
        chdir(T_data);
```

```
        data_selected2 = [t_infil I_infil];

        write(name_result2+".txt",data_selected2);                              // write I(t) to file1
        write(name_result3+".txt",data_selected3);                              // write I(t) to file1

    // Filter parameters

        la1 = "File name                                          ";
        lb1 = "---Data selection-----------------------------------";
        lb2 = "Data treated [New or uploaded data]                ";
        lb3 = "Beginning time [s]                                 ";
        lb4 = "Ending time [s]                                    ";
        lc1 = "---Moving mean--------------------------------------";
        lc2 = "Time interval for averaging [s]                    ";
        lc3 = "Tension drop between folowwing points [V]?         ";
        ld1 = "---Original filter----------------------------------";
        ld2 = "Filter used for the final set                      ";
        ld3 = "Number of modified points                          ";
        le1 = "---Infiltration device------------------------------";
        le2 = "Origin of the device                               ";
        le3 = "Section [cm^2]                                     ";
        le4 = "Calibration file                                   ";
        le5 = "Device number file (if available)                  ";
        le6 = "Slope, a [V/mm]                                    ";
        le7 = "Intercept, b [-V]                                  ";
        lf1 = "---Final cumulative infiltration--------------------";
        lf2 = "Number of points                                   ";
        lf3 = "Final time [s]                                     ";
        lf4 = "Final cumulative infiltration [mm]                 ";

        lra1 = name;
        lrb1 = "----------------";
        if rep_choice(1) == 1, then lrb2 = "New"; else
                lrb2 = "Uploaded";
        end
        lrb3 = string(min(t_exp));
        lrb4 = string(max(t_exp));
        lrc1 = "----------------";
        lrc2 = string(delta_t_mavgt);
        lrc3 = string(delta_y_mavgt);
        lrd1 = "----------------";
        lrd2 = filter_sel;
        lrd3 = string(n_filter_mod);
        lre1 = "----------------";
        lre2 = device;
        lre3 = string(Sec_dev);
        lre4 = file_calib_name;
        lre5 = i_dev;
        lre6 = string(a_dev);
        lre7 = string(b_dev);
        lrf1 = "----------------";
        lrf2 = string(size(t_select,1));
        lrf3 = string(max(t_select));
        lrf4 = string(max(I_infil));

    // Printing filter features

        txt_result_1  = "Filter features";
        txt_result_2_ = [la1;lb1;lb2;lb3;lb4;lc1;lc2;lc3;ld1;ld2;ld3;le1;le2;le3;le4;le5;le6;le7;lf1;lf2;lf3;lf4];
        txt_result_3  = [lra1;lrb1;lrb2;lrb3;lrb4;lrc1;lrc2;lrc3;lrd1;lrd2;lrd3;lre1;lre2;lre3;lre4;lre5;lre6;lre7;lrf1;lrf2;lrf3;lrf4];
                          _       _

        for i = 1:size(txt_result_2_,1)
            txt_result_2(i) = part(txt_result_2_(i),1:(length(txt_result_2_(i))-1));
        end

        x_mdialog(txt_result_1,txt_result_2,txt_result_3);


    // Saving filter features in a text file

        name_result1 = name_result+"_Filter_feat_"+lstring_a(1)+"-"+lstring_a(2)+"-"+lstring_a(3)+"_"+lstring_a(4)+"h"+lstring_a(5);

        Result = txt_result_2_+txt_result_3;

        write(name_result1+".txt",Result);                                  // write filter features


  // Savings & Cleaning

        chdir(T_folder_name);
        save(name_result_sod+".sod","-append","txt_result_1","txt_result_2","txt_result_3");
        save(name_result_sod+".sod","-append","T_folder_name");
        chdir(T_data);

//////////// Final saving of variables in a sod file ////////////////////////////////////////////////////////////

        name_result_sod2 = name_result_sod+"_"+lstring_a(1)+"-"+lstring_a(2)+"-"+lstring_a(3)+"_"+lstring_a(4)+"h"+lstring_a(5);

        chdir(T_folder_name);
        [names,types,dims,vols] = listvarinfile(name_result_sod+".sod");
        save(name_result_sod2+".sod",names(:));


/////////// Other examples to run ?? ////////////////////////////////////////////////////////////

    chdir(T_wd);

    rep_choice_ap = x_mdialog("Do you want to run again the program?","Other cases to treat? [yes/no]","yes");

    if rep_choice_ap ==[] then
      chdir(T_wd);
      x_mdialog("Program interrupted!!","Caution: watch for temporary files in the Result folder","Press ok");
      abort;
    end

    if rep_choice_ap == "no" then,
       rep_choice(2) = 1;
       x_mdialog("Program is ended","Caution: files and results stored in:",T_folder_name);
       x_mdialog("Program stops","Caution: watch for temporary files in the Result folder","Press ok");
    end;

    if rep_choice_ap == "yes" then,
        x_mdialog("Program continues","Caution: files and results stored in:",T_folder_name);
        x_mdialog("Program Continues","Start new treatment","Press ok");
    end;

  end


////////////////// End ////////////////////////////////////////////////////////////
```

VII.1.10 Les scripts de Scilab_2_BEST-V003 (BEST_main.sce)

```
// Initialization

clear
mode(0);
ieee(1);
clearglobal;

//----- 0. Uploads -------------------------------

Version_Best = "Version 003";

rep_intro = x_mdialog("BEST Algorithm","Welcome to BEST","Version 003");

if rep_intro == [] then
    x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
    abort;
end


// Upload tool BEST functions and clean windows

    pwd;

    T1 = uigetdir(ans,"Go to main directory (contains \BEST_functions, \BEST_versions, \Data and \Result)");

    if T1 == "" then
        chdir(T1);
        x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
        abort;
    end

    chdir(T1);

// Upload tool BEST functions and clean windows

    exec(T1+"\BEST_functions\0_general_tool_functions.sci",-1);
    exec(T1+"\BEST_functions\1_PSD_functions.sci",-1);
    exec(T1+"\BEST_functions\2_BEST_functions.sci",-1);
    exec(T1+"\BEST_functions\3_It_functions.sci",-1);
    exec(T1+"\BEST_functions\4_HCWRF_comp.sci",-1);
    chdir(T1);


    T2 = T1+"\Data";

    T2 = uigetdir(T2,"Go to \Data directory");

    if T2 == "" then
        chdir(T1);
        x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
        abort;
    end

    chdir(T2);

    T1_vers = T1+"\BEST_versions";

// Choice of methods

    l1=list("BEST Method for the treatment of CI?",1,["      BEST-Slope      ","    BEST-Intercept    ","     BEST-Steady     ","  Transient SBI  ","     Steady SBI     "]);
    l2=list("BEST Method for the treatment of PSD?",1,["     Complete PSD     ","%Clay, %Silt and %Sand"]);

    rep = x_choices("Menu d''articles",list(l1,l2));

    if rep == [] then
        chdir(T1);
        x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
        abort;
    end

    M_methods_1 = ["a_BEST_Slope" "d_BEST_Slope_M"];
    M_methods_2 = ["b_BEST_Intercept" "e_BEST_Intercept_M"];
    M_methods_3 = ["c_BEST_Steady" "f_BEST_Steady_M"];
    M_methods_4 = ["g_BEST_TSSBI" "i_BEST_TSSBI_M"];
    M_methods_5 = ["h_BEST_SSSBI" "j_BEST_SSSBI_M"];

    M_methods = "\"+[M_methods_1;M_methods_2;M_methods_3;M_methods_4;M_methods_5]+".sce";

// excution of selected version

    rep_method = "yes";

    kk_method = 1;

    while rep_method == "yes"

    exec(T1_vers+M_methods(rep(1),rep(2)),-1);

    rep_method = x_mdialog("Answer by yes or no","Run other files with same method and in same folder? [yes or no]","yes");

    kk_method = kk_method+1;

    end

    chdir(T1);

    x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
```

VII.1.11 Les scripts Scilab_2_BEST-V004 (BEST_main.sce)



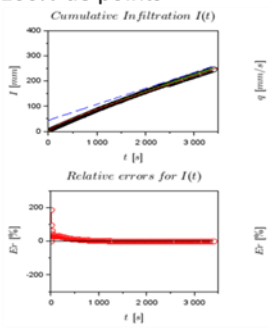
```
// Initialization

  clear

  mode(0);
  ieee(1);
  clearglobal;

// ---- 0. Uploads ---------------------------------

   Version_Best = "Version 004";

   rep_intro = x_mdialog("BEST Algorithm","Welcome to BEST",Version_Best);

    if rep_intro == [] then
       x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
       abort;
    end


// Upload tool BEST functions and clean windows

       pwd;

       T1 = uigetdir(ans,"Go to main directory (contains \BEST_functions, \BEST_versions, \Data and \Result)");

       if T1 == "" then
          chdir(T1);
          x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
          abort;
       end

       chdir(T1);

// Upload tool BEST functions and clean windows

       exec(T1+"\BEST_functions\0_general_tool_functions.sci",-1);
       exec(T1+"\BEST_functions\1_PSD_functions.sci",-1);
       exec(T1+"\BEST_functions\2_BEST_functions.sci",-1);
       exec(T1+"\BEST_functions\3_It_functions.sci",-1);
       exec(T1+"\BEST_functions\4_HCWRF_comp.sci",-1);
       chdir(T1);


       T2 = T1+"\Data";

       T2 = uigetdir(T2,"Go to \Data directory");

       if T2 == "" then
          chdir(T1);
          x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
          abort;
       end

       chdir(T2);

       T1_vers = T1+"\BEST_versions";

// Choice of methods

   l1=list('BEST Method for the treatment of CI?',1,['      BEST-Slope      ','   BEST-Intercept   ','      BEST-Steady      ','      BEST-WR      ','      BEST-ST-WR      ']);
   l2=list('BEST Method for the treatment of PSD?',1,['      Complete PSD      ','%Clay, %Silt and %Sand']);

   rep = x_choices("Menu d''articles",list(l1,l2));

    if rep == [] then
       chdir(T1);
       x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
       abort;
    end

   M_methods_1 = ["a_BEST_Slope" "d_BEST_Slope_M"];
   M_methods_2 = ["b_BEST_Intercept" "e_BEST_Intercept_M"];
   M_methods_3 = ["c_BEST_Steady" "f_BEST_Steady_M"];
   M_methods_4 = ["g_BEST_WR" "i_BEST_WR_M"];
   M_methods_5 = ["h_BEST_ST_WR" "j_BEST_ST_WR_M"];

   // Previous work

   //    M_methods_4 = ["g_BEST_TSSBI" "i_BEST_TSSBI_M"];
   //    M_methods_5 = ["h_BEST_SSSBI" "j_BEST_SSSBI_M"];

   M_methods = "\"+[M_methods_1;M_methods_2;M_methods_3;M_methods_4;M_methods_5]+".sce";

// excution of selected version

   rep_method = "yes";

   kk_method = 1;

   while rep_method == "yes"

   exec(T1_vers+M_methods(rep(1),rep(2)),-1);

   rep_method = x_mdialog("Answer by yes or no","Run other files with same method and in same folder? (yes or no)","yes");

   kk_method = kk_method+1;

   end

   chdir(T1);
   x_mdialog("BEST program is ended","Caution: remove files from \Result and \Figures folders","Press ok");
```

VII.2 Figures d'estimation des algorithmes BEST des paramètres hydrodynamiques pour l'axe2-3 de 50 et 100% du jeu de données grand et petit anneau

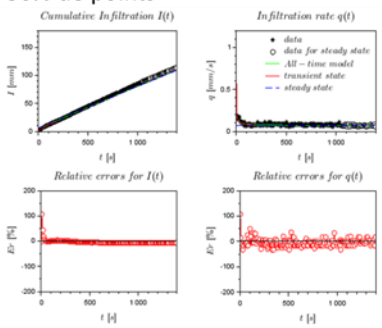
VII.2.1 Figures d'estimation des algorithmes BEST des paramètres hydrodynamiques pour l'axe 3 de 50 et 100% du jeu de données du petit anneau

Petit anneau: Site RDam_BEST_Slope

100% de points

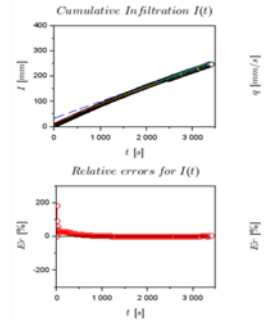


50% de points

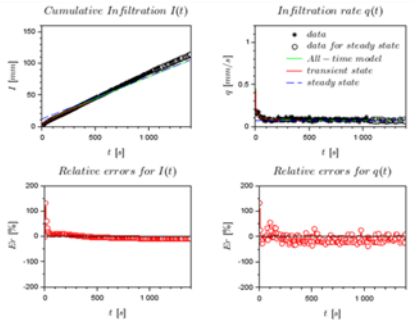


Petit anneau: Site RDam_BEST_Intercept

100% de points

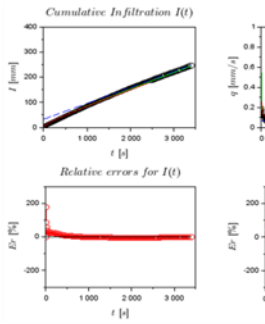


50% de points

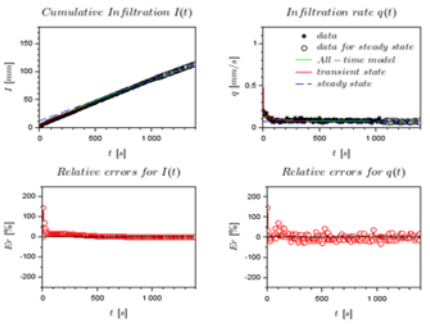


Petit anneau: Site RDam_BEST_Steady

100% de points



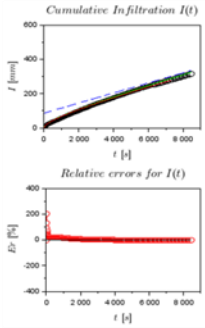
50% de points

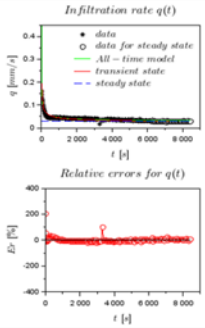


VII.2.2 Figures d'estimation des algorithmes BEST des paramètres hydrodynamiques pour l'axe 2 de 50 et 100% du jeu de données du grand Anneau

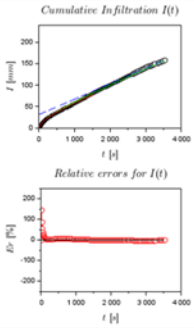
• Grand Anneau: site IUT BEST_Slope

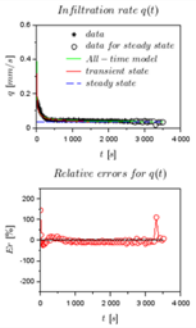
100% de points





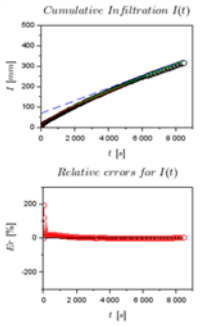
50% de points

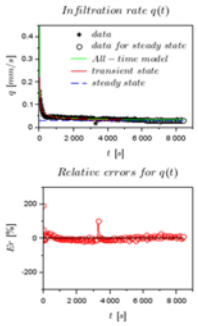




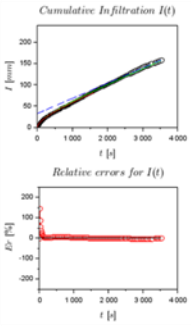
• Grand Anneau: site IUT BEST_Intercept

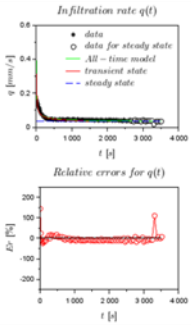
100% de points





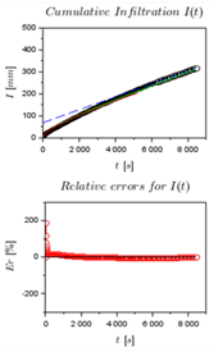
50% de points

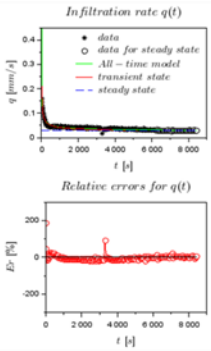




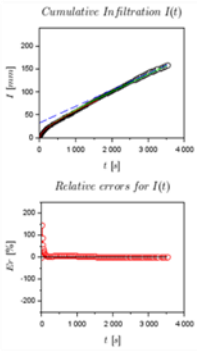
• Grand Anneau: site IUT BEST_Steady

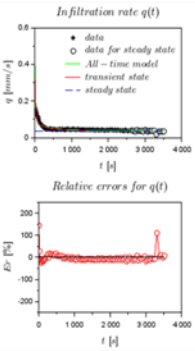
100% de points





50% de points





VII.3 Les différentes valeurs des paramètres de forme et d'échelle de l'algorithme BEST pour les sites du troisième axe.

ID	theta_r	theta_s	n	eta	hg_BS	Ks_BS	hg_BI	Ks_BI	hg_BSst	Ks_BSst	hg_BWR	Ks_BWR3T	hg_BWR3T	Ks_BWR
Christ_D_Essai1_Rep_1	0	0.5603061	2.4111701	7.8641673	-32.892926	0.0006983	-84.478424	0.0004694	-84.478424	0.0004964	-185.19035	0.0002045	-342.96465	0.00032
Christ_E_Essai1_Rep_2	0	0.5603061	2.410114	7.8766929	-406.42708	0.000239	-295.73349	0.0003131	-295.73349	0.0003069	-100.66388	0.0002989	-367.88102	0.0007096
Christ_F_Essai1_Rep_3	0	0.5603061	2.4197504	7.7647367	-134.73991	0.0007578	-156.68617	0.0006861	-156.68617	0.0006917	181.50415	-0.0007874	245.05776	-0.001367
Christ_J_Essai2_Rep_1	0	0.4874257	2.3814246	8.2435009	-506.3851	0.0003308	-233.36125	0.0008396	-233.36125	0.0006357	183.1833	-0.0011886	212.21253	-0.0014751
Christ_K_Essai2_Rep_2	0	0.4874257	2.3730489	8.3612272	-921.5036	0.0001027	-314.18122	0.0002829	-314.18122	0.0002684	-6.5941834	0.0006068	-234.70922	0.0026232
Christ_L_Essai2_Rep_3	0	0.4874257	2.3763138	8.3147135	-923.61747	0.0001029	-314.78724	0.0002835	-314.78724	0.000269	-6.5275319	0.0006056	-236.3121	0.0026268

CM_Q_Essai1_Rep_2	0	0.5887698	2.4241174	7.7156754	-439.86682	0.0001289	-137.18238	0.000344	-137.18238	0.0003065	-6023.6202	0.0000583	-1027.2395	0.0000106
CM_R_Essai1_Rep_1	0	0.5887698	2.4282892	7.6697415	-0.0549715	0.0015785	-747.37871	0.000158	-747.37871	0.000158	-8.0836664	0.0004317	-220.81122	0.0014394
CM_V_Essai2_Rep_3	0	0.5609592	2.4157916	7.8101024	-209.7256	0.0006306	-183.0313	0.0007124	-183.0313	0.0006855	640.01268	0.0003121	-549.55137	-0.0004066
CM_W_Essai2_Rep_1	0	0.5609592	2.4241513	7.7152982	-481.71114	0.0006029	-289.98675	0.0009357	-289.98675	0.0008814	-579.98702	0.0004523	-683.85135	0.0005189
CM_X_Essai2_Rep_2	0	0.5609592	2.4127479	7.8455722	-452.13845	0.0002459	-320.31817	0.0003255	-320.31817	0.0003191	-27.406034	0.0001714	-895.3494	0.0011622
FDC_AB_Essai1_Rep_3	0	0.5334878	2.3717593	8.3798257	-165.05379	0.002186	-87.584982	0.0039707	-87.584982	0.0033451	-18.249036	0.0056908	-70.108361	0.0095349
FDC_AC_Essai1_Rep_1	0	0.5334878	2.3782944	8.2868874	-117.78628	0.0004798	-86.851288	0.0006339	-86.851288	0.0005816	-171.45021	0.0005438	-96.97537	0.0002884
FDC_AD_Essai1_Rep_2	0	0.5334878	2.3887286	8.1449771	-874.76786	0.0002274	-247.40456	0.000743	-247.40456	0.0006919	-1909.0422	0.0002336	-849.96936	0.0001079

FDC_AH_Essai2_Rep_1	0	0.5246447	2.3686263	8.4255483	-1157.4267	0.0001405	-1347.4272	0.000172	-1347.4272	0.0001224	337.32952	0.0010696	-72.598117	-0.001031
FDC_AI_Essai2_Rep_2	0	0.5246447	2.3532604	8.6615466	-1122.2292	0.0001208	-1088.0402	0.0001742	-1088.0402	0.0001242	1318.9656	-0.0001075	1998.8101	-0.0001687
FDC_AJ_Essai2_Rep_3	0	0.5246447	2.365141	8.4773356	-49.219103	0.0007451	-12.236141	0.0011032	-12.236141	0.0009419	-137.2968	0.0001426	-796.47002	0.0004974
PC_Essai1_Rep_1	0	0.5942591	2.3600389	8.5549551	-182.92176	0.0088022	-119.48837	0.0129524	-119.48837	0.0121118	-179.19742	0.0376542	-6.3963268	0.0091679
PC_Essai1_Rep_2	0	0.5942591	2.3600389	8.5549551	-46.192903	0.0226529	-47.146708	0.0223835	-47.146708	0.0224286	-80.684119	0.0228585	-47.728688	0.0170594
PC_Essai1_Rep_3	0	0.5942591	2.3782651	8.2872965	-2.3990632	0.0202292	-0.6646731	0.0329788	-0.6646731	0.0209211	-22.334508	0.0145439	-40.929592	0.0183236
PC_Essai2_Rep_1	0	0.5951635	2.3871813	8.1655394	-0.6370585	0.0469589	-450.23204	0.0047557	-450.23204	0.0047557	-23.945461	0.0244888	-133.80969	0.0357233
PC_Essai2_Rep_2	0	0.5951635	2.3871813	8.1655394	-0.3189015	0.0740469	-450.23204	0.0074519	-450.23204	0.0074519	-52.065642	0.0438319	-40.777179	0.0389504

PC_Essai2_Rep_3	0	0.5951635	2.3871813	8.1655394	-0.237582	0.0710579	-450.23204	0.0071395	-450.23204	0.0071395	-81.601912	0.0336644	-33.16038	0.0212061
PCL_Essai1_Rep_1	0	0.5051622	2.3612297	8.5366438	-245.05387	0.1271276	-159.81954	0.1882099	-158.0904	0.1805013	682.7968	-0.0494022	787.4064	-0.0575567
PCL_Essai1_Rep_2	0	0.5051622	2.3435697	8.8212347	-290.3908	0.0950486	-144.94522	0.1796702	-144.94522	0.1663129	10550.77	0.0282198	-1094.2229	-0.0030721
PCL_Essai1_Rep_3	0	0.5051622	2.3612297	8.5366438	-159.08739	0.1284394	-116.73682	0.1699121	-116.73682	0.161119	-632.5283	0.437669	-5.0992985	0.0347671
PCL_Essai2_Rep_1	0	0.5442528	2.3464022	8.7736356	-87.803358	0.4143794	-59.433388	0.5978942	-59.433388	0.5233035	-87.803442	0.4992472	-64.633887	0.4143792
PCL_Essai2_Rep_2	0	0.5442528	2.3464022	8.7736356	-141.64009	0.2194153	-98.898465	0.3023243	-98.898465	0.2830423	-573.36028	0.1705833	-196.06881	0.0670871
PCL_Essai2_Rep_3	0	0.5442528	2.3464022	8.7736356	-4.1293049	0.5223956	-28.611054	0.2601435	-28.611054	0.3565298	-94.87769	0.3947568	-24.337712	0.200534
RDam_Essai1_Rep_1	0	0.474676	2.3667869	8.4527574	-2.8806171	0.1732065	-19.814499	0.0847903	-19.814499	0.1266261	-83.85175	0.1068494	-38.099562	0.0701051

RDam_Essai1_Rep_2	0	0.474676	2.366769	8.452574	-157.31586	0.015028	-116.04346	0.019504	-116.04346	0.018782	-665.87802	0.054124	-4.339782	0.004052
RDam_Essai1_Rep_3	0	0.474676	2.366769	8.452574	-116.3908	0.005593	-90.460112	0.006842	-90.460112	0.006634	-893.8689	0.001036	-789.68596	0.000921
RDam_Essai2_Rep_1	0	0.456110 5	2.332304 3	9.018580 8	-141.49552	0.004786 2	-104.74807	0.006195	-104.74807	0.005935 1	-3201.1589	0.000370 5	-2252.5805	0.000262 3
RDam_Essai2_Rep_2	0	0.456110 5	2.332304 3	9.018580 8	-80.758661	0.089576 3	-54.237519	0.12485	-54.237519	0.112737 2	-57.966257	0.225675 4	-2.905817	0.118186 9
RDam_Essai2_Rep_3	0	0.456110 5	2.332304 3	9.018580 8	-25.036752	0.262606 8	-435.01098	0.039863 4	-435.01098	0.039863 4	272.06933	0.216649 4	-60.103949	-0.105004 4