

Faculté des bioingénieurs

Dynamique des flux du bilan hydrique et propriétés hydrodynamiques d'une parcelle forestière tropicale

Modélisation avec Hydrus-1D et étude de cas dans la Mata Atlântica, à São Francisco Xavier, au Brésil.

Autrice : Manele Ounifi

Promoteur(ice)s : Pr. Mathieu Javaux, Pr. Laura Borma (INPE)

Lecteurs : Pr. Agnan Yannick, Pr. Vanclooster Marnik

Année académique : 2024-2025

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement*, à finalité spécialisée, orientation *Ressources en eau et en sol*

Ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe de la Professeure **Laura Borma** de l'**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, Brésil)**. L'ensemble des données utilisées pour concevoir et calibrer le modèle présenté ici provient du **laboratoire LabEcoh (INPE)**, qui développe ce projet depuis plusieurs années. Il est essentiel de souligner que ce travail repose en grande partie sur les efforts collectifs déployés au sein de ce laboratoire et que le mérite des mesures de terrain et de laboratoire revient à celles et ceux qui les ont conduites. Cette préface a également pour but d'indiquer clairement aux lecteurs et lectrices les personnes ressources pour chaque type de mesure, de façon à ce que toute interrogation puisse être adressée à celles et ceux qui en détiennent l'expertise directe

Fábio Sakaguchi a joué un rôle central dans la collecte des données, notamment pour les mesures de conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) réalisées les années précédentes, ainsi que dans l'organisation des campagnes de terrain. **Daniel Meneghetti** a assuré la majorité des mesures réalisées avec l'appareil Hyprop et a également contribué à certaines séries de mesures de conductivité hydraulique à saturation. **Breno Pupin** a également participé à l'organisation des campagnes de terrain ainsi qu'à la supervision des mesures de densité racinaire. Depuis trois ans, les mémoires réalisés dans le cadre de ce projet (B. Delvoie, 2023 ; C. Dermauw, 2024 ; L. Parmentier, 2024) s'appuient ainsi largement sur le travail accompli par ces chercheurs.

Au cours de l'année 2025, j'ai eu la chance de participer directement à une campagne d'échantillonnage au Brésil, sous la supervision du personnel du LabEcoh. Cette collaboration m'a également permis de réaliser moi-même une série de mesures de conductivité hydraulique saturée (KSAT) sur les échantillons récoltés. Ces données, venues compléter celles déjà disponibles, ont enrichi la base d'information utilisée dans le présent mémoire.

Dans le cadre de la rédaction de ce mémoire, l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle générative a été strictement encadrée. Elle s'est limitée à des opérations de reformulation et d'amélioration de la lisibilité du texte, sans jamais intervenir dans la production des données, des résultats ou des analyses scientifiques. Cette pratique s'inscrit dans le respect des recommandations de l'UCLouvain relatives à l'usage de l'intelligence artificielle générative (note du 6 juillet 2023).

Remerciements

Ceux qui me connaissent savent que j'ai tendance à dire merci trois fois plutôt qu'une. Et comme ce mémoire marque bien plus que la fin d'un travail académique ; qu'il symbolise la conclusion d'un long chemin jalonné de doutes, de remises en question mais aussi d'apprentissages précieux, de rencontres inspirantes et de défis relevés avec persévérance ; il m'importe de saluer correctement toutes les personnes qui ont compté. Tant durant mes années d'études que pour ce mémoire. Il n'est donc pas étonnant que mes remerciements se fassent longs...

Je remercie d'abord la Faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain. J'ai eu la chance d'y recevoir un enseignement de qualité, exigeant et stimulant, qui m'a permis de grandir autant sur le plan intellectuel que personnel. Cette formation m'a offert les moyens de rêver grand et d'oser concrétiser ces ambitions. Je remercie d'abord la **Faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain**. J'ai eu la chance d'y recevoir un enseignement de qualité, exigeant et stimulant, qui m'a permis de grandir autant sur le plan intellectuel que personnel. Cette formation m'a offert les moyens de rêver grand et d'oser concrétiser ces ambitions.

Je souhaite ensuite exprimer ma sincère reconnaissance au **professeur Mathieu Javaux**, promoteur principal de ce mémoire. Votre exigence, votre rigueur scientifique et votre disponibilité, malgré un emploi du temps chargé, ont profondément marqué mon parcours. Vos conseils et la pertinence de vos analyses m'ont guidées tout au long du processus.

Agradeço à **professora Laura Borma** pela calorosa recepção no Brasil, por sua gentileza e grande disponibilidade. Sua abordagem rigorosa foi uma fonte de inspiração, ao mesmo tempo em que me ajudou a manter a confiança nos momentos de dúvida.

Je tiens à adresser un remerciement tout particulier à **Basile Delvoie**, chercheur de l'ELI, qui m'a accompagnée cette année pour mon mémoire. Ton soutien a dépassé de loin ce qu'on attend habituellement dans ce cadre. Tu as été à la fois un appui technique essentiel et un soutien moral constant. Ta patience, ta générosité et ta bienveillance ont compté énormément.

Agradeço também à equipe CST do INPE. Ao **Fabio** e ao **Breno**, pelo apoio valioso em campo, ao **Daniel** por sua expertise técnica, e à **Luciana** pela acolhida e simpatia. Guardarei ótimas lembranças dos momentos que compartilhamos.

I would also like to warmly thank the members of the Soil and Plant Hydraulics team (**Aurélien, Erfan, Luke, Tianjiao**), led by Pr. Javaux, for welcoming me into the group. Their kindness, support, and advice were truly valuable, especially during the challenging periods.

Merci aux techniciens de l'ELI, **Sébastien François** et **Olivier Lebbe** pour leurs explications et précieux soutien technique tout au long de mon master.

Merci au bureau d'étude **ABV development**, à l'**UCLouvain**, ainsi qu'à l'**Abbaye d'Orval** pour leur confiance dans l'octroi d'aides financières destinée au travail de terrain. Cette expérience très enrichissante, autant d'un point de vue professionnel que personnel, n'aurait pas pu être possible sans leur aide.

Merci aussi aux professeurs **Marnik Vanclooster** et **Yannick Agnan** d'avoir accepté d'être les lecteurs de mon mémoire. Leur expertise sera très précieuse pour enrichir l'évaluation de ce travail.

Au-delà du cadre académique, je veux adresser un immense merci à **mes amis**, en particulier à **Isabella Plumier** qui a été mon pilier depuis le premier jour de notre arrivée dans cette faculté. Cette année encore, tu as été à mes côtés à chaque étape de ce mémoire même depuis l'autre côté de l'Atlantique.

Enfin, je dédie ma plus profonde reconnaissance à ma famille pour leur soutien indéfectible. À **mes parents**, **mon frère** et **mes sœurs**, rien de ce que j'ai accompli n'aurait été possible sans vous. Merci pour chaque appel, chaque mot d'encouragement, chaque geste pour m'aider à avancer dans les meilleures conditions. Une part de ce mémoire vous appartient pleinement.

Mon parcours universitaire a commencé avec tellement de doutes et un profond manque d'assurance. Ces années m'ont appris à reconnaître mes forces autant que mes fragilités et à croire peu à peu en ma légitimité. Les doutes n'ont jamais disparu, il me reste encore beaucoup à apprendre mais fidèle à moi-même je continuerai d'avancer malgré tout, avec curiosité, détermination et passion.

I. Table des matières

I.	Introduction	14
II.	État de l'art	16
1.	Bilan hydrique en forêt	16
i.	Précipitations et interception	17
ii.	Évapotranspiration	17
iii.	Ruissellement.....	18
2.	Impacts de la végétation sur les propriétés hydrauliques du sol.....	19
3.	Impacts de la végétation sur le bilan hydrique en forêt.....	20
i.	Précipitations et interception	20
ii.	Transpiration.....	21
iii.	Infiltration	22
iv.	Ruissellement.....	22
4.	Recharge de la nappe	23
III.	Objectifs et démarche	25
IV.	Matériels et méthodes	26
1.	Site d'étude	26
2.	Données météorologiques.....	28
i.	Stations météorologiques.....	28
ii.	Interception	31
iii.	Calcul de l'évapotranspiration de référence	32
iv.	Calcul de l'évapotranspiration potentielle	33
3.	Données pédologiques.....	34

i.	Potentiel matriciel.....	34
ii.	Teneur en eau	35
iii.	Échantillonnage	36
iv.	Densité apparente	37
v.	Courbe de rétention et de conductivité	38
4.	Données de végétation	39
5.	Modélisation	39
i.	Configuration générale du modèle	40
ii.	Paramètres	40
iii.	Conditions aux limites et initiales.....	41
iv.	Validation	41
V.	Résultats et discussion	43
1.	Propriétés hydrodynamiques	43
i.	Courbes de rétention.....	43
ii.	Courbes de conductivité.....	45
2.	Données météorologiques.....	48
3.	Résultat des modélisations	49
i.	Validation des simulations.....	49
ii.	Dynamique des flux du bilan hydrique	57
iii.	Stress hydrique	63
VI.	Perspectives	66
VII.	Conclusion	68
VIII.	Bibliographie	70

IX.	Annexes	76
	Annexe 1 : Equation de Penman-Monteith	76
	Annexe 2 : Corrélation entre les variables de la station météorologique de l'INMET et l'INPE	77
	Annexe 3 : Teneur en eau et potentiel matriciel mesurés sur R40, après filtrage	78
	Annexe 4 : Résultat de la complétion des séries temporelles de données météorologiques et de potentiel matriciel à 2m	79
	Annexe 5 : Évapotranspiration.....	82
	Annexe 7 : Paramètres des courbes de rétention pour les 3 campagnes	83

Tableau 1 : Variables météorologiques (radiation solaire, pression, vitesse du vent, température, humidité relative et précipitations) et leur pourcentage par méthode de complétion (données INPE, données INMET, interpolation linéaire, moyenne des valeurs horaires observées à la même heure les trois jours précédents et les trois jours suivants et moyenne interannuelle horaire)..... 31

*Tableau 2 : Résumé des échantillons collectés et des mesures (Hyprop, KSAT, coupelles poreuses et casseroles à haute pression, texture, densité apparente, porosité et C, N) réalisées lors des campagnes d'échantillonnage menées entre 2023 et 2025 sur la parcelle R40. Les chiffres indiquent le nombre de réplicats par profondeur et par type d'analyse. Les couleurs différencient l'origine des mesures : vert = campagne 2023 (B. Delvoie), violet = campagne 2024 (C. Dermauw), rose = campagne 2025 (M. Ounifi). Le symbole * appliqué à la colonne C,N renvoie à l'ensemble des mesures de carbone total, carbone organique, carbone inorganique et azote total..... 37*

Tableau 3 : Conductivités à saturation (K_{sat} , cm/jour) mesurée avec l'outil KSAT (Meter goup), selon la campagne d'échantillonnage. Les lignes en violet répertorient les données relatives à la campagne de 2024 (C. Dermauw) tandis que les lignes en rouge sont relatives à la campagne de 2025 (M. Ounifi). Les données dont la police est en gras et colorée sont les valeurs relatives aux courbes de conductivité étudiées dans ce mémoire et représentées sur la figure 9. 46

Tableau 4 : Statistiques (équation de régression et R^2) relatives aux corrélations, par profondeur (cm), entre les séries de données de potentiel matriciel (pF) mesurées (en x) et les séries de données de potentiel matriciel (pF) simulées (en y). Les lignes roses sont relatives au scénario sans compensation (A) et les lignes bleues, au scénario avec compensation (B). 52

Tableau 5 : Statistiques (équation de régression et R^2) relatives aux corrélations, par profondeur (cm), entre les séries de données de teneur en eau (%) mesurées (en x) et les séries de données de teneur en eau (%) simulées (en y). Les lignes roses sont relatives au scénario sans compensation (A) et les lignes bleues, au scénario avec compensation (B). ... 52

Figure 1 : Carte du Brésil (en gris) indiquant localisation de la Mata Atlantica (avant déforestation, divisée par états, en vert), de l'état de São Paulo (entouré de blanc), de la ville de São Francisco Xavier (pointée en rouge) ainsi que de la zone d'étude (encadrée en jaune).	14
Figure 2 : Schéma du bilan hydrique du sol en zone forestière, présentant ses différents flux : précipitations (P), transpiration (T), évaporation (E), ruissellement (R) et drainage (D).	16
Figure 3 : Carte indiquant la location de la forêt étudiée (R40, en rouge) ainsi que de la station météorologique de l'INPE (pointée en rose) d'où proviennent les données utilisées dans cette étude. La position relative de la ville de São Francisco Xavier par rapport à l'état de São Paulo et par rapport au Brésil est indiquée à gauche de la figure (Delvoie, 2023).	26
Figure 4 : Photos de la parcelle R40, capturées en février 2025	26
Figure 5 : Types de couvert végétaux de l'Etat de São Paulo, Brésil. Encadrée en violet, la zone d'étude, située en forêt ombrophile dense (Delvoie, 2023).	27
Figure 6 : Carte pédologique de l'Etat de São Paulo. Encadrée en violet, la zone d'étude, située sur des sols de type Ferralsol rouge-jaune (Delvoie, 2023).	28
Figure 7 : Photos de la station ATMOS de l'INPE située sur la zone d'étude, où l'ancienne station HOBO était également installée, capturées en février 2025.	29
Figure 8 : Courbes de rétention pour les trois campagnes : B. Delvoie (2023, en vert), C. Dermauw (2024, en violet) et B. Delvoie (2025, en rouge) obtenues pour les 7 profondeurs étudiées sur R40. Les points violets et rouges représentent les combinaisons de valeurs (θ , h) mesurées par le dispositif Hyprop pour chaque campagne et la courbe de la même couleur représente le fitting réalisé, sur chaque série de points mesurés, avec le logiciel Labros. Les points jaunes représentent les données de teneur en eau (%) en fonction du potentiel matriciel (pF) tous deux mesurés sur le terrain.	44
Figure 9 : Courbes de conductivité pour les trois campagnes : B. Delvoie (2023, en vert), C. Dermauw (2024, en violet) et B. Delvoie (2025, en rouge) obtenues pour les 7 profondeurs étudiées sur R40. Les points représentent les combinaisons de valeurs ($\log_{10}K$, h) mesurées par le dispositif Hyprop et la courbe de la même couleur représente le fitting réalisé avec le logiciel Labros.	47

Figure 10 : Graphiques de validation de la méthodologie de complétion pour l'humidité relative (HR), la température (T), la pression (P), la vitesse du vent (VV), la pluie et la radiation solaire (RS). Les nuages de points représentent les résultats de corrélations entre les séries temporelles de chaque variable météorologiques réelles (en x) en fonction des séries temporelles interpolées (en y) pour cette même variable. Les corrélations avec les données interpolées linéairement (lacune < 6h) sont représentées en bleu, avec celles interpolées par moyenne horaire sur $j \pm 3$ jours en vert et avec celles interpolées par moyenne interannuelle horaire (lacune > 48h) en bleu. La droite de régression (en rouge), son équation et le R^2 relatif à chaque corrélation sont représentés. Une droite 1 :1 apparait en pointillés noirs. 49

Figure 11: Corrélations, par profondeur, entre les séries de données de potentiel matriciel (pF) mesurées (en x) et les séries de données de potentiel matriciel (pF) simulées (en y). Les points roses représentent les corrélations avec les simulations pour le scénario sans compensation racinaire (avec un indice de 0) et les points bleus représentent le scénario avec compensation racinaire (avec un indice de 0,5). La droite de régression (en jaune), relative à chaque graphique et une droite 1:1 (en pointillés noirs) sont aussi représentées. 50

Figure 12 : Corrélations, par profondeur, entre les séries de données de teneur en eau relatives (θ_{rel} , en %) mesurées (en x) et les séries de données de teneur en eau (%) simulées (en y). Les points roses représentent les corrélations avec les simulations pour le scénario sans compensation racinaire (avec un indice de 0) et les points bleus représentent le scénario avec compensation racinaire (avec un indice de 0,5). La droite de régression (en jaune), relative à chaque graphique et une droite 1:1 (en pointillés noirs) sont aussi représentées. 51

Figure 13 : Séries temporelles des potentiels matriciels (pF, en y), à chaque profondeur étudiée, représentés en fonction du temps (en x) durant les 6 ans de simulation. La courbe rose représente le scénario sans compensation racinaire et la courbe bleue représente le scénario avec compensation racinaire (avec un indice ISH de 0,5). Les points jaunes représentent les données de potentiel matriciel (pF) mesurées sur le terrain. 54

Figure 14 : Séries temporelles des teneur en eau absolue (en cm^3/cm^3 , en y), à chaque profondeur étudiée, représentés en fonction du temps (en x) durant les 6 ans de simulation. La courbe rose représente le scénario sans compensation racinaire et la courbe bleue représente le scénario avec compensation racinaire (avec un indice ISH de 0,5). Les points jaunes représentent les données de teneur en eau absolue (en cm^3/cm^3) mesurées sur le terrain. 55

Figure 15 : Séries temporelles des potentiels matriciels (pF, en y), à chaque profondeur étudiée, représentés en fonction du temps (en x) focalisées sur un épisode de sécheresse

(l'année 2021). La courbe rose représente le scénario sans compensation racinaire et la courbe bleue représente le scénario avec compensation racinaire (avec un indice ISH de 0,5). Les points jaunes représentent les données de potentiel matriciel (pF) mesurées sur le terrain.56

Figure 16 : Séries temporelles des teneur en eau (% en y), à chaque profondeur étudiée, représentés en fonction du temps (en x) focalisées sur un épisode de sécheresse (l'année 2021). La courbe rose représente le scénario sans compensation racinaire et la courbe bleue représente le scénario avec compensation racinaire (avec un indice ISH de 0,5). Les points jaunes représentent les données de potentiel matriciel (pF) mesurées sur le terrain.57

Figure 17: Graphiques des flux cumulés mensuels (cm/mois) moyennés sur les 6 années de simulation (2019-2024) et évolution de la moyenne (sur 6 ans également) mensuelle du stock d'eau (cm). Le graphique a représenté le scénario sans compensation racinaire et le graphique b représente le scénario avec compensation racinaire (indice de 0,5). Les flux contribuant à l'augmentation du stock d'eau dans le sol sont positifs et ceux contribuant à sa diminution sont négatifs. Les bâtonnets roses représentent le drainage, les verts foncés l'évapotranspiration potentielle (ETp), les verts clairs l'évapotranspiration réelle (ETr), les bleus foncés la pluie, les bleus clair l'infiltration et les oranges les remontées capillaires. La ligne noire représente le stock d'eau dans le sol. Les barres d'erreur représentent les valeurs maximales et minimales de chaque flux. Le rectangle jaune représente la saison sèche..... 60

Figure 18 : Stress hydrique, représenté par le ratio ETr/ETp (en y) en fonction du temps (en x) durant les 6 années de simulation. La courbe bleue représente le scénario sans compensation et la courbe rouge représente le scénario avec compensation. Les rectangles jaunes représentent les saison sèches..... 64

I. Introduction

La forêt Atlantique brésilienne (Mata Atlântica, en portugais) est un des 25 hotspots de biodiversité mondiaux. Elle couvrait à l'origine environ 1,36 million de km², depuis la côte est du Brésil jusqu'au nord-est de l'Argentine et au sud-est du Paraguay (Cantidio et Al., 2019; Morellato et Al., 2000 ; cf. figure 1). Le paysage originel, caractérisé par une topographie complexe, une variabilité des sols et des gradients climatiques marqués, favorisait la formation d'une mosaïque de types forestiers (ombréphiles, semi-caducifoliées, pionnières, ...) abritant une diversité élevée d'espèces endémiques (Cantidio et Al., 2019; Morellato et Al., 2000).

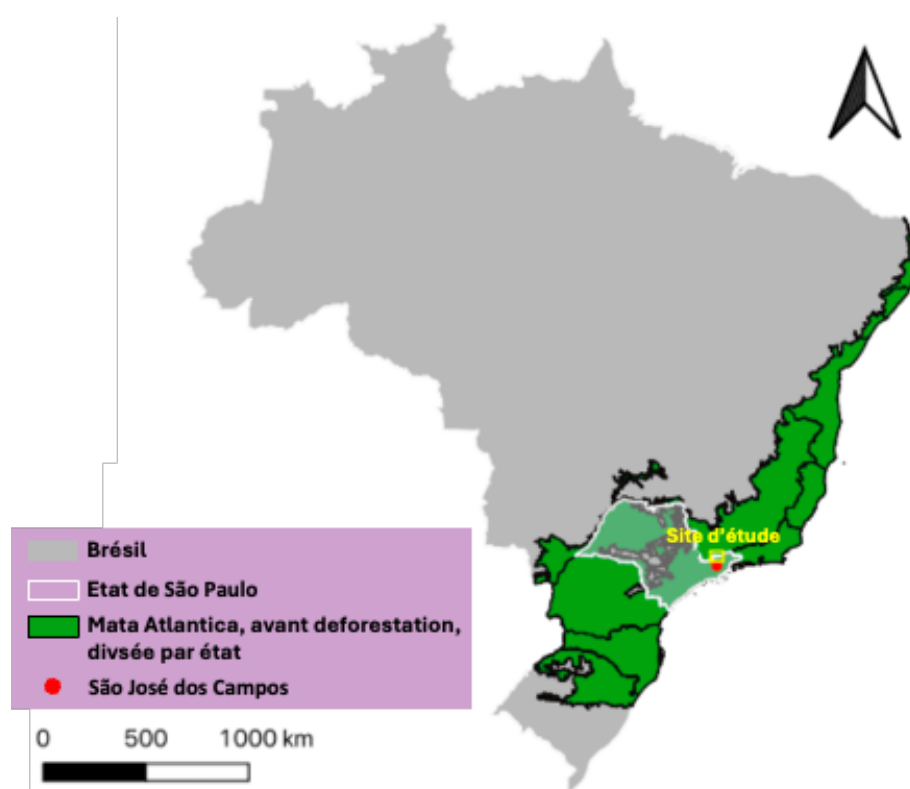


Figure 1 : Carte du Brésil (en gris) indiquant localisation de la Mata Atlantica (avant déforestation, divisée par états, en vert), de l'état de São Paulo (entouré de blanc), de la ville de São Francisco Xavier (pointée en rouge) ainsi que de la zone d'étude (encadrée en jaune).

Aujourd'hui, seulement 11 à 26 % de cette surface subsiste, fragmentée en zones de moins de 50 ha, souvent entourées de milieux agricoles ou urbains (Ribeiro et al., 2009, 2011). Cette perte drastique, survenue principalement au cours du XX^e siècle, a profondément modifié la dynamique hydrologique de la région. La déforestation influence en effet l'ensemble des flux du bilan hydrique, en modifiant l'infiltration, l'évapotranspiration, le ruissellement et la recharge, avec des impacts variables selon les caractéristiques propres au site étudié (Bruijnzeel, 2004 ; Nóbrega et al., 2019).

Comprendre ces dynamiques est essentiel non seulement pour préserver les ressources en eau mais aussi pour guider les stratégies de restauration écologique. C'est dans ce contexte que les initiatives de reforestation de la Mata Atlantica connaissent un regain d'intérêt. Le Pacte de Restauration de la Forêt Atlantique (AFRP), lancé en 2009 et réunissant plus de 160 organisations, vise à restaurer 15 millions d'hectares de terres dégradées d'ici 2050. Ce programme ambitionne à la fois de renforcer les services écosystémiques, d'accroître la couverture forestière et de préserver la biodiversité (Calmon et al., 2011).

Cependant, si la reforestation améliore généralement l'infiltration et la qualité des sols, elle ne garantit pas toujours une augmentation de la recharge des nappes. Dans certaines situations, l'évapotranspiration accrue peut même conduire à une baisse du niveau piézométrique (Oliveira et al., 2017 ; Nóbrega et al., 2019 ; Fiedler et al., 2022). Ces résultats contrastés rappellent que l'évaluation des dynamiques hydriques doit être menée localement pour éclairer les compromis entre restauration écologique et disponibilité en eau.

Ce mémoire s'inscrit dans la continuité de trois travaux de fin d'études antérieurs, réalisés sur le même site expérimental. Ils font partie d'un projet de recherche conjoint entre l'Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, Brésil) et l'Earth and Life Institute de l'Université catholique de Louvain (UCLouvain, Belgique). Cette collaboration, encadrée par les Professeurs Laura Borma (INPE) et Mathieu Javaux (UCLouvain), combine expertises en écologie, hydrologie et modélisation pour analyser le fonctionnement d'écosystèmes en restauration.

En se focalisant sur une parcelle forestière régénérée naturellement il y a environ 40 ans, ce mémoire vise à quantifier la dynamique des différents flux qui constituent le bilan hydrique en forêt. Il entend ainsi contribuer à une meilleure compréhension des compromis entre couverture végétale, fonctionnement hydrologique et gestion durable de l'eau, dans un contexte de restauration écologique tropicale.

II. État de l'art

1. Bilan hydrique en forêt

Le bilan hydrique d'un écosystème forestier correspond à la balance entre les entrées d'eau, principalement les précipitations et les sorties, qu'elles soient atmosphériques ou terrestres. Il permet de quantifier la manière dont l'eau reçue par une forêt se répartit entre l'évapotranspiration, l'infiltration dans le sol, le ruissellement en surface et le drainage profond (Bertin et al., 2016). La figure 2 est une schématisation de son fonctionnement.

Le bilan hydrique, sur une période donnée Δt est classiquement représenté par l'équation suivante :

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = (P - Ic) - (T + E + R + D) \quad (1)$$

Avec :

$\frac{\Delta S}{\Delta t}$: la variation du stock d'eau dans le sol, sur 200cm de profondeur et sur un intervalle de temps Δt $\left[\frac{mm}{h}\right]$

P : les précipitations totales $\left[\frac{mm}{h}\right]$

Ic : la portion de pluie interceptée par la canopée $\left[\frac{mm}{h}\right]$

T : la transpiration des plantes $\left[\frac{mm}{h}\right]$

E : l'évaporation directe du sol $\left[\frac{mm}{h}\right]$

R : le ruissellement de surface $\left[\frac{mm}{h}\right]$

D : le drainage profond (flux sortant positif) ou remontées capillaires (flux entrant négatif) $\left[\frac{mm}{h}\right]$

Le terme ΔS correspond à l'évolution de la réserve en eau du sol entre deux périodes. Lorsqu'il est positif, cela indique une recharge du sol. Lorsqu'il est négatif, le sol se dessèche.

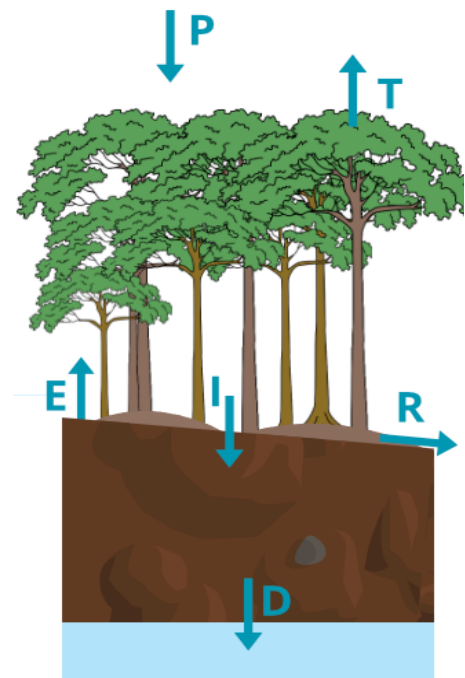


Figure 2 : Schéma du bilan hydrique du sol en zone forestière, présentant ses différents flux : précipitations (P), transpiration (T), évaporation (E), ruissellement (R) et drainage (D).

Chacun des flux de l'équation contribue à la dynamique sol-végétation-atmosphère. En les modulant, les forêts rendent d'importants services hydrologiques. Elles réduisent généralement le ruissellement de surface, augmentent la percolation dans le sol et favorisent ainsi la recharge des eaux souterraines. Dans la forêt atlantique du Brésil, connue pour son rôle hydrologique, le couvert végétal contribue notamment à maintenir les écoulements de base en saison sèche et à atténuer les crues en saison humide (C. Cau et Al., 2025).

i. Précipitations et interception

La quantification précise de la contribution de chacun de ces flux révèle d'une certaine complexité, notamment en ce qui concerne les précipitations. Une part significative de l'eau tombée est interceptée par la canopée et réévaporée dans l'atmosphère, sans jamais atteindre le sol. Cette interception constitue un flux évaporatoire particulier, souvent intégré dans l'évapotranspiration (Allen et al., 1998). Pourtant dans certains modèles, la fraction interceptée est soustraite des précipitations avant d'être implémentée dans le modèle. Elle n'est donc pas explicitement incluse dans les termes d'évaporation ou de transpiration, ce qui influe sur la répartition des flux au sein du bilan hydrique.

L'interception peut être estimée à partir de caractéristiques du couvert telles que l'indice foliaire (LAI) et la densité de la canopée. Elle dépend également des précipitations, qui l'augmentent lorsqu'elles sont faibles à modérées. A contrario, les événements très intenses saturent rapidement le couvert, réduisant l'interception relative (Sutanto et al., 2012).

ii. Évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) désigne la perte d'eau d'un écosystème par évaporation depuis le sol et le feuillage ainsi que par transpiration des plantes via les stomates. En milieu forestier, cette variable joue un rôle clé dans le bilan hydrique et constitue souvent la principale sortie atmosphérique d'eau. Dans les forêts naturelles denses, l'évaporation du sol nu reste généralement faible comparée à la transpiration (Sun et al., 2016). Par ailleurs, comme indiqué dans la section précédente, l'évaporation associée à l'interception d'une part de la pluie par la canopée peut être considérée comme une composante de l'évaporation mais elle sera ici directement déduite des précipitations brutes. Ainsi, dans ce mémoire, l'évapotranspiration fait uniquement référence aux pertes par transpiration des plantes.

L'ET de référence (ET_0) est classiquement estimée à partir de l'équation de Penman-Monteith recommandée par la FAO (Allen et al., 1998). Cette équation utilise les données météorologiques mesurées sur site (température de l'air, humidité relative, pression, rayonnement net et vitesse du vent à 2m). Elle fournit une estimation de l'évapotranspiration

d'une surface de référence, correspondant à une pelouse de 10cm de haut, bien irriguée et uniformément couverte.

Pour représenter l'évapotranspiration potentielle (ET_p) d'une parcelle, la méthode la plus courante consiste en l'application d'un coefficient cultural (K_c) à une série de valeurs d' ET_0 , tous deux propres au site étudié. Ce coefficient, supérieur à 1, reflète la surface foliaire et la capacité transpiratoire du couvert. Les études antérieures menées sur R40 ont montré que les valeurs de K_c varient selon l'approche employée. Parmentier (2024) a estimé l'évapotranspiration réelle (ET_r) par la méthode SenET, jusqu'ici appliquée surtout en agriculture mais validée ici en milieu forestier. Les coefficients culturaux (K_c) estimés étaient compris entre 1,2 et 1,7 ; confirmant une consommation d'eau supérieure à l' ET_0 . La même étude a également testé une approche par bilan de masse de l'eau dans le sol, intégrant variations de stock, drainage et capillarité. Cette approche a donné des résultats cohérents avec SenET mais avec une variabilité plus marquée et des incertitudes plus fortes, en particulier pour les zones non forestières. Enfin Delvoie (2023) a calibré les paramètres hydrodynamiques de la parcelle R40 par modélisation inverse, en ajustant les données de sortie d'Hydrus-1D aux données de terrain. Les scénarios les plus performants ont été obtenus avec des coefficients K_c compris entre 1,08 et 1,20.

Dans ce mémoire, le coefficient cultural a été estimé à partir des valeurs d' ET_r , fournies par la méthode Sen-ET appliquée par Parmentier (2024). Le contraste entre l' ET_r obtenue sur R40 et sur une prairie avoisinante a été exploité, en supposant cette prairie proche des conditions de la surface de référence décrites par la FAO (Allen et al., 1998 ; $K_c \cong 1$). Une régression linéaire contrainte à l'origine (intercept fixé à 0 conformément au modèle théorique) donnant un coefficient $K_c = 1,16$ ($R^2 = 0,99$). Cette estimation est interprétée comme un K_c en conditions non limitantes. Le nuage de points et la droite ajustée sont présentés en annexe.

iii. Ruissellement

Le ruissellement de surface correspond à la partie des précipitations qui n'est pas absorbée par le sol et s'écoule horizontalement. En milieu forestier, il est généralement faible, en particulier dans les forêts matures ou régénérées. Cela est dû à la présence d'une litière absorbante, d'une surface irrégulière, d'une porosité élevée et d'une capacité d'infiltration soutenue (Bruijnzeel, 2004 ; François et al., 2024).

Le ruissellement en forêt reste souvent peu mesurable localement (souvent diffus), ce qui rend sa quantification délicate à l'échelle de parcelles. Il est plus efficacement évalué à

l'échelle du bassin versant, par des bilans intégrés entre précipitations totales et écoulements de surface ou souterrains (François et al., 2024).

La majorité de l'eau s'infiltre, puis transite lentement par les couches profondes du sol avant de rejoindre les cours d'eau. Ce flux souterrain est difficile à quantifier directement, nécessitant le recours à des bilans hydriques intégrés à l'échelle du bassin versant. La complexité de la quantification de ce flux sera abordée dans la *section II.4*.

Le changement climatique complexifie d'autant plus la dynamique de l'eau dans le sol. Il modifie les schémas de précipitations, augmente la fréquence des événements extrêmes (sécheresses ou pluies intenses) et agit sur la température, affectant ainsi l'évapotranspiration. Ces facteurs influencent directement la recharge des nappes phréatiques et la disponibilité de l'eau dans les sols (Boulet et al., 2022), accentuant la nécessité de comprendre les dynamiques hydriques en forêt.

Par ailleurs, les modifications des propriétés du sol induites par la végétation se répercutent sur la partition des eaux de pluie entre évapotranspiration, ruissellement et recharge. En d'autres termes, qui modifie le sol, modifie le bilan hydrique. Ainsi, la restauration du couvert végétal, en améliorant la structure du sol, crée les conditions d'un bilan hydrique différent de celui d'un sol compacté de prairie ou de culture.

2. Impacts de la végétation sur les propriétés hydrauliques du sol

La présence d'une couverture végétale forestière influence fortement les propriétés physiques et hydrauliques des sols. Deux mécanismes principaux en sont responsables. D'une part, à court terme, la présence de racines ainsi que d'une faune abondante (vers, termites, insectes, etc.) contribuent à la formation de macropores. Ceux-ci favorisent la formation de voies d'écoulement préférentielles, ce qui augmente l'infiltration et la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}). D'autre part, à plus long terme, la forêt enrichit le sol en matière organique par l'accumulation de litière, le renouvellement racinaire et l'exsudation de composés carbonnés. Cela stimule l'activité microbienne, favorise la formation d'agrégats stables et améliore la porosité structurale. Ces processus croissent la capacité de rétention en eau du sol, sa stabilité et son aération, tout en réduisant sa densité apparente (Fisher, 1995 ; Deuchars et al., 2006).

Les sols forestiers tropicaux peuvent cependant présenter, en période sèche, une hydrophobie superficielle temporaire induite par certains composés organiques de la litière. Celle-ci peut ralentir l'infiltration des premières pluies. Cependant cet effet s'atténue rapidement lors de la

ré-humectation, sans remettre en cause le potentiel d'infiltration élevé globalement observé (Lozano-Baez, 2020 ; Doerr et al., 2000).

Plusieurs travaux menés dans la forêt atlantique illustrent ces mécanismes. Une première étude a montré que les K_{sat} mesurées sous forêts secondaires pouvaient être jusqu'à vingt fois supérieures à celles de sols de pâturage voisins. Ces différences ont principalement été attribuées à une densité racinaire plus importante, à une faune du sol plus active et à une plus grande quantité de matière organique, qui favorisent l'occurrence de macropores interconnectés (Lozano-Baez, 2020).

Dans un mémoire réalisé par Charlotte Dermauw (2024), portant sur le même site d'étude sur lequel s'axe cette étude, les résultats confirment ces tendances. La densité apparente γ est relativement faible, avec des valeurs comprises entre 0,9 et 1,2 g/cm³, traduisant une structure meuble et bien aérée. Cette faible densité s'accompagne d'une porosité totale élevée, estimée environ entre 55 et 65 %, favorable à la circulation de l'eau et à l'activité biologique. Les horizons de surface (0–10 cm) présentent en outre une conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) moyenne d'environ 800 cm/h, témoignant d'une forte capacité d'infiltration. Cette performance est renforcée par une teneur en matière organique de 5 % dans les premiers centimètres du sol, qui contribue à la stabilité structurale et à la rétention en eau.

Ces propriétés traduisent un sol bien structuré, riche en matière organique et biologiquement actif, typique d'une forêt régénérée de plusieurs décennies. Elles confirment que la végétation a permis une amélioration significative de la perméabilité et du stockage en eau du sol par rapport à des usages agricoles antérieurs.

Ces caractéristiques influencent directement le bilan hydrique de l'écosystème, ce qui sera analysé plus en détails dans la section suivante.

3. Impacts de la végétation sur le bilan hydrique en forêt

L'effet net de la végétation sur le bilan hydrique d'un milieu forestier résulte d'un équilibre entre des processus parfois opposés.

i. Précipitations et interception

Comme abordé précédemment, dans la *section II.1.i*, l'interception représente une fraction non-négligeable des précipitations en milieu forestier.

Dans la forêt Atlantique, l'interception annuelle représente en moyenne environ 12,3% des précipitations totales (Junior et Al., 2019). Cette étude peut cependant varier

considérablement. Des études menées dans d'autres forêts tropicales comparables rapportent des pertes par interception comprises entre environ 12 et 40% , en fonction de la saison (sèche ou humide), de la structure du peuplement (primaire ou secondaire), du degré de fermeture de la canopée, de la composition floristique et du type de sol (Cuartas et al., 2007 ; Oliveira et al., 2011).

ii. Transpiration

La végétation forestière augmente les pertes d'eau par transpiration. La densité du couvert, la profondeur d'enracinement et la surface foliaire contribuent à ce flux.

Dans les forêts tropicales, la transpiration constitue la composante dominante de l'évapotranspiration (Sun et Al., 2016). Elle est étroitement liée à la physiologie des espèces et à leur capacité à accéder à des réserves en eau profondes. Certaines essences peuvent ainsi maintenir une transpiration significative même en saison sèche (Meinzer et al., 1999).

En effet, les espèces possédant des systèmes racinaires plus profonds ont accès à des volumes de sol plus grands, leur fournissant plus de ressources pour la transpiration. Par exemple, une étude dans le sud-est du Brésil a observé qu'après la conversion d'un pâturage par une plantation d'Eucalyptus, la recharge annuelle estimée a chuté presque de moitié, passant d'environ 407 mm/an (27 % des précipitations) à 194 mm (13 % des précipitations). Cette diminution s'est accompagnée d'un abaissement significatif du niveau piézométrique (environ 100 mm/an) dans la zone étudiée (Oliveira et al., 2017). Ces résultats illustrent comment une biomasse végétale accrue peut réduire la fraction d'eau drainée, particulièrement en conditions non limitantes en eau.

La physiologie des espèces peut également influencer leur faculté à transpirer. En saison sèche ou sous stress hydrique, de nombreuses essences forestières adoptent des stratégies d'économie d'eau. Dans la forêt Atlantique, jusqu'à 50 % des arbres peuvent être partiellement ou totalement caducs en hiver, réduisant leur surface transpirante et mobilisant l'eau stockée en profondeur (Cau et al., 2025).

Un autre mécanisme important est la compensation racinaire, qui permet aux plantes de redistribuer spatialement leur prélèvement en eau. Lorsque certaines zones du sol s'assèchent, l'absorption d'eau est réduite localement mais peut être compensée par une extraction accrue dans les horizons plus humides. Ce phénomène a été formalisé dans des modèles de prise d'eau racinaire tels que celui de Feddes (Feddes et Al., 1978) et implémenté dans HYDRUS-1D (Šimůnek et Al., 2009).

Une expérimentation en rhizotron sur blé, associée à des simulations HYDRUS (Cai et Al., 2018), a montré que la prise en compte de la compensation modifiait peu la dynamique globale de teneur en eau mais transformait significativement la répartition verticale du prélèvement. Le modèle sans compensation concentrait l'absorption dans les couches superficielles jusqu'à ce qu'elles soient presque totalement asséchées, laissant les horizons plus profonds relativement peu exploités. En revanche, le modèle avec compensation déclenchait plus tôt l'exploitation des couches profondes et maintenait un flux d'absorption plus homogène dans le profil, ce qui retardait le déficit hydrique global mais accentuait l'assèchement des horizons inférieurs.

Ces résultats mettent en évidence l'importance d'intégrer la compensation racinaire pour décrire de manière réaliste la stratégie adaptative des végétaux en conditions de sécheresse. Dans les forêts tropicales, où de nombreuses espèces disposent de systèmes racinaires profonds et plastiques, ce mécanisme peut expliquer à la fois la résilience de la transpiration en saison sèche et la réduction concomitante de la recharge ou du drainage profond (Markewitz et Al., 2010 ; Kühnhammer et Al., 2023).

iii. Infiltration

D'autre part, la présence d'une forêt peut favoriser les écoulements souterrains à long terme en améliorant l'infiltration. C'est le principe du compromis infiltration–évapotranspiration. Comme expliqué précédemment, la végétation influe sur la structure du sol en favorisant une infiltration rapide des pluies, un stockage efficace de l'eau dans la zone racinaire, et en limitant le ruissellement de surface.

Une étude menée par Krishnaswamy et al. (2013) a montré que malgré une évapotranspiration potentiellement plus forte, un bassin versant couvert de forêt naturelle pouvait pourtant présenter une recharge supérieure à celle de bassins dégradés, en raison d'une infiltration nettement améliorée par le couvert forestier. Concrètement, environ 50–60 % des pluies saisonnières contribuaient à la recharge sous forêt intacte, contre seulement 35 % environ dans des zones à végétation clairsemée.

iv. Ruissellement

La végétation forestière, en particulier lorsqu'elle est dense et mature, tend à réduire significativement le ruissellement de surface. Cette réduction s'explique par plusieurs mécanismes. D'une part, la couverture végétale intercepte les gouttes de pluie, réduisant leur énergie cinétique et limitant ainsi l'érosion et le compactage superficiel du sol. D'autre part, la présence de litière, la structure irrégulière du sol, la forte porosité et la capacité d'infiltration

élevée contribuent à l'absorption rapide de l'eau, empêchant son écoulement en surface (Bruijnzeel, 2004).

Les processus de régénération forestière renforcent également cette capacité. Dans la forêt atlantique, plusieurs études ont quantifié la réduction du ruissellement après reforestation. Des études montrent que le ruissellement représente en moyenne moins de 10% des précipitations annuelles dans une forêt de stade avancé, c'est-à-dire avec canopée dense, d'une hauteur maximale d'environ 18 mètres, comptant 28 espèces et une surface (à la base du peuplement) de 34,7 m²/ha. Cette réduction rapide est due à la reformation d'un horizon organique et à la restauration progressive de la porosité du sol (Nicoletti et al., 2023). Cependant, cette valeur peut encore être considérée comme relativement élevée. Dans d'autres forêts denses ou matures des coefficients de ruissellement de l'ordre de 0,1 à 0,5% sont observés (Anache et al., 2019).

Toutefois, la réduction du ruissellement n'est pas systématique. Dans des contextes de pente forte, de sols peu structurés ou encore de pluies très intenses, une part du ruissellement peut persister, même sous couverture forestière. L'influence de la végétation sur ce flux dépend donc également des caractéristiques topographiques, pédologiques et climatiques du site (Muñoz-Villers et al., 2013 ; François et al., 2024).

Ces exemples soulignent que l'impact de la végétation sur le bilan hydrique n'est pas univoque. S'il est vrai que la conversion de milieux herbacés en forêts tend en général à réduire le ruissellement total et la recharge brute du fait d'une ET plus forte, les forêts peuvent en parallèle améliorer la stabilité hydrologique en favorisant l'infiltration et le stockage souterrain de l'eau. L'effet net dépend donc du climat et du type de sol.

4. Recharge de la nappe

La recharge des nappes phréatiques correspond à l'eau qui atteint la nappe après avoir franchi la zone vadose. Elle peut être généralement très variable dans le temps, notamment dans les environnements où elle dépend d'événements de pluie intenses et peu fréquents (De Vries & Simmers, 2002).

Différentes méthodes existent pour quantifier cette recharge, incluant les mesures directes (lysimètres, suivi piézométrique), les approches indirectes (utilisation d'isotopiques) ainsi que la modélisation numérique (Scanlon et al., 2002 ; Scanlon et al., 2013). Les traceurs environnementaux peuvent fournir des estimations locales fines. Ils sont cependant sensibles

aux processus d'écoulement préférentiel, qui peuvent biaiser les résultats (De Vries & Simmers, 2002). En revanche, les bilans hydriques permettent une estimation intégrée à l'échelle de la parcelle ou du bassin versant, à partir de la différence entre les entrées (précipitations) et les sorties (évapotranspiration, ruissellement, interception) (Scanlon et al., 2002). Cette approche est particulièrement adaptée lorsque l'objectif est d'analyser la recharge en lien avec des dynamiques d'usage des sols et de couverture végétale (Nóbrega et al., 2019).

Dans le contexte de la forêt atlantique brésilienne, les données sur la recharge sont encore limitées, notamment dans les zones de régénération passive. Les rares études disponibles fournissent des valeurs de recharge dans des milieux tropicaux semi-naturels proches. Dans le Cerrado, par exemple, la recharge annuelle estimée varie entre 315 mm et 363 mm selon la densité de végétation, représentant de 25,8 % à 29,7 % des précipitations annuelles. Ces résultats montrent une diminution progressive de la recharge avec l'augmentation de la densité végétale, liée à une évapotranspiration plus élevée et à une interception accrue (Oliveira et al., 2017). De même, dans la forêt atlantique, il a été observé que la restauration forestière améliore l'infiltration mais ne garantit pas une augmentation de la recharge, car l'évapotranspiration peut compenser cette infiltration accrue (Nóbrega et al., 2019).

À l'échelle du bassin versant, les interactions entre les nappes peu profondes et les cours d'eau montrent également une forte variabilité selon le couvert végétal, la topographie, la texture du sol et la distance à la rivière (Fiedler et al., 2022). Des déclins de niveaux piézométriques ont été observés dans certaines zones en forêt ciliaire, possiblement dus à une réduction de l'infiltration ou à des prélèvements (Fiedler et al., 2022). Cela souligne la nécessité de combiner observations de terrain et modélisation pour interpréter les tendances à long terme. Les modèles conceptuels comme PIRFICT permettent de caractériser la réponse des niveaux phréatiques à la pluie, mais restent dépendants des conditions locales (Fiedler et al., 2022).

L'ensemble des travaux souligne que la dynamique de la recharge est fortement contextuelle et que sa quantification doit être menée localement pour être significative (Scanlon et al., 2013 ; Nóbrega et al., 2019). Dans cette étude, le choix d'une approche par modélisation physique des flux s'impose donc comme une méthode intégrée adaptée pour évaluer l'impact de la régénération forestière sur la recharge, en tenant compte de l'évapotranspiration réelle et de la prise d'eau racinaire. Cette évaluation vise à déterminer si, dans un contexte de reforestation passive de la forêt atlantique, les conditions hydrologiques permettent de soutenir durablement les fonctions écosystémiques associées à l'aquifère peu profond.

III. Objectifs et démarche

L'objectif général de ce mémoire est d'**analyser la dynamique des flux du bilan hydrique et les propriétés hydrodynamiques d'une parcelle forestière tropicale régénérée, située dans la Mata Atlantica à São Francisco Xavier, au Brésil**. La question centrale porte sur la manière dont la reforestation influence la disponibilité en eau dans le sol et la recharge souterraine, dans un contexte où la déforestation passée a fortement perturbé les cycles hydrologiques et où les programmes de restauration cherchent à concilier biodiversité et gestion durable de l'eau.

Afin de répondre à cette problématique, plusieurs sous-objectifs ont été définis, en lien direct avec les lacunes identifiées dans la littérature et les travaux antérieurs réalisés sur la même parcelle (Delvoie, 2023 ; Dermauw, 2024 ; Parmentier, 2024) :

1. Caractériser les propriétés hydrodynamiques du sol (courbes de rétention, conductivité hydraulique) à partir d'échantillons prélevés à différentes profondeurs et analysés en laboratoire (dispositifs Hyprop et KSAT, de Meter group). Le but est de construire des courbes robustes, nécessaires au paramétrage du modèle Hydrus-1D. Leur cohérence sera évaluée par comparaison avec les résultats des campagnes précédentes.
2. Intégrer ces données dans une modélisation sur Hydrus-1D, afin de simuler la dynamique hydrique du profil sur une période de six années. Deux scénarios de prise d'eau racinaire sont considérés : un scénario sans compensation racinaire et un scénario avec.
3. Évaluer la performance des simulations en confrontant les sorties du modèle (teneur en eau et potentiels matriciels) aux observations in situ issues des capteurs installés entre 10 et 200 cm sur la parcelle d'étude. Cette étape a pour but de juger de la capacité du modèle à reproduire la dynamique hydrique observée et de savoir si la contribution de la compensation tend à améliorer la représentativité du modèle.
4. Analyser la dynamique saisonnière du bilan hydrique (infiltration, drainage profond, remontées capillaires, évapotranspiration, stock d'eau), en distinguant les flux dominants selon les saisons sèches et humides.
5. Conclure de l'effet de la compensation racinaire sur la transpiration réelle, le stress hydrique et la répartition verticale des prélèvements en eau.

IV. Matériels et méthodes

1. Site d'étude

L'INPE a installé l'un de ses sites de recherche en périphérie de São Francisco Xavier, au nord de l'état de São Paulo (c.f. figure 3)

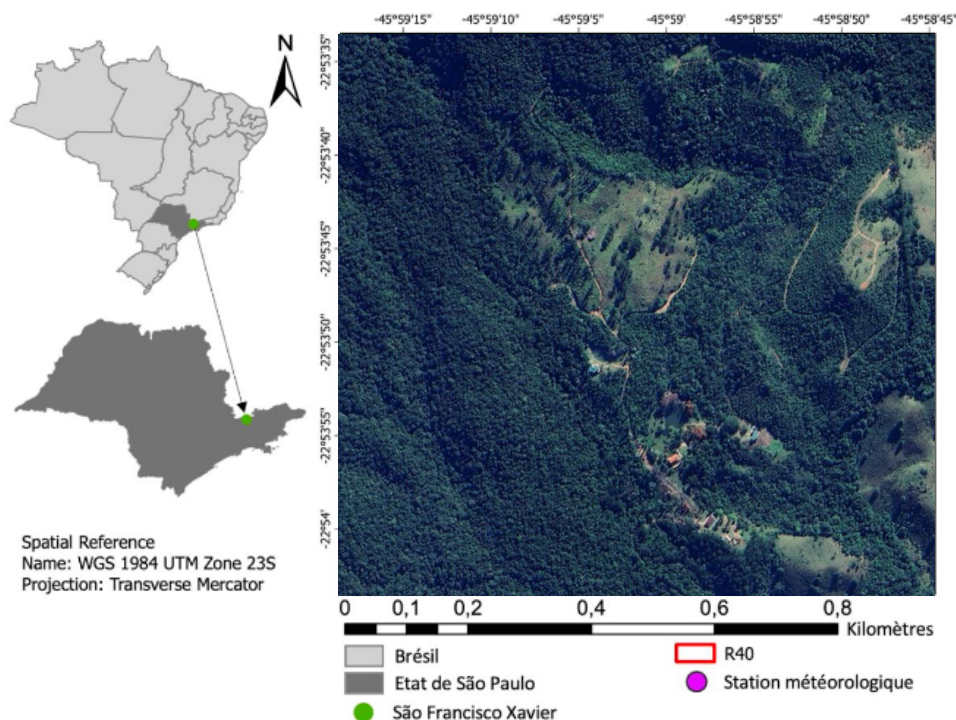


Figure 3 : Carte indiquant la location de la forêt étudiée (R40, en rouge) ainsi que de la station météorologique de l'INPE (pointée en rose) d'où proviennent les données utilisées dans cette étude. La position relative de la ville de São Francisco Xavier par rapport à l'état de São Paulo et par rapport au Brésil est indiquée à gauche de la figure (Delvoie, 2023)

La parcelle, de ce site, qui fait l'objet de cette étude est désignée sous le nom R40. Elle s'étend sur une superficie de 370 m² et est implantée sur un terrain à forte pente (environ 15 %) (c.f. figure 4).



Figure 4 : Photos de la parcelle R40, capturées en février 2025

Il y a plusieurs siècles, R40 appartenait au biome de la Mata Atlantica. A partir du XIX^{ème} siècle, l'expansion des plantations de café a profondément transformé le paysage, entraînant la déforestation au profit de zones agricoles. L'appauvrissement progressif des sols a conduit à l'abandon des plantations puis à leur reconversion en pâturages. A la fin du XX^{ème} siècle, l'exode rural a entraîné un nouvel abandon de ces terres. Ce processus a permis la régénération naturelle de la végétation sur cette parcelle, depuis maintenant 40 ans environ. Les espèces végétales dominantes identifiées sont *Alchornea glandulosa* Poepp. et *Psychotria vellosiana* Benth., deux espèces natives et respectivement non-endémique et endémique (Bandoria, 2020). Ces deux espèces dominantes sont caractéristiques du type de forêt ici étudié, c'est-à-dire une forêt ombrophile dense (c.f. figure 5). Elles sont toutes les deux décrites comme des espèces persistantes, c'est-à-dire qu'elles ne perdent pas leurs feuilles au cours de l'année (Carvalho, 2003).

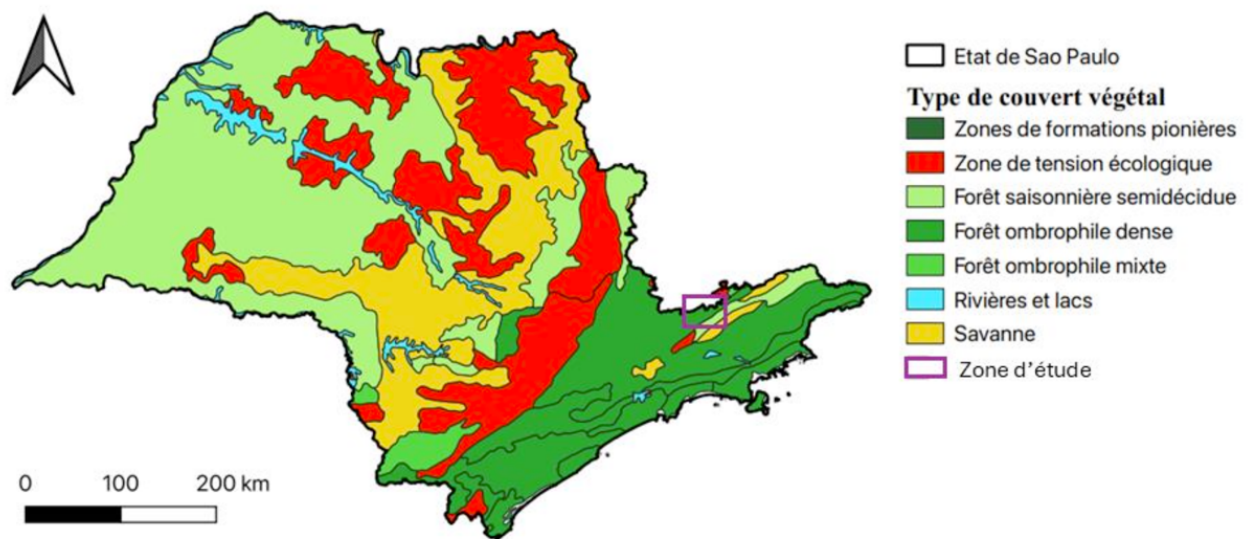


Figure 5 : Types de couvert végétaux de l'Etat de São Paulo, Brésil. Encadrée en violet, la zone d'étude, située en forêt ombrophile dense (Delvoie, 2023).

Les sols de la parcelle sont classés comme Ferralsols (c.f. carte des types de couverture). Ces sols tropicaux profondément altérés se caractérisent par une forte teneur en oxydes de fer et d'aluminium et une argile dominée par la kaolinite. Leur microstructure leur confère une bonne porosité, une forte perméabilité et un drainage interne efficace. Cependant, malgré leur profondeur, leur capacité de rétention utile reste limitée. Une grande part de l'eau est retenue à des potentiels trop bas pour être accessible aux plantes, ce qui réduit l'eau disponible à environ 10 mm par tranche de 10 cm de sol. Ces propriétés expliquent pourquoi les Ferralsols peuvent paraître bien drainés mais devenir rapidement contraignants en période sèche (FAO, 2001).

Les résultats des campagnes pédologiques antérieures menées sur R40 confirment que le sol présente les caractéristiques typiques de ce type pédologique. Delvoie (2023) met en avant, dans son étude, le rapport limon/argile inférieur à 0,2 entre 1,2 m et 2,2 m de profondeur. Il ajoute que cela traduit un état d'altération avancée. Il commente également la teinte rougeâtre observée, correspondant à l'abondance d'oxydes de fer, caractéristique des Ferralsols.

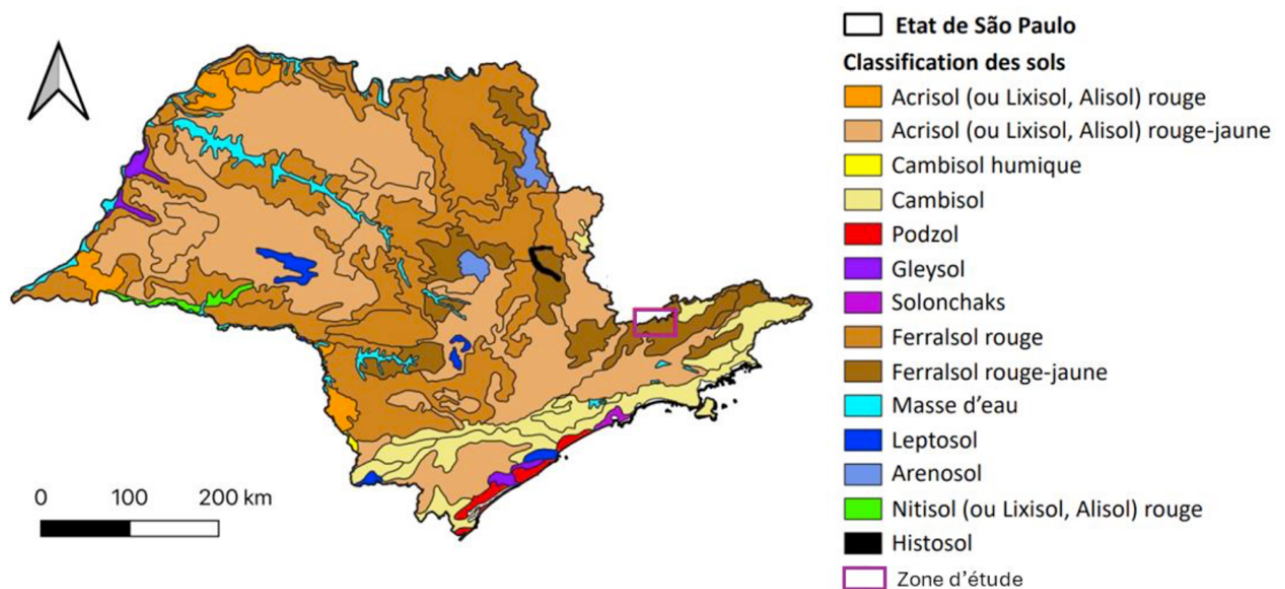


Figure 6 : Carte pédologique de l'Etat de São Paulo. Encadrée en violet, la zone d'étude, située sur des sols de type Ferralsol rouge-jaune (Delvoie, 2023).

2. Données météorologiques

i. Stations météorologiques

Les données météorologiques utilisées dans cette étude proviennent principalement de deux stations, s'étant succédées, sur le site d'étude de l'INPE. Leur position est distante d'environ 620m de la parcelle R40 et a pour coordonnées géographiques : 22°54'00.0"S 45°59'00.0"O. La première station est une HOBO Data Logger. Elle a été active du 23 janvier 2019 à 15h00 jusqu'au 15 septembre 2021 à 13h00. Elle enregistrait des données à une fréquence horaire pour les variables suivantes : précipitations [mm], température de l'air [°C], température du point de rosée [°C], humidité relative [%], vitesse moyenne du vent [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], vitesse des rafales [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], altitude de la base des nuages [m], rayonnement solaire global [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] et pression atmosphérique [mbar]. La deuxième station correspond à un modèle ATMOS 41 (première génération, cf. figure 7). Elle a été installée plus tard, au même endroit que la première. Elle a permis de récolter des données s'étalant du 10 janvier 2023 à 11h30 jusqu'au 19 décembre 2024. ATMOS enregistre les mêmes variables que HOBO, avec une résolution temporelle de 15 minutes.



Figure 7 : Photos de la station ATMOS de l'INPE située sur la zone d'étude, où l'ancienne station HOBO était également installée, capturées en février 2025.

L'ensemble des données collectées par ces deux stations nécessitait un pas de temps uniforme pour la suite de l'étude. Un pas horaire a donc été imposé. Pour les précipitations, les volumes mesurés à un pas de temps plus fin (15mn) ont été sommés en horaire, exprimant ainsi un flux moyen horaire de précipitations [mm/h]. Pour les autres variables (température, humidité relative, pression, rayonnement, vitesse du vent), une moyenne horaire a été calculée à partir des valeurs disponibles.

Les séries résultantes couvrent une période d'environ 5 ans et présentent un certain nombre de données manquantes. Afin de les compléter, les données d'une troisième station météorologique ont été intégrées. Il s'agit d'une station appartenant à l'Institut National de Météorologie (INMET). Elle est située à Monte Verde, une localité distante d'environ 6,5 kilomètres du site d'étude. Cette station enregistre les mêmes variables météorologiques que les stations de l'INPE, avec une résolution horaire.

Cependant, les données issues de la station de Monte Verde ne pouvaient pas être directement utilisées en raison d'un décalage horaire dans l'horodatage (lié à un fuseau horaire différent). Ce décalage a pu être mit en avant en comparant les séries de rayonnement solaire entre les données provenant de la station AMTOS et de la station de l'INMET. Une correction a

donc été appliquée à l'ensemble des séries temporelles issues de l'INMET, en les avançant de 4 heures.

Par ailleurs, une analyse comparative a été menée sur la période 2023-2024, durant laquelle les stations ATMOS et celle de Monte Verde fonctionnaient simultanément. Cette comparaison a permis de mettre en évidence des écarts systématiques dans les valeurs mesurées, notamment dus aux différences d'altitude entre les stations. Afin d'harmoniser les séries de données, une relation linéaire a été établie entre les deux stations, pour chaque variable. Il est important de noter que pour les précipitations et le rayonnement solaire, il a été jugé pertinent d'imposer une droite passant par l'origine (0,0). Cela a permis de garantir que les valeurs nulles soient conservées après calibration.

Les données provenant de la station de l'INPE ont donc été corrigées puis utilisées pour combler des lacunes restantes dans les séries issues des stations HOBO et ATMOS. Cependant, certains manques persistaient lors de périodes où aucune des trois stations ne disposait de données enregistrées. Une méthodologie spécifique a donc été mise en place afin de combler ces données manquantes de manière rigoureuse et cohérente :

1. Pour toute absence de données, sur une durée inférieure ou égale à 6 heures: une interpolation linéaire a été appliquée entre les points adjacents valides.
2. Pour toute absence de données, sur une durée entre 6 heures et 48 heures exclus: les valeurs manquantes ont été comblées en calculant, pour chaque heure concernée, la moyenne des valeurs horaires observées à la même heure les trois jours précédents et les trois jours suivants.
3. Pour toute absence de données, d'une durée supérieure à 48 heures : les valeurs manquantes ont été estimées à partir d'une moyenne interannuelle horaire. Plus précisément, pour chaque heure manquante, la valeur imputée correspond à la moyenne des valeurs mesurées à la même date et à la même heure entre 2019 et 2024, en excluant l'année où la donnée est absente.

Le tableau 1 ci-dessous, présente un récapitulatif de la proportion de données de chaque variables complétée par chaque méthode utilisée.

Tableau 1 : Variables météorologiques (radiation solaire, pression, vitesse du vent, température, humidité relative et précipitations) et leur pourcentage par méthode de complétion (données INPE, données INMET, interpolation linéaire, moyenne des valeurs horaires observées à la même heure les trois jours précédents et les trois jours suivants et moyenne interannuelle horaire).

	Radiation solaire	Pression	Vitesse du vent	Température	Humidité relative	Précipitations
Méthode de complétion						
<i>Données de l'INPE</i>	75,72 %	75,72 %	75,51 %	75,72 %	75,72 %	99,50 %
<i>Données de l'INMET</i>	21,42 %	23,74 %	23,96 %	23,74 %	21,91 %	0,30 %
<i>Interpolation linéaire</i>	0,14 %	0,34 %	0,34 %	0,34 %	0,34 %	0,1 %
<i>Moyenne horaire sur j +/- 3</i>	0,20 %	0,20 %	0,20 %	0,20 %	0,20 %	0,10 %
<i>Moyenne horaire sur 5 ans</i>	2,53 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	1,84 %	0,00 %

La validation de la procédure de complétion a été réalisée sur une portion complète de série de données (combinaison de données provenant des stations INPE et IMET). Des lacunes, représentatives des trois méthodes utilisées, y ont artificiellement été insérées : 1 interruption longue (720 h), 18 interruptions moyennes (40 h) et 144 interruptions courtes (5 h). La méthodologie de complétion y a ensuite été appliquée. Les valeurs complétées ont finalement été comparées aux valeurs initialement présentes afin d'évaluer la performance de la procédure.

ii. Interception

L'interception du couvert forestier a été estimée à l'aide de la formule (2), décrite dans le manuel d'utilisation du programme Hydrus-1D (Šimůnek et Al., 2013). Cette approche permet de représenter l'interception comme une fonction non linéaire de l'intensité des précipitations (P) et de la structure du couvert forestier via l'indice foliaire (LAI) :

$$I = a \cdot LAI \cdot \left(1 - \frac{1}{1+bP}\right) \quad (2)$$

Avec :

I : l'interception journalière $\left[\frac{mm}{h}\right]$

LAI : l'indice foliaire $[-]$

P : les précipitations $\left[\frac{mm}{h}\right]$

a, b : des constantes empiriques $[-]$

Cette formulation a été privilégiée à l'usage d'un coefficient fixe, car elle permet de moduler dynamiquement l'interception selon la variabilité temporelle des événements pluvieux.

Afin de compenser l'absence de mesures directes sur la parcelle R40 pour les paramètres a , b et LAI, différentes combinaisons de valeurs tirées de la littérature ont été testées. Les plages de valeurs explorées sont les suivantes :

- $a \in \{0,20 ; 0,25 ; 0,30\}$
- $b \in \{0,25 ; 0,50 ; 0,75\}$
- $LAI \in \{4,5 ; 5,5\}$

Le choix des valeurs testées pour le paramètre « a » repose sur la valeur de référence du manuel Hydrus, qui recommande 0,25 pour des couverts herbacés. Dans le cas de R40, un couvert forestier dense mais secondaire, un intervalle situé autour de cette valeur a donc été testé. Concernant b , paramètre décrivant la fraction de couverture de la surface forestière, des valeurs intermédiaires entre 0 et 1 ont été choisies (Šimůnek et al., 2013).

En l'absence de séries temporelles robustes de LAI pour cette zone d'étude, un indice foliaire moyen, représentant l'état moyen de la canopée, a été estimé à partir des plages typiques observées dans la forêt atlantique secondaire. Cet LAI constant est ici calibré de manière à reproduire l'interception moyenne annuelle observée localement, ce qui garantit la cohérence du bilan hydrique à l'échelle annuelle tout en reconnaissant ses limites pour les variations intra-saisonnières. Ainsi une plage de valeurs basée sur une étude réalisée sur des forêts humides, denses et secondaires dans l'état de Santa Catarina, environ 500km au sud de São Paulo a été choisie. Cette étude présente des LAI compris entre 4,5 et 5,5 (Pfeifer et al., 2021).

La combinaison retenue pour le modèle est : $a = 0,20$, $b = 0,25$ et $LAI = 4,5$. Cette configuration permet de reproduire une interception moyenne annuelle de 12,15 % des précipitations totales, valeur la plus proche de celle mesurée sur des parcelles similaires dans la région (Junior et al., 2019).

iii. Calcul de l'évapotranspiration de référence

L'évapotranspiration de référence (ET_0) a été calculée à partir des données météorologiques collectées par les stations présentées précédemment. Cette grandeur correspond à l'évapotranspiration théorique d'une surface végétale de référence, définie par

la FAO comme une prairie uniformément tondue, sans stress hydrique, d'une hauteur de 12cm, avec une résistance de surface de $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ et un albédo de 0,23 (Allen et al., 1998).

Le calcul a été réalisé à l'aide de la formulation proposée par la FAO dans le cadre du bulletin n°56 (Allen et al., 1998), basée sur l'équation de Penman-Monteith et présentée ci-dessous (équation 3). Cette approche combine les effets énergétiques (via le bilan radiatif et le flux de chaleur du sol) et les effets aérodynamiques (liés au vent et à l'humidité de l'air), permettant une modélisation fine à pas de temps horaire.

Les paramètres météorologiques utilisés sont : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, la pression atmosphérique et le rayonnement solaire global. Le rayonnement net et la pression de vapeur saturante ont été dérivés à partir de ces variables selon les formules standards. L'ensemble des termes nécessaires à l'évaluation de l' ET_0 a été calculé à une résolution horaire afin de mieux capter la variabilité diurne de cette variable.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3)$$

Le détail du calcul de cette équation se trouve en annexe 1.

iv. Calcul de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ET_p) correspond à la quantité d'eau que la végétation peut transférer vers l'atmosphère en l'absence de contrainte hydrique. Elle dépend à la fois des conditions météorologiques et du type de couvert végétal. Dans cette étude, l' ET_p de la parcelle d'étude a été estimée à partir de l'évapotranspiration de référence horaire (ET_0), calculée selon l'équation de Penman-Monteith, en y appliquant un coefficient de culture (K_c).

Comme expliqué précédemment dans la *section II.1.ii*, les travaux de L. Parmentier ont permis de réaliser une régression linéaire entre l'ET estimée sur la forêt et celle estimée sur la prairie. Un coefficient K_c de 1,16 a ainsi été obtenu, avec un coefficient de détermination R^2 de 0,99.

Ainsi l' ET_p de la parcelle d'étude a été déterminée par l'équation 4, présentée ci-dessous :

$$ET_p = ET_0 \cdot 1,1647 \quad (4)$$

Dans le cadre de cette étude, l'évapotranspiration potentielle a été assimilée à la seule transpiration, l'évaporation directe du sol étant considérée comme négligeable et l'évaporation issue de l'eau interceptée par le couvert végétal étant directement prélevée des précipitations. Ces hypothèses sont expliquées dans la section *Bilan hydrique en forêt* de l'état de l'art.

Bien que cette simplification ne reflète pas l'intégralité des flux d'évapotranspiration, elle permet de simplifier le modèle simulé en se focalisant sur la composante dominante du processus.

3. Données pédologiques

i. Potentiel matriciel

Le potentiel matriciel du sol (Ψ_m) est une mesure de l'énergie potentielle de l'eau dans le sol, un indicateur direct de sa disponibilité pour la végétation. Il est mesuré en continu sur la parcelle R40 depuis le 20 février 2019 par l'INPE. Le dispositif comprend un ensemble de capteurs répartis à sept profondeurs caractéristiques : 10, 20, 30, 50, 100, 150 et 200 cm.

Ces données servent deux objectifs. Les mesures à 2 mètres de profondeur sont utilisées comme conditions aux limites inférieure dans la simulation Hydrus-1D et nécessitent donc une série temporelle complète. Les autres profondeurs servent de références pour la validation du modèle. La présence de valeurs manquantes y est moins problématique, tant que la qualité des données est assurée.

Les mesures sont effectuées à l'aide de capteurs MPS-6 (METER Group). Ils mesurent le potentiel matriciel dans une plage allant de -9 à -100 000 kPa (correspondant à un intervalle de pF 1,96 à 6,01), avec une résolution de 0,1 kPa et une précision de $\pm(10\% \text{ de la mesure} + 2 \text{ kPa})$ pour des valeurs comprises entre -9 et -100 kPa. Ces capteurs sont conçus pour être enterrés de manière permanente, avec une faible consommation énergétique, ce qui permet un enregistrement continu via un data logger (METER Group, 2016). Le 16 février 2023, le capteur installé à 2 mètres de profondeur a été remplacé par un capteur TEROs 21 en raison d'un dysfonctionnement. Celui-ci repose sur le même principe de mesure. Il bénéficie en revanche d'améliorations en termes de stabilité et de robustesse dans le temps, ce qui est particulièrement adapté aux mesures en profondeur (METER Group, 2017).

Les mesures ont initialement été acquises à un pas de 15 minutes, puis à une résolution horaire à partir du 3 mai 2021. Pour homogénéiser l'ensemble de la série temporelle, toutes les données ont été ramenées à une résolution horaire par moyenne glissante des quatre mesures disponibles chaque heure. Un filtrage rigoureux a été appliqué pour garantir la qualité

des mesures, en s'inspirant des protocoles développés dans les travaux précédents (Dermauw, 2024 ; Parmentier, 2024) mais avec des critères légèrement plus restrictifs :

1. **Un filtre différentiel** : toute valeur horaire présentant une variation de plus de 0,05 unité de pF par rapport à l'heure précédente a été considérée comme aberrante et supprimée (NA).
2. **Un filtre statistique** : une distribution normale a été ajustée aux données, éliminant toutes celles situées en dehors de l'intervalle de confiance à 95 %.
3. **Un filtre physique** : une borne minimale a été fixée à 2,1 pF, en dessous de laquelle les valeurs ont été écartées. Cette valeur a été définie après une inspection des séries temporelles de potentiel matriciel révélant un écrasement systématique des valeurs autour de pF 2,1. Cette inspection a suggéré une limite effective ou une perte de sensibilité du capteur dans les conditions de saturation du sol.

L'application conjointe de ces trois filtres a permis d'éliminer la majorité des artefacts de mesure. En contrepartie, elle a généré un taux non négligeable de valeurs manquantes, notamment dans la série temporelle du capteur situé à 2 mètres de profondeur. Cette profondeur, correspondant à la condition de fond du modèle, nécessite une série continue. Pour combler ces lacunes, une interpolation linéaire a été appliquée entre les valeurs valides les plus proches. Cette méthode a été jugée appropriée dans ce cas au vu de la variabilité lente et peu bruitée de la série. De plus, les périodes de données manquantes étaient relativement courtes. Cette approche permet donc de restaurer la continuité du signal sans compromettre la cohérence physique des données utilisées en condition aux limites.

ii. Teneur en eau

La teneur volumique en eau (θ) représente le volume d'eau stocké par unité de volume de sol. Elle est également essentielle pour évaluer la réserve hydrique disponible pour la végétation.

L'INPE la mesure sur R40 depuis le 20 février 2019. Le dispositif comprend un ensemble de capteurs répartis aux mêmes profondeurs que pour le potentiel matriciel, c'est-à-dire : 10, 20, 30, 50, 100, 150 et 200 cm.

Les capteurs utilisés étaient initialement des capteurs GS1, enregistrant les mesures toutes les 15 minutes. A partir du 3 mai 2021, la résolution temporelle est devenue horaire. Le 16 février 2023, le capteur implanté à 2 mètres de profondeur a été remplacé par un TEROS 10, en raison d'une défaillance.

Les capteurs GS1 ont fourni des mesures dans une plage de 0,00 à 0,64 m³/m³, avec une résolution de 0,001m³/m³ et une précision typique de $\pm 0,03$ m³/m³ (± 3 %) dans les sols minéraux (METER Group, 2023). Les capteurs TEROS 10 reprennent ces mêmes caractéristiques de mesure.

Les séries brutes de teneur en eau ont également été unifiées à une résolution horaire. Un filtrage a ensuite été appliqué :

1. **Un filtre différentiel** : toute valeur horaire présentant une variation de plus de 0,01 m³/m³ par rapport à l'heure précédente a été considérée comme aberrante et supprimée (NA).
2. **Un filtre statistique** : une distribution normale a été ajustée aux données, éliminant toutes celles situées en dehors de l'intervalle de confiance à 95 %.
3. **Un filtre physique** : seules les données comprises entre 0,10 et 0,47 m³/m³ ont été conservées. En effet, l'inspection visuelle des séries de teneur en eau a montré la présence d'artefacts très isolés temporellement, prenant des valeurs éloignées de la fenêtre de valeurs prise par le reste des séries (de plus de 10%).

L'application combinée de ces filtres a éliminé les principales anomalies, tout en générant des lacunes dans les séries temporelles.

iii. Échantillonnage

Deux campagne d'échantillonnage ont été réalisées sur R40 dans le cadre des travaux de B. Delvoie (en 2023) et de C. Dermauw (en 2024). Lors de ces campagnes, un profil de sol d'environ 250 cm de profondeur est ouvert manuellement, permettant un accès direct aux horizons pédologiques. Les échantillons prélevés à sept profondeurs caractéristiques (10, 20, 30, 50, 100, 150 et 200 cm) lors de ces deux campagnes, ainsi que les mesures ayant été faites sur ces échantillons sont résumées dans le tableau 2.

Cette année, une seconde campagne d'échantillonnage a été menée selon la même méthodologie, à environ 5m de là où les premières avaient été faites. À l'aide d'un anneau d'échantillonnage de 250 mL, d'une bêche, d'un maillet et d'une goupille, elle a permis de prélever deux échantillons non-perturbé supplémentaires à chaque profondeur. Ainsi, ces nouveaux prélèvements ont permis de constituer un triplicat pour chacune des sept profondeurs, dans le but d'améliorer la robustesse statistique des analyses réalisées par la suite. Ces nouveaux échantillons récoltés et les mesures qu'ils ont permis de réaliser sont également répertoriés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Résumé des échantillons collectés et des mesures (Hyprop, KSAT, coupelles poreuses et casseroles à haute pression, texture, densité apparente, porosité et C, N) réalisées lors des campagnes d'échantillonnage menées entre 2023 et 2025 sur la parcelle R40. Les chiffres indiquent le nombre de réplicats par profondeur et par type d'analyse. Les couleurs différencient l'origine des mesures : vert = campagne 2023 (B. Delvoie), violet = campagne 2024 (C. Dermauw), rose = campagne 2025 (M. Ounifi). Le symbole * appliqué à la colonne C,N renvoie à l'ensemble des mesures de carbone total, carbone organique, carbone inorganique et azote total.

Prof (cm)	HYPROP	KSAT	Coupelles poreuses + casseroles HP	Densité racinaire	Texture	Densité apparente ρ_a	Porosité	C,N *
10	1 + 2	1 + 2	1	3	1 + 1	1 + 1 + 2	1 + 1	2
20	1 + 2	1 + 2	1	3	1 + 1	1 + 1 + 2	1 + 1	2
30	1 + 2	1 + 2	1	3	1 + 1	1 + 1 + 2	1 + 1	2
50	1 + 2	1 + 2	1	3	1 + 1	1 + 1 + 2	1 + 1	2
100	1 + 2	1 + 2	1	3	1 + 1	1 + 1 + 2	1 + 1	-
150	1 + 2	1 + 2	1	3	1 + 1	1 + 1 + 2	1 + 1	-
200	1 + 2	1 + 2	1	3	1 + 1	1 + 1 + 2	1 + 1	-

iv. Densité apparente

La masse volumique apparente du sol a été déterminée sur les échantillons prélevés lors de la campagne 2025, menée sur R40 (M. Ounifi). Elle a été obtenue à partir de la masse de sol sec, mesurée à l'aide d'une balance (d'une précision de 0,1g et d'une résolution de 0,01g) et du volume initial de l'échantillon (250 mL).

En surface (0 – 10 cm), la valeur obtenue cette année (0,57 g·cm⁻³) est inférieure aux valeurs typiques rapportées pour les ferralsols à cette même profondeur (environ 0,84 g·cm⁻³), ce qui reflète probablement la forte teneur en matière organique et l'activité biologique dans l'horizon supérieur. En profondeur, les densités apparentes mesurées (0,803 à 1,086 g·cm⁻³) s'inscrivent pleinement dans les gammes documentées pour les Ferralsols au Brésil (0,874 à 1,12 g·cm⁻³). Les données qui avaient été rapportées par Delvoie (2023) correspondent également aux gammes de valeurs attendues pour ce type de sol (entre 0,81 et 0,97 g·cm⁻³ en surface et entre 1,07 et 1,26 g·cm⁻³ plus loin dans le profil). Le travail de Dermauw (2024) rapporte également des masses volumiques apparentes du même ordre (environ 0,9 g·cm⁻³ en surface et entre 1,1 et 1,2 g·cm⁻³ dans le reste du profil).

v. Courbe de rétention et de conductivité

a. Dispositif Hyprop

Parmi les échantillons collectés lors de la campagne 2025 décrites précédemment, une seule série (un échantillon à chacune des 7 profondeurs) a été mesurée sur Hyprop. Ils ont été saturés par immersion contrôlée puis placés dans la cellule du système Hyprop (METER group). Le dispositif se compose de deux tensiomètres insérés à différentes hauteurs dans la colonne de sol. Ceux-ci permettent de mesurer en continu le gradient vertical de potentiel matriciel, pendant une désaturation progressive, par évaporation. La perte de masse par pesée continue est enregistrée simultanément à l'aide d'une balance. A partir de ces données, le système reconstitue la courbe de rétention (θ , h ; dans une gamme de 0,3 kPa à -100 kPa). Simultanément, il détermine aussi la conductivité hydraulique en conditions non saturées, en appliquant la loi de Darcy-Buckingham à partir du gradient de succion et du débit estimé.

b. Dispositif KSAT

La conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) a été mesurée séparément à l'aide du dispositif KSAT. Les échantillons ont été préalablement saturés de manière contrôlée afin de garantir l'absence d'air résiduel dans la porosité. Le système impose un champ hydraulique constant et mesure le débit d'eau à travers l'échantillon. La conductivité est ensuite déduite selon la loi de Darcy.

L'appareil KSAT permet des mesures sur une plage de 0,01 à 5000 cm/j, avec une précision de 1 Pa. L'incertitude annoncée est de ± 2 %, mais des variations pratiques de l'ordre de 10 % sont fréquentes selon les textures de sol (METER Group, 2023).

c. Traitement des données (Hyprop-fit)

Les données obtenues par les dispositifs Hyprop et KSAT ont été traitées dans le logiciel Hyprop-Fit (ou Labros), fourni par METER Group. Ce programme ajuste des modèles paramétriques à partir des couples (θ , h) et (K , h) mesurés.

Le modèle utilisé est celui de van Genuchten (Bezerra-Coelho et Al., 2018), avec hypothèse de porosité simple. Le logiciel permet d'ajuster automatiquement ou manuellement les paramètres du modèle (α , n , θ_r , θ_s , λ , K_{sat}), afin d'obtenir les courbes de conductivité et de rétention correspondant au mieux aux données mesurées en laboratoire avec Hyprop.

Dans cette étude, pour les 7 échantillons ayant été traité par Hyrpop (un échantillon par profondeur) :

- Le paramètre K_{sat} a été imposé manuellement à la valeur mesurée par le KSAT sur ce même échantillon.
- Les autres paramètres ont été ajustés ou fixés selon les cas. Le but était d'obtenir le fitting fournissant un RMSE le plus proche possible de 0, caractérisant un fitting prédisant les données mesurées avec précision.

Ce traitement permet d'obtenir des jeux de paramètres hydrodynamiques adaptés à chaque horizon de sol, en lien avec les mesures expérimentales.

4. Données de végétation

a. Échantillonnage (réalisé par B. Delvoie en 2023)

La densité racinaire a été évaluée à huit profondeurs distinctes. Pour chaque profondeur, trois répliquats d'échantillons de sol (masse sèche comprise entre 0,5 et 2 kg) ont été prélevés à la bêche. Les échantillons ont ensuite été filtrés afin d'en extraire les racines d'un diamètre inférieur à 2mm. (Delvoie, 2023).

b. Calcul de la densité racinaire (réalisé par B. Delvoie en 2023)

Après extraction, les racines ont été pesées. Leur masse a été rapportée à la masse de sol sec (Delvoie, 2023). La moyenne des trois répliquats a ensuite été multipliée par la masse volumique apparente du sol obtenue lors de la campagne 2025 (M. Ounifi). En effet, B. Delvoie signale dans son travail une incertitude concernant la méthodologie de calcul de la densité apparente calculée lors de la campagne 2023. Il était donc plus sûr de se baser sur la nouvelle densité apparente calculée.

La densité racinaire résultante s'exprime ainsi en g de racine par dm^3 de sol.

5. Modélisation

La récolte des données présentées précédemment permet d'établir un modèle, simulant la dynamique de l'eau dans le sol. Cette modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel Hydrus-1D. Ce modèle numérique permet de résoudre l'équation de Richards, en une dimension. Il permet ainsi de représenter les flux d'eau en conditions non saturées dans un profil de sol vertical et stratifié (Šimůnek et al., 2016).

i. Configuration générale du modèle

Le domaine modélisé correspond à un profil vertical de 200 cm de profondeur. Le profil a été discrétisé en 7 couches réparties entre 0 et 10cm, entre 10 et 20cm, entre 20 et 30cm, entre 30 et 50cm, entre 50 et 100cm, entre 100 et 150cm et enfin, entre 150 et 200cm. Le maillage spatial a été adapté pour garantir la précision des gradients d'humidité, notamment dans les zones proches de la surface. Dans les 5 premiers cm, une densité de 10^{-3} et dans le reste du profil, une densité de 0,1 a été définie.

Le pas de temps de simulation a été fixé à 5mn, avec des contraintes de variation maximale (minimum fixé à 1 seconde et maximum fixé à 24 heures) pour assurer la convergence des calculs. La période simulée s'étend du 20 février 2019 à 11:00 jusqu'au 09 septembre 2024 à 02:00.

ii. Paramètres

Les paramètres des courbes de conductivité et de rétention, répertoriés dans le tableau de l'annexe 7, ont été intégrées dans Hydrus.

Les densités racinaires décrites précédemment ont également été implémentées aux profondeurs où elles ont été mesurées. Une interpolation linéaire a été faite entre ces profondeurs afin de définir une valeur sur l'ensemble du profil.

Les paramètres de la fonction de Feddes, qui décrivent la réponse de la plante au stress hydrique, ont été implémentés afin de moduler la prise d'eau racinaire en fonction du potentiel matriciel. Ce formalisme distingue les phases de saturation, d'absence de stress et de déficit hydrique jusqu'au point de flétrissement permanent (Feddes et al., 1978 ; Homaei et al., 2002).

Étant donné le manque de références spécifiques aux essences forestières présentes sur R40, les valeurs de référence proposées pour une prairie standard (Wesseling, 1991) ont été retenues, suivant l'approche de Delvoie (2023). Ce dernier avait montré, par une analyse de sensibilité, que le paramètre p_2L n'influait pas significativement l'ETp simulée.

Dans ce travail, seul le seuil p_3 a été adapté, en le fixant à la valeur la plus basse mesurée dans les données de potentiel matriciel (-10 000 cm), afin de refléter la limite du point de flétrissement permanent.

Deux scénarios distincts ont ensuite été simulés afin d'évaluer l'effet de la compensation racinaire (mécanisme documenté dans la section II.3.ii. *Transpiration*). Dans le premier, aucune

compensation n'a été autorisée, le paramètre *critical stress index for water uptake* du module « *root water uptake model* » ayant été fixé à 1.

Dans le second, ce paramètre a été abaissé à 0,5, permettant d'explorer l'impact d'une compensation partielle sur la dynamique hydrique simulée.

iii. Conditions aux limites et initiales

Les conditions aux limites supérieures ont été imposées à partir des données horaires de pluie (corrigée par l'interception, voir la section IV.2.ii. *Interception*) et l'évapotranspiration potentielle (considérée à 100% comme étant due à la transpiration du couvert).

La limite inférieure a été imposée par la série temporelle de pression matricielle à 2m. Les éventuelles données manquantes dans la série ont été corrigées par interpolation.

Les conditions initiales ont été définies sur base des potentiels matriciels mesurés, à chaque profondeur, le 20 février 2019 à 10:00.

iv. Validation

Des données de teneur en eau et de potentiel matriciel résultent des modélisations. Elles sont comparées aux données mesurées sur la parcelle R40 afin d'évaluer la qualité du modèle. Le résultat de ces comparaisons sera présenté dans la section résultats et discussion.

Afin de rendre les séries comparables entre elles et d'évaluer plus précisément les corrélations entre données simulées et mesurées, un taux de saturation relatif en eau (θ_{rel}) a été calculé. Cette variable est construite sur le même principe que le degré de saturation effectif (Se) mais avec une normalisation adaptée. En théorie, Se s'exprime comme :

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5)$$

où θ est la teneur en eau volumique, θ_s la teneur en eau à saturation et θ_r la teneur en eau résiduelle.

Cependant, l'utilisation de ces paramètres issus des ajustements de courbes de rétention s'est révélée problématique dans ce cas. En effet, les séries de mesures de terrain ne coïncident pas toujours parfaitement avec les courbes de rétention ajustées (cf. courbes de rétention, section V.6.i. *Courbes de rétention*). Dans certains cas, θ_r se révèle supérieur à certaines valeurs

mesurées, entraînant des θ négatifs. Pour contourner cette limite, les bornes de normalisation ont été redéfinies à partir des valeurs extrêmes observées dans les séries temporelles :

$$\theta_{rel} = \frac{\theta - \theta_{min}}{\theta_{max} - \theta_{min}} \quad (6)$$

Cette transformation garantit que toutes les valeurs sont comprises entre 0 et 1, où 0 correspond au sol le plus sec observé et 1 au sol le plus humide. L'intérêt de cette normalisation est double. Dans un premier temps, elle supprime les artefacts dus aux incertitudes sur θ_r et θ_s issus des fittings. Ensuite, elle met l'accent sur la variabilité relative et la dynamique temporelle des teneurs en eau, ce qui est particulièrement pertinent pour évaluer la performance d'un modèle hydrologique.

V. Résultats et discussion

1. Propriétés hydrodynamiques

Dans le cadre de la modélisation Hydrus-1D, les paramètres hydrodynamiques retenus proviennent principalement de la campagne 2025, à l'exception de la profondeur de 50 cm, où les données de 2024 ont été privilégiées. Les raisons de ce choix seront expliquées dans cette section.

i. Courbes de rétention

La figure 8 présente les courbes de rétention obtenues lors des campagnes de terrain de 2023 (B. Delvoie), 2024 (C. Dermauw) et 2025 (M. Ounifi), accompagnées des données de teneur en eau (θ) représentées en fonction du potentiel matriciel (pF), tous deux respectivement mesurés in-situ par les capteurs MPS-6 (ou TEROS21) et GS1 (ou TEROS10). Les paramètres ajustés selon le modèle de van Genuchten sont récapitulés dans l'annexe 7.

Globalement, les courbes issues de la campagne 2025 (courbes rouges) s'ajustent de manière satisfaisante aux nuages de données mesurées après filtrage, soulignant leur pertinence pour les horizons étudiés. Une exception notable apparaît à 50 cm, où la teneur en eau à saturation excède $0,70 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, ce qui est incohérent avec toute mesure in situ. Cela résulte probablement d'une masse sèche sous-estimée en laboratoire, entraînant une porosité excessive. La comparaison des courbes issues des différentes campagnes montre une concordance globalement satisfaisante, avec toutefois des écarts plus marqués pour l'allure des courbes de 2023. Cette différence s'explique principalement par la méthodologie d'optimisation réalisée. En 2024 et 2025, l'optimisation dans Hyprop-Fit (Labros) a été réalisée sur les points Hyprop mesurés en laboratoire, tandis qu'en 2023 elle a été effectuée sur les mesures in situ. Les courbes de 2023 collent donc mieux aux observations de terrain, alors que celles de 2024–2025 reflètent davantage la réponse issue des essais en laboratoire.

Dans l'ensemble, la concordance entre les trois campagnes aux grandes profondeurs renforce la robustesse des mesures. En revanche, des divergences apparaissent plus nettement dans les trois premiers horizons (jusqu'à 30 cm). Cette variabilité est attendue, les couches superficielles des sols forestiers étant particulièrement hétérogènes en raison de l'activité biologique intense, de la dynamique racinaire et de l'apport de matière organique (Chiapini et Al., 2025).

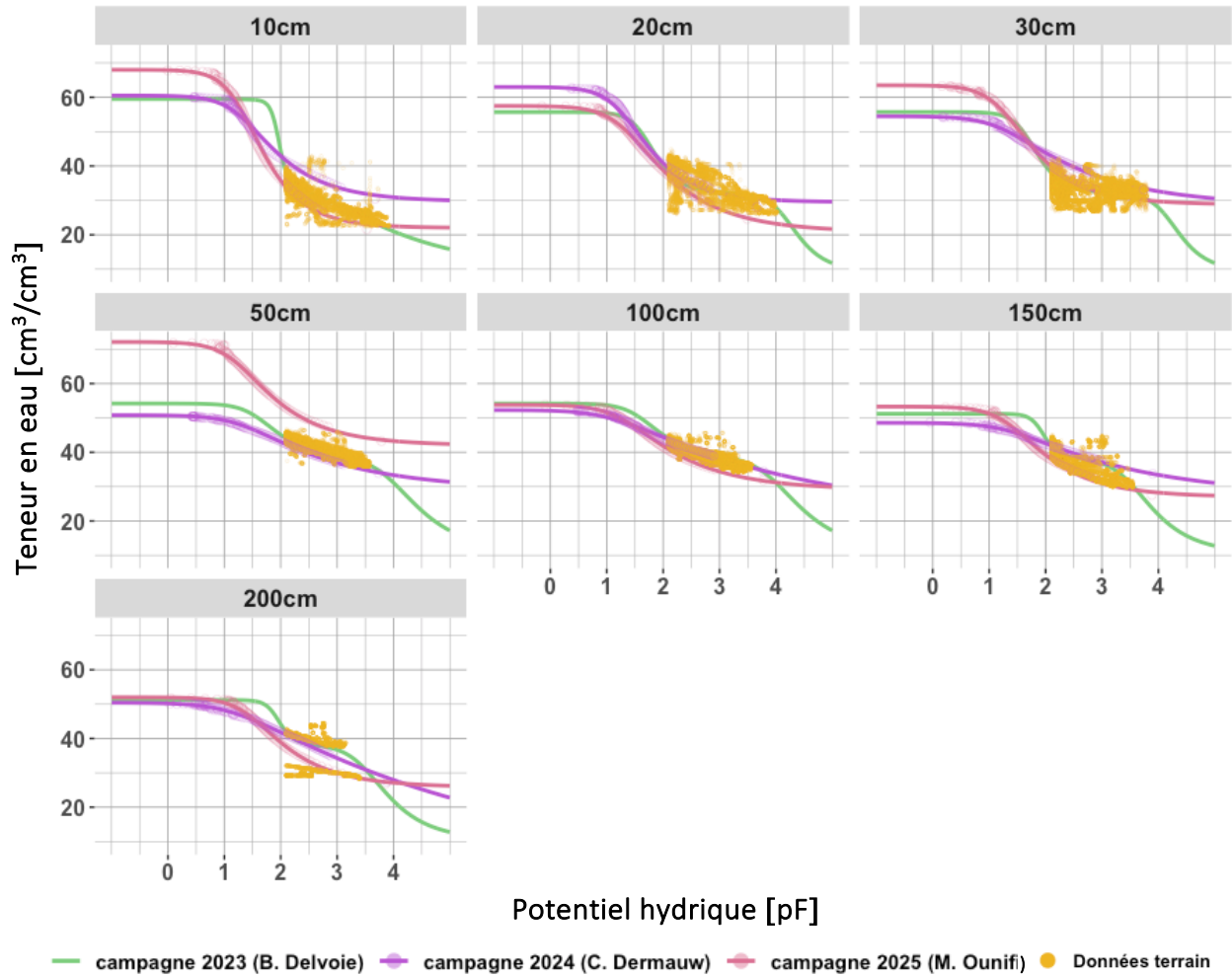


Figure 8 : Courbes de rétention pour les trois campagnes : B. Delvoie (2023, en vert), C. Dermauw (2024, en violet) et B. Delvoie (2025, en rouge) obtenues pour les 7 profondeurs étudiées sur R40. Les points violets et rouges représentent les combinaisons de valeurs (θ , h) mesurées par le dispositif Hyprop pour chaque campagne et la courbe de la même couleur représente le fitting réalisé, sur chaque série de points mesurés, avec le logiciel Labros. Les points jaunes représentent les données de teneur en eau (%) en fonction du potentiel matriciel (pF) tous deux mesurés sur le terrain.

La comparaison des différentes profondeurs montre que les horizons supérieurs (10 à 30 cm) se caractérisent par des θ_s relativement élevés (environ 0,55 à 0,68). Une conséquence pratique d'une profondeur caractérisée par une courbe avec un $\Delta\theta$ ($= \theta_s - \theta_r$) plus grand est sa grande réserve en eau utile. Les courbes à ces profondeurs montrent également des pentes plus abruptes. Ces caractéristiques reflètent une macroporosité plus importante, où une grande fraction d'eau se vide sur un faible incrément de pF. Ce comportement est typique des couches superficiellement (Tomasella et Al., 1998).

En revanche, les horizons profonds (100 à 200 cm) présentent d'importantes similitudes, avec des valeurs de θ_s plus faibles (de 0,49 à 0,54) et des courbes très similaires.

Cette homogénéité reflète une variabilité moins marquée de ces horizons, dominée par la microporosité, avec une moindre influence des perturbations de surface. Cette observation est tout à fait logique et attendue des sols profonds, notamment dans les Ferralsols. Cette structure, typique des Ferralsols, est liée à la prédominance de micro-agrégats qui confèrent une porosité fine, induisant une rétention élevée aux fortes suctions et une vidange plus progressive du profil (Tomasella & Hodnett, 1998). Dans ces profils profonds souvent peu différenciés, il est courant d'observer des propriétés hydrauliques similaires entre horizons, ce qui est cohérent avec les observations réalisées ici.

La réserve en eau utile (REU) a été estimée à partir de la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ ($pF = 2,0$) et au point de flétrissement permanent ($pF = 4,2$). Les résultats obtenus pour la campagne 2025 indiquent une REU avoisinant les 10 % en moyenne, soit environ 10 mm d'eau disponible pour 10 cm de sol. Elle prend des valeurs plutôt constantes le long du profil avec une fenêtre comprise entre 10 et 12% environ. Ces valeurs sont très proches de l'ordre de grandeur rapporté pour les Ferralsols, dont la capacité à retenir l'eau disponible est généralement limitée à environ 10 mm/10 cm (FAO, 2001 ; Tomasella & Hodnett, 1998). Les mesures de laboratoire confirment donc la cohérence des résultats avec les caractéristiques attendues de ce type de sol.

Les écarts les plus marqués apparaissent toutefois à 20 cm, où la REU atteint environ 16 mm/10 cm. Cette valeur plus élevée est probablement l'effet d'une plus forte macroporosité ou d'une hétérogénéité locale liée à la structure racinaire et à l'apport de matière organique, renforçant localement la capacité de stockage en eau disponible (Dermauw, 2024).

ii. Courbes de conductivité

La figure 9 illustre les courbes de conductivité hydraulique obtenues lors des campagnes de 2023 (B. Delvoie), 2024 (C. Dermauw) et 2025 (M. Ounifi), tandis que les valeurs de conductivité à saturation (K_{sat}) sont répertoriées dans le tableau 3.

Globalement, les tendances observées en 2024 et 2025 sont cohérentes. Les horizons de surface présentent des valeurs de K_{sat} plus élevées, reflétant une macroporosité plus importante et une capacité d'infiltration élevée, typiques des sols forestiers tropicaux (Lozano-Baez et al., 2020 ; Fisher, 1995). Ces valeurs diminuent progressivement avec la profondeur, en accord avec les observations classiques sur profils pédologiques structurés (Jarvis, 2007). Fonctionnellement, cette conductivité élevée en surface suggère une aptitude à absorber rapidement les pluies intenses, limitant le ruissellement direct (Bruijnzeel, 2004) et favorisant la recharge rapide des horizons plus profonds, tandis que la diminution progressive en profondeur traduit un ralentissement des flux verticaux (Fisher, 1995).

Tableau 3 : Conductivités à saturation (K_{sat} , cm/jour) mesurée avec l’outil KSAT (Meter gourg), selon la campagne d’échantillonnage. Les lignes en violet répertorient les données relatives à la campagne de 2024 (C. Dermauw) tandis que les lignes en rouge sont relatives à la campagne de 2025 (M. Ounifi). Les données dont la police est en gras et colorée sont les valeurs relatives aux courbes de conductivité étudiées dans ce mémoire et représentées sur la figure 9.

Profondeur	Réplica	Campagne	K_{sat} (cm/jour)
10	1	C. Dermauw (2024)	435,0
	2	M. Ounifi (2025)	2520,0
	3	M. Ounifi (2025)	4280,0
20	1	C. Dermauw (2024)	1010,0
	2	M. Ounifi (2025)	441,7
	3	M. Ounifi (2025)	953,3
30	1	C. Dermauw (2024)	160,0
	2	M. Ounifi (2025)	700,0
	3	M. Ounifi (2025)	940,3
50	1	C. Dermauw (2024)	30,0
	2	M. Ounifi (2025)	546,0
	3	M. Ounifi (2025)	2600,0
	4	M. Ounifi (2025)	1090,0
100	1	C. Dermauw (2024)	149,0
	2	M. Ounifi (2025)	327,0
	3	M. Ounifi (2025)	457,0
150	1	C. Dermauw (2024)	16,0
	2	M. Ounifi (2025)	126,3
	3	M. Ounifi (2025)	235,0
200	1	C. Dermauw (2024)	90,0
	2	M. Ounifi (2025)	254,5
	3	M. Ounifi (2025)	178,0

Au-delà des valeurs de K_{sat} , l’allure des courbes fournit des informations importantes sur la dynamique des pores. Dans la majorité des profondeurs, la campagne 2025 (courbes rouges) montre une décroissance plus rapide de la conductivité avec l’augmentation du pF, ce qui traduit une perte plus précoce de conductivité à mesure que les macropores se vident. À 20 cm, toutefois, les courbes de 2024 et 2025 présentent des pentes plutôt similaires, suggérant une dynamique très proche. La campagne 2024 (courbes violettes) tend souvent à présenter la pente la plus faible, conservant une conductivité significative jusqu’à des potentiels plus négatifs, ce qui suggère une meilleure connectivité des micropores et une plus grande résilience hydrique.

La campagne 2023 se distingue par la considération d'une double porosité, ce qui accentue l'effet de fermeture des macropores à faibles tensions (Durner, 1994). Cela se traduit par une chute plus précoce de la conductivité par rapport aux autres campagnes. Cette dynamique reflète l'effet du fitting en double porosité, qui accentue la fermeture rapide des macropores et met en avant la contribution des micropores au drainage résiduel à des potentiels élevés.

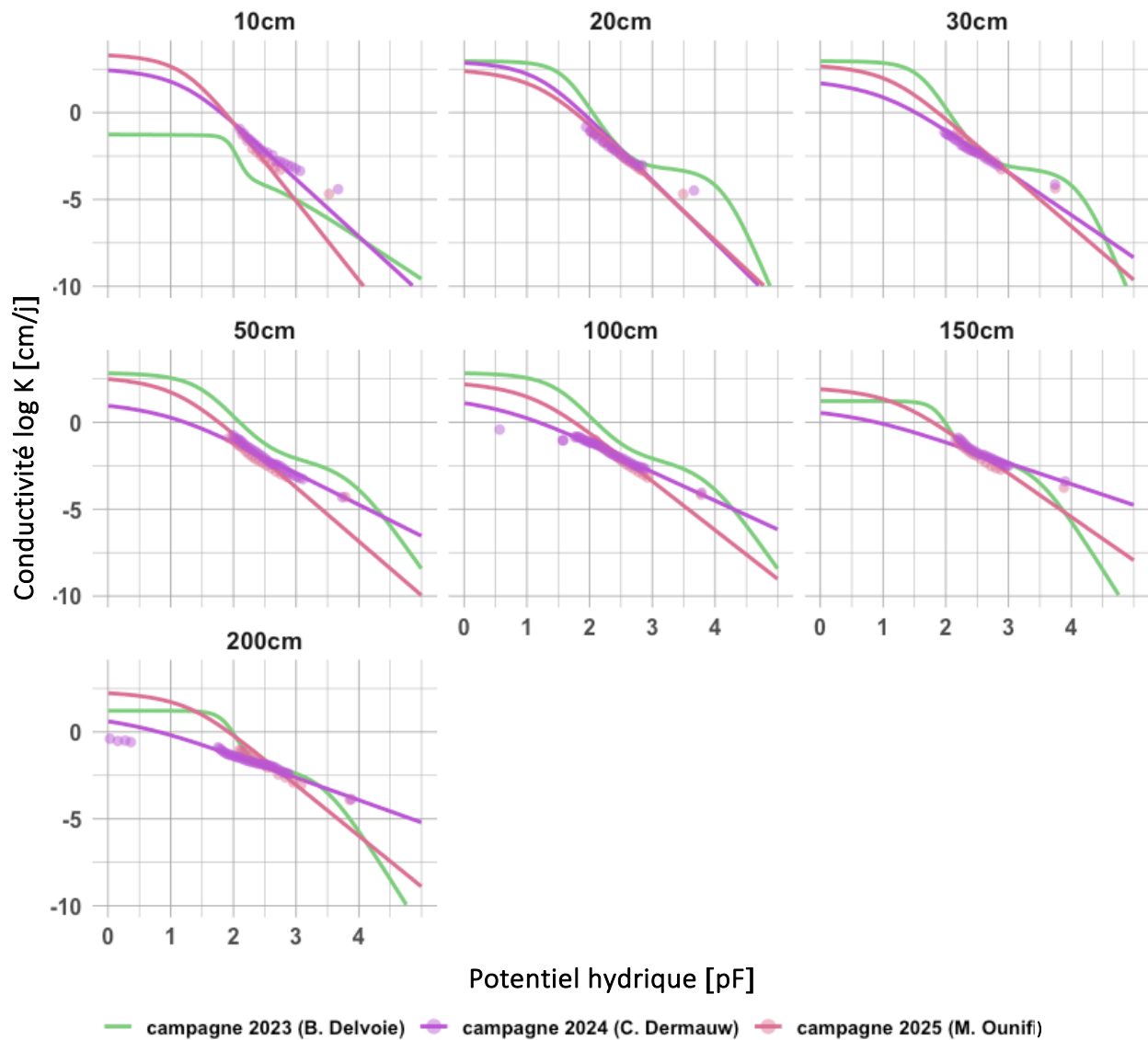


Figure 9 : Courbes de conductivité pour les trois campagnes : B. Delvoie (2023, en vert), C. Dermauw (2024, en violet) et B. Delvoie (2025, en rouge) obtenues pour les 7 profondeurs étudiées sur R40. Les points représentent les combinaisons de valeurs ($\log_{10} K$, h) mesurées par le dispositif Hyprop et la courbe de la même couleur représente le fitting réalisé avec le logiciel Labros.

2. Données météorologiques

Les corrélations obtenues entre valeurs complétées et valeurs réelles (cf. figure 10) montrent que l'interpolation linéaire appliquée aux lacunes courtes (≤ 6 h) donne les meilleures correspondances, toutes variables confondues. Ce résultat était attendu étant donné la corrélation entre les valeurs prises par les variables sur des intervalles de temps aussi courts. Les méthodes basées sur des moyennes glissantes sur ± 3 jours ou sur des moyennes interannuelles affichent également de bonnes performances pour la température, l'humidité relative, la pression et le rayonnement global, avec des R^2 élevés.

En revanche, les performances sont plus limitées pour la vitesse du vent et de manière plus marquée, pour les précipitations. Pour le vent, le R^2 d'environ 0,3 traduit une faible capacité à reproduire précisément les valeurs manquantes. Cependant, l'écart absolu reste généralement inférieur à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, ce qui minimise l'incidence sur le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0), puisque le terme de ventilation dans l'équation de Penman–Monteith est proportionnel à la vitesse du vent mais pondéré par d'autres variables telles que le déficit de pression de vapeur ou le rayonnement net. De plus, la sensibilité de l' ET_0 au vent (u_2) est souvent moindre que celle à d'autres variables comme le rayonnement solaire ou l'humidité relative (Ndulue et Al., 2020). Par ailleurs, le prétraitement appliqué aux données INMET (calibration linéaire sur INPE, cf. section IV.2.vi.Stations météorologiques) réduit la variabilité horaire de la vitesse du vent, ce qui contribue à la constance de certains fragments de données observés.

Les précipitations présentent les corrélations les plus faibles. Aucune méthode ne restitue fidèlement leur variabilité horaire, ce qui est cohérent avec le caractère sporadique et localisé des pluies tropicales. Cet effet reste peu pénalisant ici, la base INPE étant complète à 99,5 %. Les cumuls sont correctement restitués. Le bilan mensuel est respecté et le bilan quotidien l'est le plus souvent, ce qui répond à l'objectif principal d'obtenir un bilan fiable aux échelles journalière à mensuelle.

Globalement, les résultats indiquent que la procédure de complétion mise en place est fiable pour les variables ayant le plus d'influence sur le calcul de l' ET_0 (température, humidité, rayonnement solaire), avec des performances élevées et des écarts faibles aux données originales

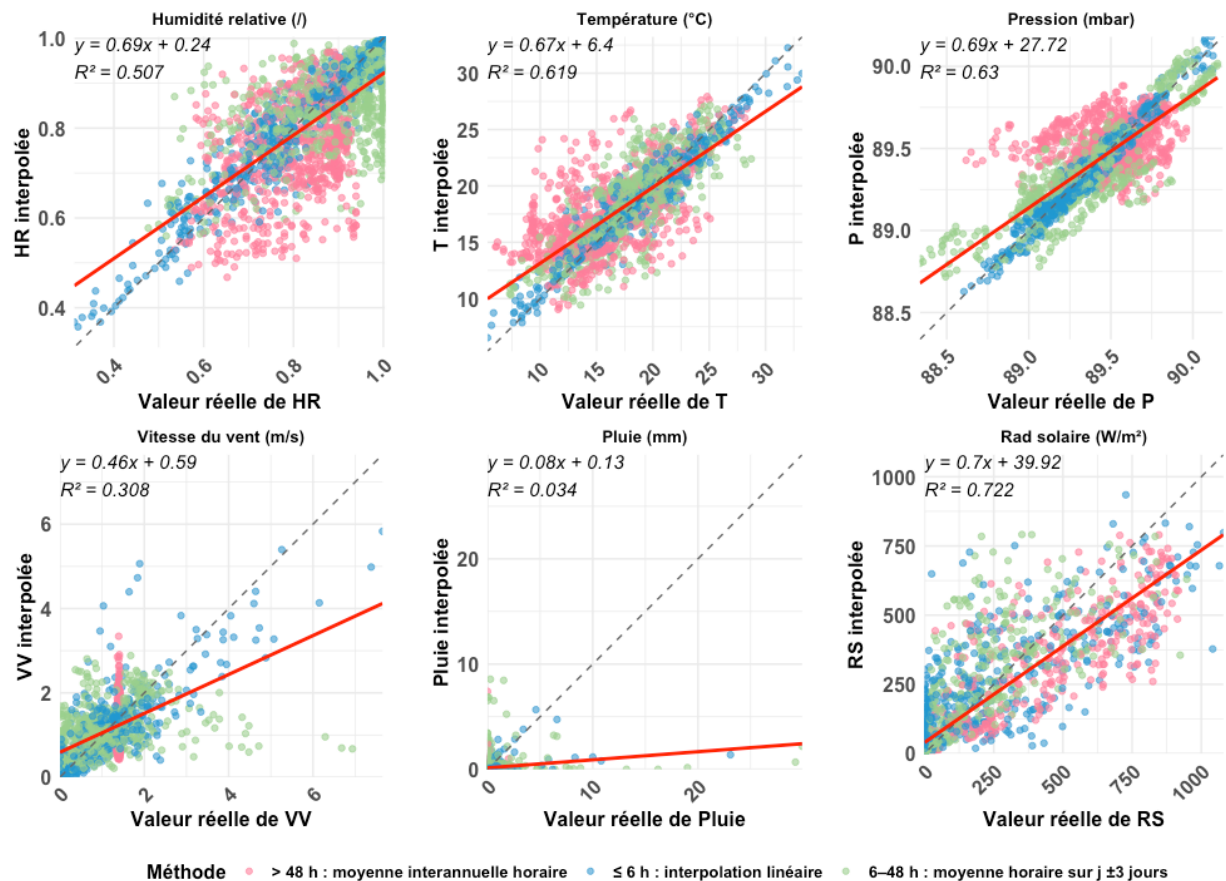


Figure 10 : Graphiques de validation de la méthodologie de complétion pour l'humidité relative (HR), la température (T), la pression (P), la vitesse du vent (VV), la pluie et la radiation solaire (RS). Les nuages de points représentent les résultats de corrélations entre les séries temporelles de chaque variable météorologiques réelles (en x) en fonction des séries temporelles interpolées (en y) pour cette même variable. Les corrélations avec les données interpolées linéairement (lacune < 6h) sont représentées en bleu, avec celles interpolées par moyenne horaire sur j ± 3 jours en vert et avec celles interpolées par moyenne interannuelle horaire (lacune > 48h) en bleu.

3. Résultat des modélisations

i. Validation des simulations

L'évaluation des performances de la simulation a été réalisée pour les scénarios sans compensation et avec compensation, sur base de la comparaison des valeurs simulées avec les observations issues des capteurs.

Les graphiques de corrélation montrent une dispersion au-dessus de la diagonale 1-1. Une part de cette dispersion peut être attribuée à un effet d'hystérèse. Ce comportement traduit le fait que les courbes de rétention diffèrent entre les phases de séchage et de réhumectation. Dans cette étude, l'hystérèse n'a pas été activée dans HYDRUS-1D faute de données suffisantes pour caler séparément l'humectation et le séchage, ce qui contribue probablement aux écarts observés. Dans les horizons plus profonds (entre 100 et 150 cm), les potentiels matriciels simulés sont souvent plus faibles que les valeurs mesurées. Aux autres profondeurs, cet effet est visible mais pas de façon systématique. Une incertitude sur $K(h)$ et la sensibilité des couches superficielles aux conditions atmosphériques et à la représentation du couvert peuvent être une part de ces différences.

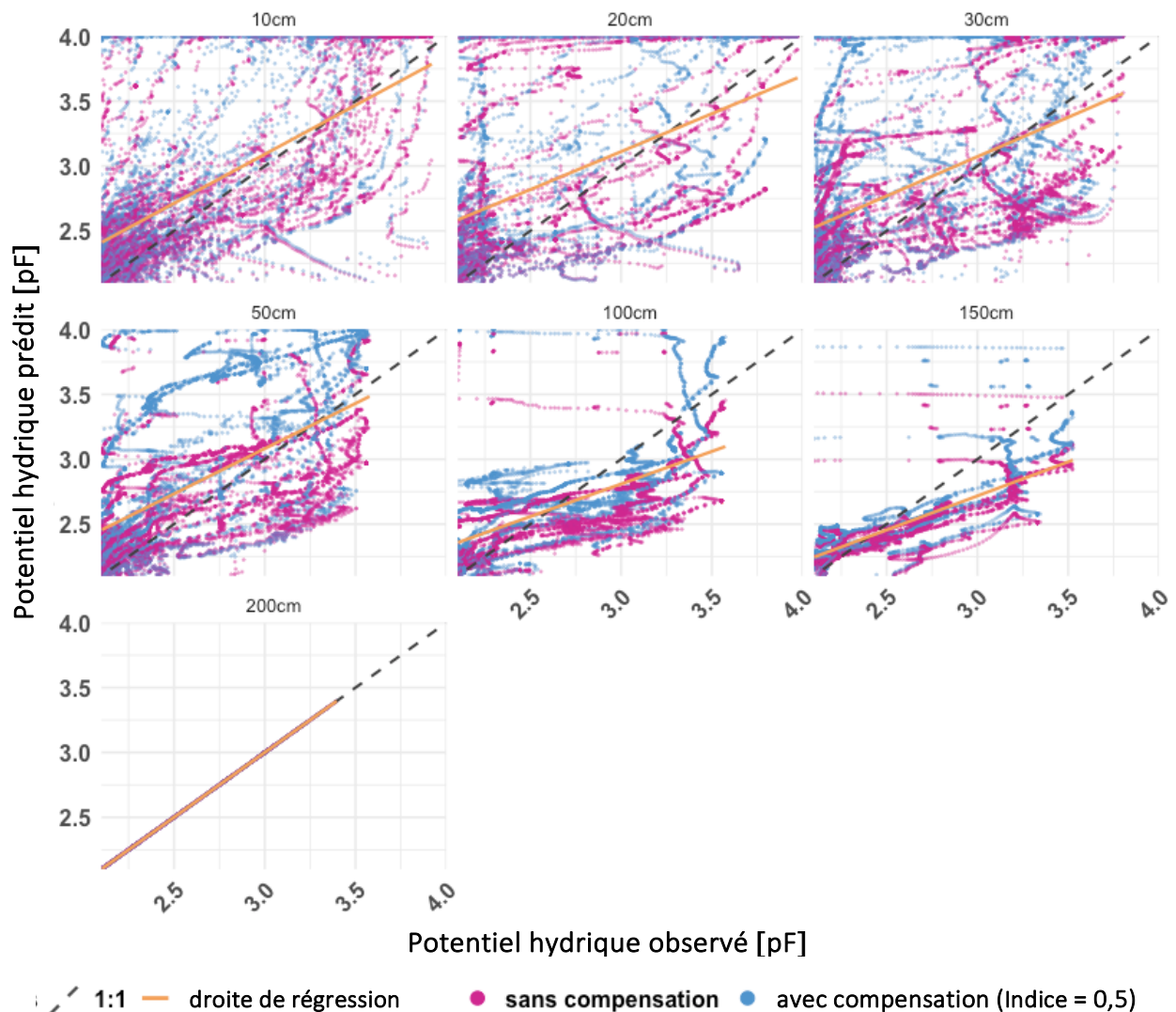


Figure 11: Corrélations, par profondeur, entre les séries de données de potentiel matriciel (pF) mesurées (en x) et les séries de données de potentiel matriciel (pF) simulées (en y). Les points roses représentent les corrélations avec les simulations pour le scénario sans compensation racinaire (avec un indice de 0) et les points bleus représentent le scénario avec compensation racinaire (avec un indice de 0,5). La droite de régression (en jaune), relative à chaque graphique et une droite 1:1 (en pointillés noirs) sont aussi représentées.

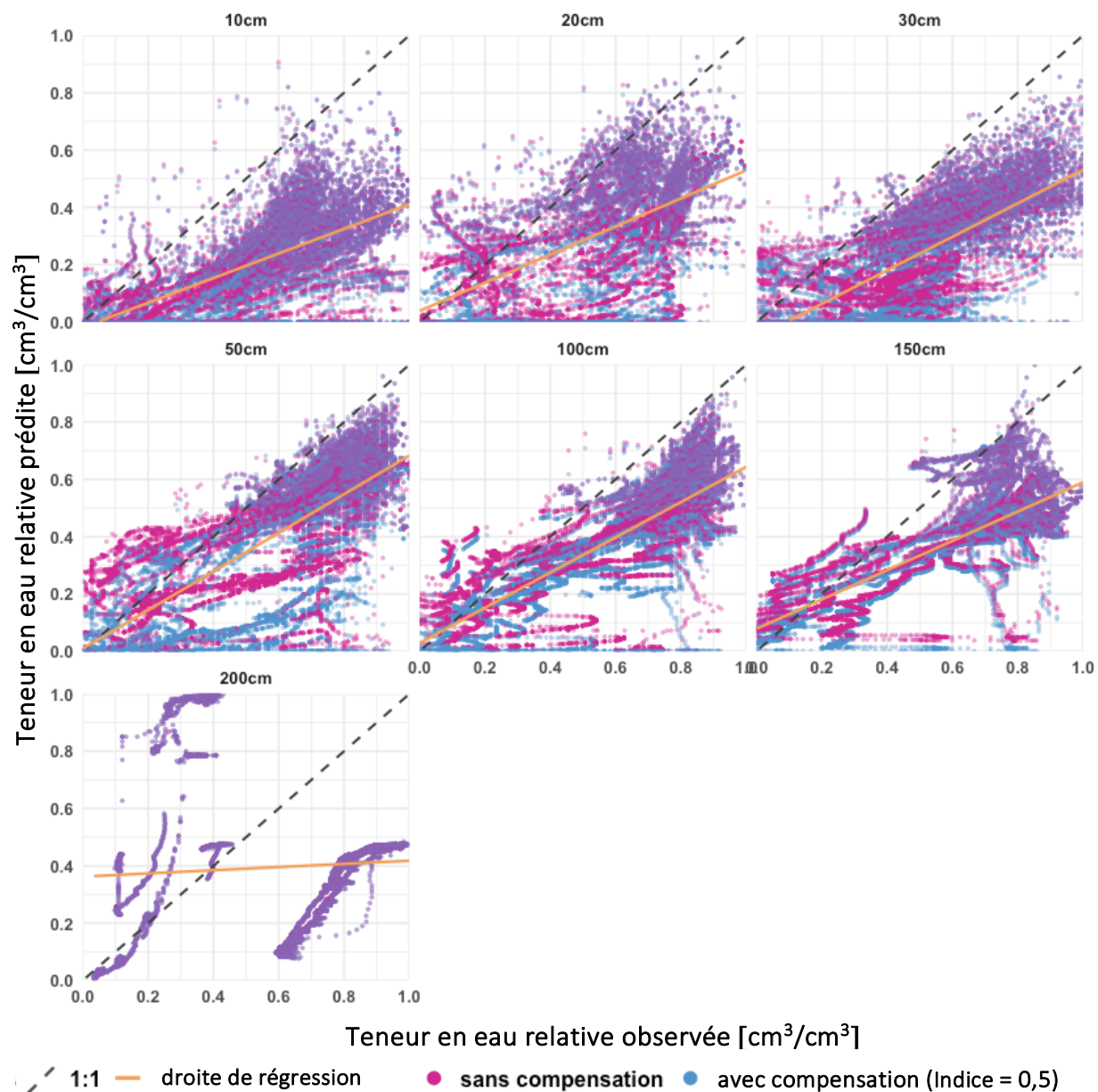


Figure 12 : Corrélations, par profondeur, entre les séries de données de teneur en eau relatives (θ_{rel} , en %) mesurées (en x) et les séries de données de teneur en eau (%) simulées (en y). Les points roses représentent les corrélations avec les simulations pour le scénario sans compensation racinaire (avec un indice de 0) et les points bleus représentent le scénario avec compensation racinaire (avec un indice de 0,5). La droite de régression (en jaune), relative à chaque graphique et une droite 1:1 (en pointillés noirs) sont aussi représentées.

Les coefficients de détermination (R^2) et les équations de régression obtenus à différentes profondeurs pour la teneur en eau et les potentiels matriciels sont présentés dans les tableaux 4 et 5.

Tableau 4 : Statistiques (équation de régression et R^2) relatives aux corrélations, par profondeur (cm), entre les séries de données de potentiel matriciel (pF) mesurées (en x) et les séries de données de potentiel matriciel (pF) simulées (en y). Les lignes roses sont relatives au scénario sans compensation (A) et les lignes bleues, au scénario avec compensation (B).

Prof. (cm)	Scénario	Equation	R^2
10	A	$y = 0,82x + 0,59$	0,49
	B	$y = 0,93x + 0,43$	0,49
20	A	$y = 0,63x + 1,17$	0,31
	B	$y = 0,72x + 1,09$	0,31
30	A	$y = 0,59x + 1,12$	0,35
	B	$y = 0,78x + 0,91$	0,35
50	A	$y = 0,57x + 1,18$	0,38
	B	$y = 0,91x + 0,55$	0,42
100	A	$y = 0,48x + 1,27$	0,37
	B	$y = 0,65x + 0,94$	0,41
150	A	$y = 0,53x + 1,08$	0,58
	B	$y = 0,62x + 0,89$	0,58
200	A	$y = 1x + 0$	1
	B	$y = 1x + 0$	1

Tableau 5 : Statistiques (équation de régression et R^2) relatives aux corrélations, par profondeur (cm), entre les séries de données de teneur en eau (%) mesurées (en x) et les séries de données de teneur en eau (%) simulées (en y). Les lignes roses sont relatives au scénario sans compensation (A) et les lignes bleues, au scénario avec compensation (B).

Prof. (cm)	Scénario	Équation	R^2
10	A	$y = 0,79x - 0,01$	0,45
	B	$y = 0,82x - 0,03$	0,45
20	A	$y = 0,69x - 0,04$	0,37
	B	$y = 0,75x + 1,09$	0,36
30	A	$y = 0,90x + 0,05$	0,48
	B	$y = 1,01x + 0,02$	0,48
50	A	$y = 0,81x - 0,03$	0,57
	B	$y = 1,01x - 0,18$	0,59
100	A	$y = 0,93x - 0,07$	0,61
	B	$y = 1,04x - 0,16$	0,63
150	A	$y = 0,62x + 0,08$	0,58
	B	$y = 0,67x + 0,04$	0,59
200	A	$y = 0,08x + 0,37$	0,01
	B	$y = 0,08x + 0,37$	0,01

Globalement, les corrélations ne sont pas particulièrement élevées, avec des R^2 compris entre 0,31 et 0,49 pour les horizons superficiels (10–20 cm). Ces résultats étaient attendus compte tenu de la forte influence de ces couches par les conditions atmosphériques.

Les performances s'améliorent avec la profondeur, atteignant des R^2 de 0,58 à 0,63 pour les teneurs en eau et de 0,37 à 0,58 pour les potentiels entre 100 et 150 cm. Cette tendance est cohérente avec des dynamiques plus lentes, moins affectées par les variations météorologiques immédiates et donc plus faciles à représenter par le modèle.

À 200 cm, les teneurs en eau affichent un R^2 très faible, probablement lié à un défaut après le remplacement du capteur en février 2023. Les potentiels corréleront parfaitement à cette même profondeur, ce qui s'explique par l'utilisation de cette série de valeurs comme condition limite du modèle.

Ces statistiques sont globalement moins satisfaisantes que celles obtenues par B. Delvoie (2023), dont les R^2 étaient supérieurs (0,72–0,75). Ces valeurs plus faibles peuvent s'expliquer par une échelle d'analyse différente, horaire dans le présent travail contre journalière dans l'étude précédente. À une échelle plus agrégée, le lissage des séries tend à augmenter R^2 . S'ajoute à cela l'échelle de simulation d'une période de six ans pour cette étude au lieu d'un an et demi pour la précédente.

L'examen visuel des séries de teneur en eau et de potentiel matriciel montre que la dynamique saisonnière est globalement bien reproduite. Les saisons sèches et humides se distinguent dans les deux types de sorties. Un décalage temporel apparaît toutefois au début des saisons sèches particulièrement entre 20 et 50cm, où la réponse simulée semble retardée par rapport aux observations. Cette différence peut traduire une conductivité hydraulique $K(h)$ trop faible dans les horizons concernés, ce qui ralentit la vidange simulée du sol.

La tendance simulée dans le domaine sec est en accord avec les observations. Les écarts concernent surtout le domaine humide. Ils s'expliquent par la limite de mesure des capteurs autour de pF 2–2,1, alors que la simulation n'est pas contrainte par cette borne et restitue le comportement au-delà de pF 2. Dans ces conditions, les sorties du modèle sont probablement plus proches de la réalité que les observations instrumentées.

Une sous-estimation de K_{sat} dans les horizons supérieurs pourrait aussi contribuer à une moindre réactivité. L'introduction d'une représentation à double porosité, avec une composante macroporeuse dotée d'un K_{sat} plus élevé, pourrait améliorer la réponse lors des épisodes pluvieux.

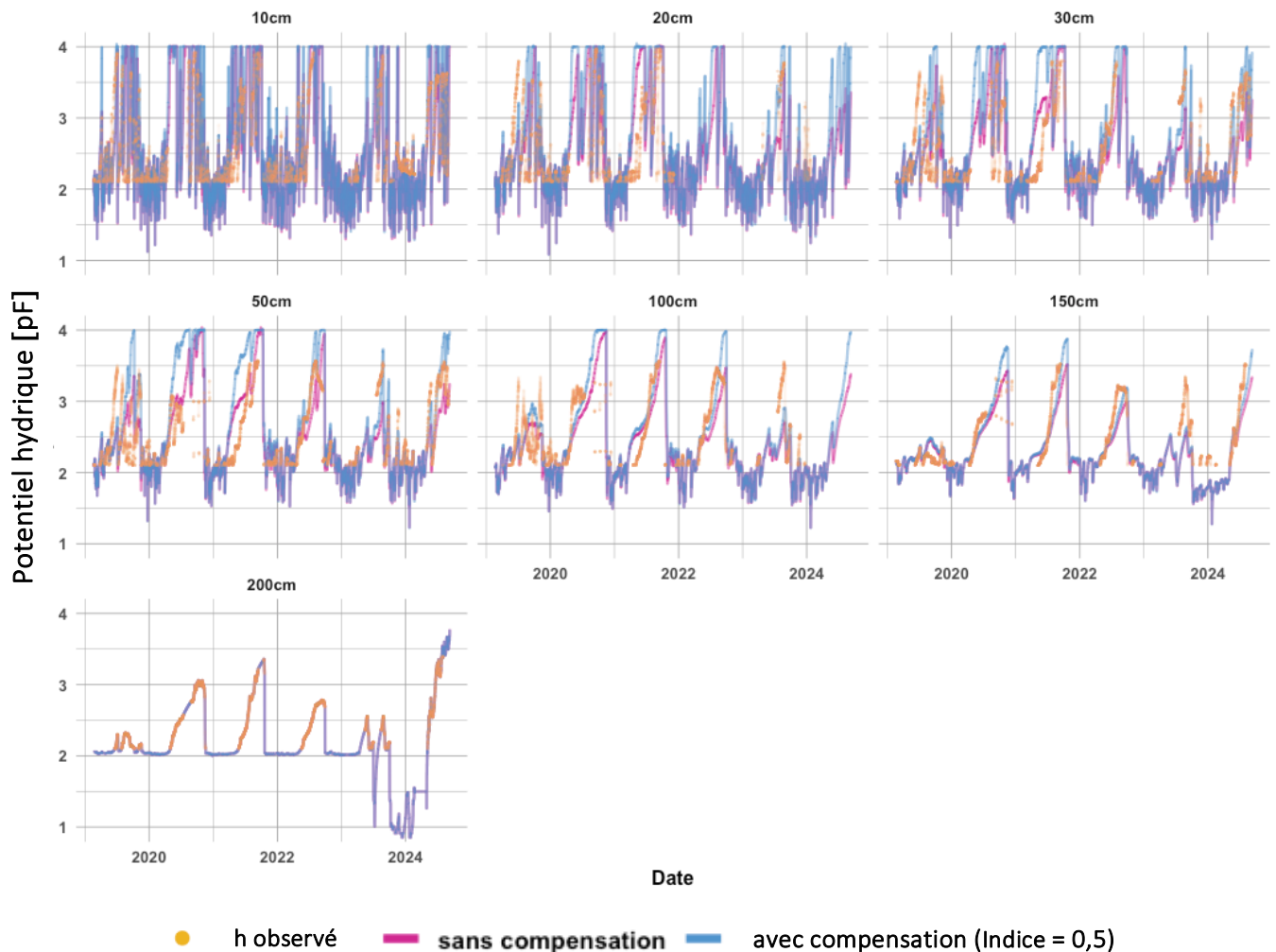


Figure 13 : Séries temporelles des potentiels matriciels (pF, en y), à chaque profondeur étudiée, représentés en fonction du temps (en x) durant les 6 ans de simulation. La courbe rose représente le scénario sans compensation racinaire et la courbe bleue représente le scénario avec compensation racinaire (avec un indice ISH de 0,5). Les points jaunes représentent les données de potentiel matriciel (pF) mesurées sur le terrain.

À 200 cm, les trois premières années montrent une bonne correspondance entre tendances simulées et mesurées pour les deux variables mais les deux dernières années présentent une incohérence. Les potentiels indiquent une saturation persistante alors que les teneurs en eau suggèrent un sol plus sec. Ce comportement est probablement lié à un dysfonctionnement du capteur installé en février 2023. Cette incohérence aurait pu justifier la suppression des derniers mois de la série temporelle. Le filtrage qui tronque les valeurs au-delà

de pF 2,1 n'a pas été appliqué à 200 cm afin de conserver la série la plus complète possible, cette profondeur étant utilisée comme condition aux limites inférieure.

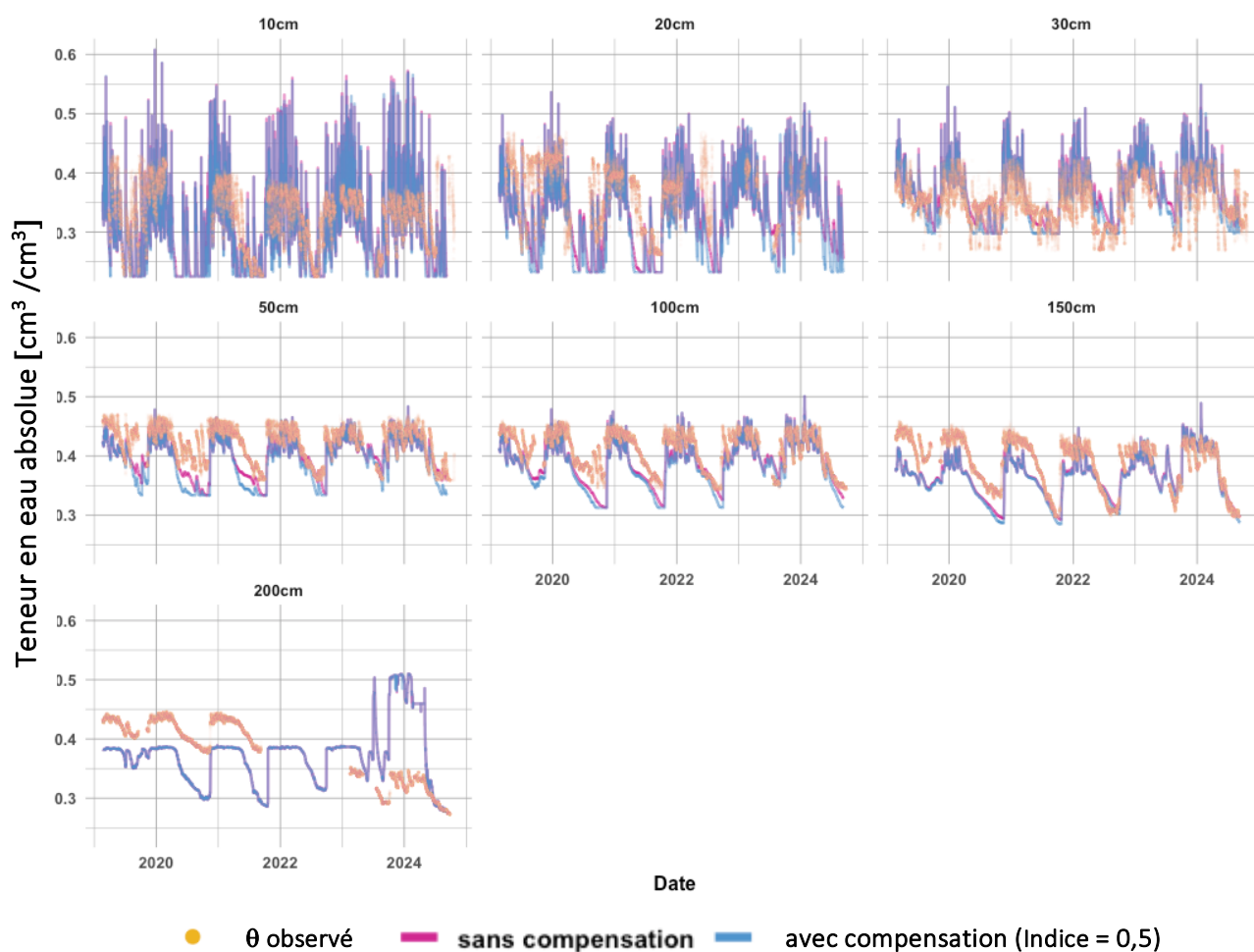


Figure 14 : Séries temporelles des teneur en eau absolue (en cm^3/cm^3 , en y), à chaque profondeur étudiée, représentés en fonction du temps (en x) durant les 6 ans de simulation. La courbe rose représente le scénario sans compensation racinaire et la courbe bleue représente le scénario avec compensation racinaire (avec un indice ISH de 0,5). Les points jaunes représentent les données de teneur en eau absolue (en cm^3/cm^3) mesurées sur le terrain.

Une analyse plus détaillée des séries temporelles a été réalisée, en se focalisant sur l'épisode de sécheresse de 2021, afin d'évaluer les deux scénarios étudiés.

À 10 cm, les deux scénarios produisent des séries quasiment indissociables dans le domaine sec, traduisant une réponse similaire de cette couche aux conditions atmosphériques.

À 30 et 50 cm, les divergences sont plus marquées. Le scénario avec compensation mobilise davantage d'eau et conduit à un assèchement plus rapide et plus intense. Le sol, dans ces conditions, atteint donc des teneurs en eau plus faibles et des potentiels matriciels plus élevés que ceux mesurés.

En comparaison, le scénario sans compensation restitue plus fidèlement la progression graduelle vers la sécheresse observée au cours des premiers mois (avril–juin 2021).

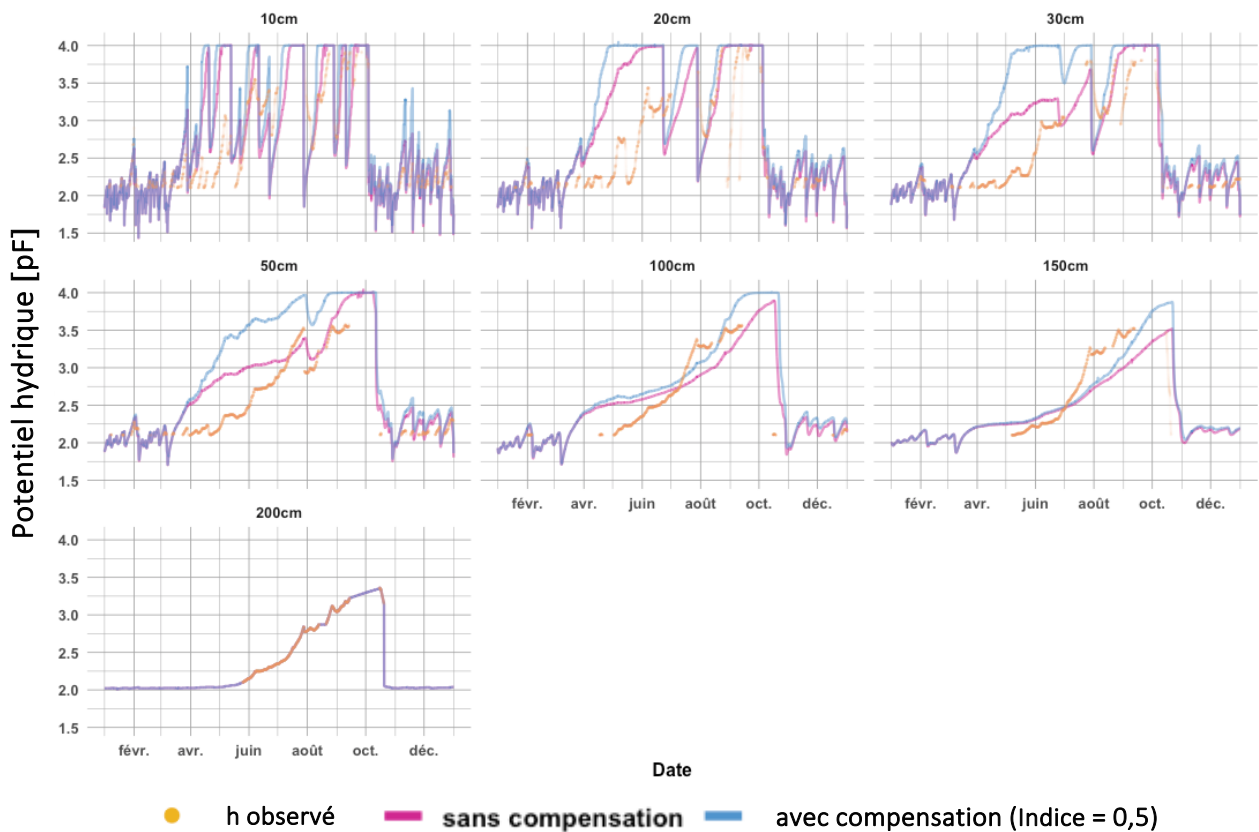


Figure 15 : Séries temporelles des potentiels matriciels (pF, en y), à chaque profondeur étudiée, représentés en fonction du temps (en x) focalisées sur un épisode de sécheresse (l'année 2021). La courbe rose représente le scénario sans compensation racinaire et la courbe bleue représente le scénario avec compensation racinaire (avec un indice ISH de 0,5). Les points jaunes représentent les données de potentiel matriciel (pF) mesurées sur le terrain.

Aux horizons plus profonds (100 et 150 cm), le scénario avec compensation reproduit relativement bien la dynamique mesurée. Cependant l'allure générale des courbes du scénario sans compensation reste plus cohérente avec les tendances observées. Ainsi, même si le scénario avec compensation présente parfois de meilleures performances statistiques, il tend à surestimer l'assèchement aux horizons intermédiaires. Le scénario sans compensation restitue de manière plus équilibrée la dynamique observée, en surface comme en profondeur. Dans la suite des analyses, une confiance est donc davantage accordée au scénario sans compensation pour représenter la réponse hydrique du profil en conditions de sécheresse.

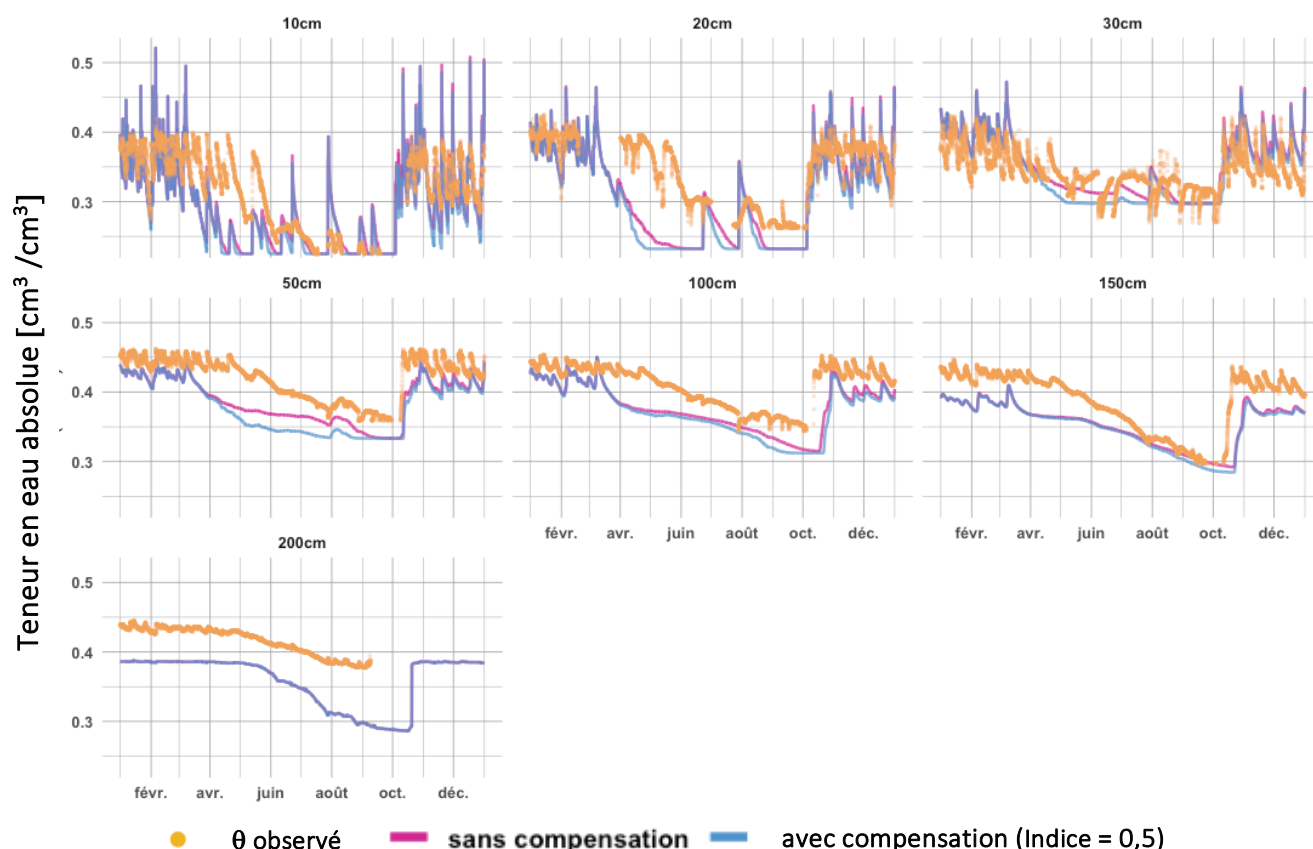


Figure 16 : Séries temporelles des teneur en eau (% en y), à chaque profondeur étudiée, représentés en fonction du temps (en x) focalisées sur un épisode de sécheresse (l'année 2021). La courbe rose représente le scénario sans compensation racinaire et la courbe bleue représente le scénario avec compensation racinaire (avec un indice ISH de 0,5). Les points jaunes représentent les données de potentiel matriciel (pF) mesurées sur le terrain.

ii. Dynamique des flux du bilan hydrique

La figure 17 illustre la moyenne interannuelle des principaux flux mensuels du bilan hydrique simulés sur la période 2019–2024, pour les deux scénarios choisis (avec et sans compensation racinaire). Les valeurs mensuelles représentent la moyenne interannuelle de la somme mensuelle des données horaires pour l'infiltration, le drainage profond, les remontées capillaires et l'évapotranspiration réelle, ainsi que la moyenne interannuelle mensuelle du stock d'eau dans le sol. Les barres d'erreur représentent, pour chaque mois, l'intervalle minimum–maximum observé sur 2019–2024.

Globalement, une variabilité saisonnière est constatée, avec des infiltrations et un drainage concentrés en saison humide (septembre–mars) et une évapotranspiration soutenue toute l'année mais réduite de moitié en saison sèche. L'équilibre de ces flux résulte en un stock d'eau maximal en milieu de saison humide puis décroissant jusqu'en septembre.

Le résultats du modèle précédemment réalisé par B. Delvoie (2023) sur la parcelle R40 rapportent des flux hydrologiques du même ordre de grandeur et une dynamique saisonnière similaire à ceux simulés dans cette étude.

Une analyse en profondeur de chacun de ces flux permet d'identifier les mécanismes sous-jacents, de comparer les deux scénarios de simulation et de mettre les résultats en perspective avec les travaux antérieurs et la littérature scientifique.

Les différences entre le flux moyen de précipitations et d'infiltration montre que lors des mois les plus humides, un ruissellement est parfois généré. Lors d'épisodes très intenses ou lorsque le sol est proches de la saturation, la pente d'environ 15 % pourrait générer un ruissellement plus important que ce qui est simulé ici mais l'effet attendu reste modéré. À l'échelle mensuelle, l'erreur liée à l'hypothèse de surface plane et à l'absence de ruissellement est probablement faible, même si des écarts ponctuels peuvent apparaître à l'échelle journalière en cas de pluies extrêmes.

L'infiltration moyenne simulée atteint $23 \text{ cm}\cdot\text{mois}^{-1}$ en saison humide et $5 \text{ cm}\cdot\text{mois}^{-1}$ en saison sèche, des valeurs très proches de celles rapportées par B. Delvoie (2023) pour la même parcelle ($21,48$ et $5,1 \text{ cm}\cdot\text{mois}^{-1}$ respectivement), malgré une différence méthodologique notable : dans la présente étude, les précipitations ont été corrigées pour l'interception par la canopée, alors que ce n'était pas dans l'étude de B. Delvoie. L'écart limité observé pourrait s'expliquer par la différence de période considérée (6 ans ici contre 2,5 ans dans l'étude précédente), qui atténue la visibilité de l'effet de l'interception sur les flux moyens. Il est important de noter que l'infiltration reste identique les deux scénarios. L'indice de stress hydrique influençant uniquement la répartition de l'eau prélevée par la végétation dans le profil, il ne modifie en rien les entrées d'eau dans le sol.

Au-delà des moyennes, l'infiltration présente une forte variabilité interannuelle. Les barres min-max mensuelles montrent un étalement important en saison humide, en lien avec l'irrégularité des pluies convectives. L'écart-type interannuel des cumuls mensuels d'infiltration reste faible en saison sèche et augmente nettement entre septembre et mars, lorsque quelques épisodes intenses contribuent à une part majeure du cumul mensuel. Cette dispersion se répercute sur le drainage et sur l'amplitude du rechargement du stock d'eau, plus marqués certaines années que d'autres. Des épisodes pluvieux horaires ont été redistribués sur plusieurs pas de temps lorsque leur intensité dépassait les capacités numériques du schéma d'infiltration. Le pourcentage de valeurs concernées représentent 0,06% de la série temporelle totale. Les cumuls ont été conservés. Cette opération limite les pointes instantanées et peut lisser marginalement la réponse à l'échelle horaire, sans effet notable sur les bilans aux échelles journalière et mensuelle.

L'infiltration étant identique dans les deux scénarios, la variabilité décrite ci-dessus s'observe de manière similaire avec et sans compensation racinaire.

Comme attendu, les premières différences notables entre les deux scénarios apparaissent au niveau de l'évapotranspiration réelle (ET_r). Le scénario intégrant une compensation racinaire avec un indice de stress hydrique (ISH) de 0,5 permet à la forêt secondaire âgée d'environ 40 ans (R40) de transpirer en moyenne 6,42 cm·an⁻¹ de plus que dans le scénario sans compensation, soit 5,24% de l'ET_p. Cette différence est particulièrement marquée d'avril à novembre, période correspondant globalement à la fin de la saison humide et à la saison sèche.

En moyenne, l'ET_r représente 50 % de la pluie infiltrée en saison sèche et 127 % en saison humide. Ce dernier ratio, supérieur à 100 %, indique que la végétation mobilise non seulement l'eau issue des précipitations récentes mais également l'eau déjà stockée dans le sol, conduisant à un déficit temporaire du stock hydrique durant la saison humide. Ce déficit est compensé par une remontée progressive des réserves en fin de saison sèche (septembre), et plus nettement encore en octobre, au début de la saison humide.

Le ratio ET_r/infiltration de 50 % observé en saison sèche est cohérent avec les résultats de B. Delvoie (2023) obtenus sur la même parcelle R40. Il s'accorde également avec les valeurs rapportées pour la forêt atlantique dans l'État de Minas Gerais, non loin du site d'étude, où Melo et al. (2019) ont relevé un ratio similaire. Ces auteurs soulignent que ce ratio est modulé par des facteurs tels que l'indice foliaire (LAI), le rayonnement net et la température de l'air.

Dans le cas de R40, les deux espèces dominantes, *Alchornea glandulosa* Poepp. et *Psychotria vellosiana* Benth. (Bandoria, 2020), sont persistantes (Carvalho, 2003), conservant leur feuillage toute l'année. Cela limite probablement la variabilité saisonnière de l'ET_r liée au LAI. En revanche, les séries temporelles montrent une forte saisonnalité du rayonnement solaire et de la température, deux paramètres susceptibles d'expliquer une part importante de la variabilité mensuelle de l'ET_r.

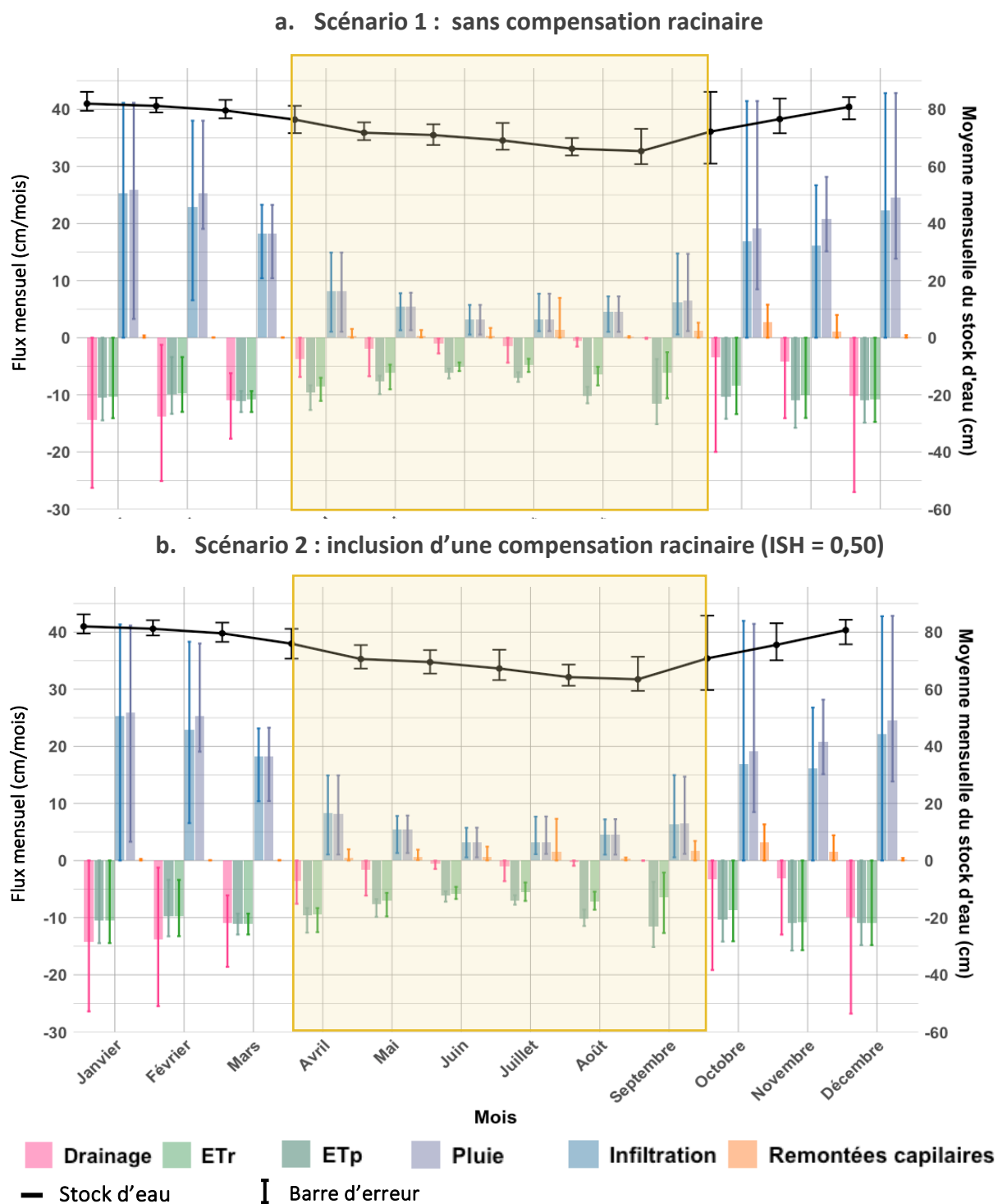


Figure 17: Graphiques des flux cumulés mensuels (cm/mois) moyennés sur les 6 années de simulation (2019-2024) et évolution de la moyenne (sur 6 ans également) mensuelle du stock d'eau (cm). Le graphique a représenté le scénario sans compensation racinaire et le graphique b représente le scénario avec compensation racinaire (indice de 0,5). Les flux contribuant à l'augmentation du stock d'eau dans le sol sont positifs et ceux contribuant à sa diminution sont négatifs. Les bâtonnets roses représentent le drainage, les verts foncés l'évapotranspiration potentielle (ETp), les verts clairs l'évapotranspiration réelle (ETr), les bleus foncés la pluie, les bleus clairs l'infiltration et les oranges les remontées capillaires. La ligne noire représente le stock d'eau dans le sol. Les barres d'erreur représentent les valeurs maximales et minimales de chaque flux. Le rectangle jaune représente la saison sèche.

Le drainage profond total simulé pour le scénario sans compensation racinaire est de 347,63 cm sur six ans, soit environ 58 cm/an. Ces flux sont fortement concentrés pendant la saison humide et se poursuivent légèrement au début de la saison sèche, tant que le stock d'eau reste supérieur à environ 70 cm. Dans ce scénario, le drainage représente en moyenne 38 % de l'infiltration annuelle, contre 34 % dans le scénario avec compensation (ISH = 0,5). En saison humide, les valeurs atteignent en moyenne respectivement 10,57 et 10,26 cm par mois, tandis qu'en saison sèche elles chutent à 1,43 et 1,19 cm par mois.

Ces valeurs peuvent être mises en perspective avec celles rapportées par B. Delvoie (2023) sur la même parcelle R40, qui avait estimé un drainage compris entre 11,38 et 12,22 cm/mois en saison humide et entre 0,69 et 0,95 cm/mois en saison sèche. Le modèle de 2025 tend à calculer légèrement moins de drainage en saison humide et légèrement plus en saison sèche.

L'allure intra-annuelle des flux simulés suit la logique d'une forêt tropicale humide implantée sur sol bien drainé. Le drainage devient très faible, inférieur à 2 cm/mois, à partir de mai, lorsque le stock d'eau dans le sol atteint environ 70 cm ou moins, puis réaugmente à partir d'octobre en parallèle de la recharge du stock. Ce comportement est en accord avec les observations et simulations hydrologiques réalisées en forêt atlantique par Rodrigues et al. (2021).

La différence de drainage observée entre les deux scénarios s'explique par une moindre percolation dans le scénario avec compensation, dans lequel la plante peut puiser plus efficacement dans les réserves hydriques profondes ou potentiellement dans des sources situées en dehors du profil simulé (nappe phréatique peu profonde, si accessible). Lorsque le sol atteint un degré de séchage élevé (pF élevé), la végétation peut compenser le stress hydrique en extrayant l'eau à partir de couches plus profondes, voire d'une nappe phréatique. Ce mécanisme est documenté dans une étude de Markewitz et al. (2010). Celle-ci a montré, dans la forêt amazonienne, que les plantes basculent vers un prélèvement profond (entre 2,5 et 11,5 m) lorsque le sol superficiel se dessèche, contribuant à environ 20 % de la transpiration totale. De même, Kühnhammer et al. (2023), dans une forêt tropicale expérimentale du Biosphere 2, ont observé que les arbres pouvaient attribuer entre 21 % et 90 % de leur eau à des sources profondes (jusqu'à 3,3 m) en période de sécheresse, ce qui leur permettait de maintenir un potentiel hydrique foliaire stable.

Dans le contexte de R40, la réduction du drainage dans le scénario avec compensation explique probablement une meilleure mobilisation des réserves profondes. La végétation puise davantage dans l'eau stockée, limitant les pertes profondes. Cette dynamique traduit une meilleure utilisation des ressources hydriques disponibles par la forêt régénérée, en phase avec les stratégies d'adaptation observées dans d'autres forêts tropicales humides.

En moyenne, le drainage annuel simulé (environ 58 cm) correspond à des flux d'eau mobilisés vers les horizons profonds ou vers la nappe, bien que cette dernière soit localement profonde et non directement réinjectée. Le ratio drainage/infiltration (environ 35–38 %) s'inscrit dans la plage des estimations de recharge profonde observées dans les forêts tropicales humides, souvent comprises entre 20 % et 40 % des précipitations annuelles, selon les études menées dans la Mata Atlantica montagnarde et dans d'autres biomes tropicaux (Mello et al., 2019 ; Rodrigues et al., 2021). La diminution rapide du drainage lorsque le sol s'assèche traduit la réduction de la capacité de transfert du système poreux aux potentiels élevés ainsi que la réduction de la percolation en saison sèche, un comportement caractéristique des Ferralsols bien structurés et à forte capacité d'infiltration.

Les remontées capillaires simulées présentent une dynamique saisonnière marquée, avec un pic clairement identifié en octobre, où elles atteignent en moyenne 3,21 cm pour le scénario avec compensation racinaire. Ce mois est suivi de juillet, novembre, puis septembre en termes de magnitude moyenne. Globalement, la moyenne des RC en saison humide atteint 0,98 cm/mois dans le scénario avec compensation, contre 0,78 cm/mois sans compensation ; en saison sèche, ces valeurs s'élèvent à 0,87 cm/mois avec compensation et 0,62 cm/mois sans. Ces valeurs restent toutefois faibles par rapport aux autres flux. Elles sont nettement inférieures aux cumuls d'infiltration et d'évapotranspiration et contribuent peu aux bilans mensuels.

Ces remontées capillaires sont plus importantes en fin de saison sèche (fin août à octobre). Ce phénomène correspond bien à une logique de stabilisation hydrique. Lorsque le sol est asséché, l'eau remonte depuis les couches profondes ou la nappe, ce qui permet de maintenir un niveau d'humidité jusqu'au déclenchement des pluies. Une telle dynamique a été documentée dans d'autres contextes. Par exemple, Vergnes et al. (2014) proposent une méthode pour modéliser ces flux capillaires ascendants à partir d'une nappe peu profonde dans les zones non saturées, suggérant qu'ils contribuent à humidifier le profil racinaire en début de saison humide. Cette étude montre également que ces flux réduisent la recharge des nappes, augmentent l'humidité du sol et accroissent l'évapotranspiration moyenne annuelle.

En comparant la tendance que prennent ces flux de remontées capillaires dans les deux scénarios étudiés ici, une corrélation entre RC et ETr est également observable. En période sèche, lorsque les températures et le rayonnement augmentent (accélérant l'évapotranspiration), le sol se déshydrate davantage, accentuant les gradients capillaires. Ces derniers favorisent les flux ascendants, comme le décrivent plusieurs études en forêts tropicales, soulignant le lien entre stress hydrique et activation des RC.

La différence observée entre les deux scénarios (avec plus de RC dans le scénario à compensation racinaire) est cohérente avec les tendances du drainage. En effet, la végétation exploite en priorité l'eau disponible en profondeur dans le sol, limitant les pertes par drainage. Ainsi, quand la sécheresse s'y installe, les remontées capillaires permettent de préserver l'humidité racinaire au moment opportun.

En ce qui concerne les mesures antérieures sur R40, B. Delvoie a quantifié des remontées capillaires entre juin et octobre lors d'une saison, et à partir d'août pour une autre (2021). Aucune remontée n'a été observée en 2019, année particulièrement humide. Ces observations confirment que les RC sont essentiellement mobilisées en période sèche ou de transition sèche-humide. En pourcentages de la pluie infiltrée, nos simulations donnent des RC équivalentes à 0,83 % (sans compensation) et 1,28 % (avec compensation), des valeurs proches de celles observées par B. Delvoie, ce qui valide la cohérence des résultats.

iii. Stress hydrique

L'évaluation du stress hydrique cumulé, défini comme la différence entre l'évapotranspiration potentielle (ETp) et l'évapotranspiration réelle (ETr), confirme l'impact global de la compensation racinaire. Sur l'ensemble de la période simulée (2019–2024), le stress hydrique cumulé atteint environ 76,06 cm dans le scénario avec compensation contre 112,29 cm dans le scénario sans compensation. Ces valeurs traduisent un effet mesurable de ce paramètre sur l'équilibre hydrique. Elles montrent qu'en terme absolu, la compensation permet aux plantes de transpirer plus à long terme et de réduire leur stress.

L'analyse des séries temporelles du ratio ETr/ETp met en évidence une saisonnalité marquée. En saison sèche, le ratio est généralement faible et très variable, signe d'un stress hydrique soutenu et persistant. En saison humide, les phases de stress sont plus dispersées, traduisant une transpiration proche du potentiel maximal lorsque l'eau est disponible en quantité suffisante dans le sol.

La comparaison entre scénarios montre qu'en périodes de stress simultané, le scénario avec compensation racinaire présente fréquemment un ratio ETr/ETp plus faible (indicatif un stress plus important) que le scénario sans compensation. Ce comportement, qui pourrait paraître contre-intuitif, s'explique par la dynamique propre à la compensation racinaire. Dans ce scénario, l'eau est prélevée dans les zones moins stressées lorsque les horizons les plus proches deviennent limitants. Ce mécanisme, décrit par la prise d'eau racinaire compensatoire implémentée dans HYDRUS (Šimůnek & Hopmans, 2008), permet de maintenir la transpiration tant que des réserves accessibles subsistent dans le profil racinaire. La valeur de stress hydrique cumulée confirme cela. Toutefois, cette exploitation plus intensive des ressources hydriques

peut conduire à un épuisement global plus rapide. Lorsque l'ensemble des horizons atteint le point de flétrissement, la transpiration chute alors plus brutalement que dans le scénario sans compensation, ce qui se traduit par des ratios plus faibles lors des épisodes de sécheresse prolongée.

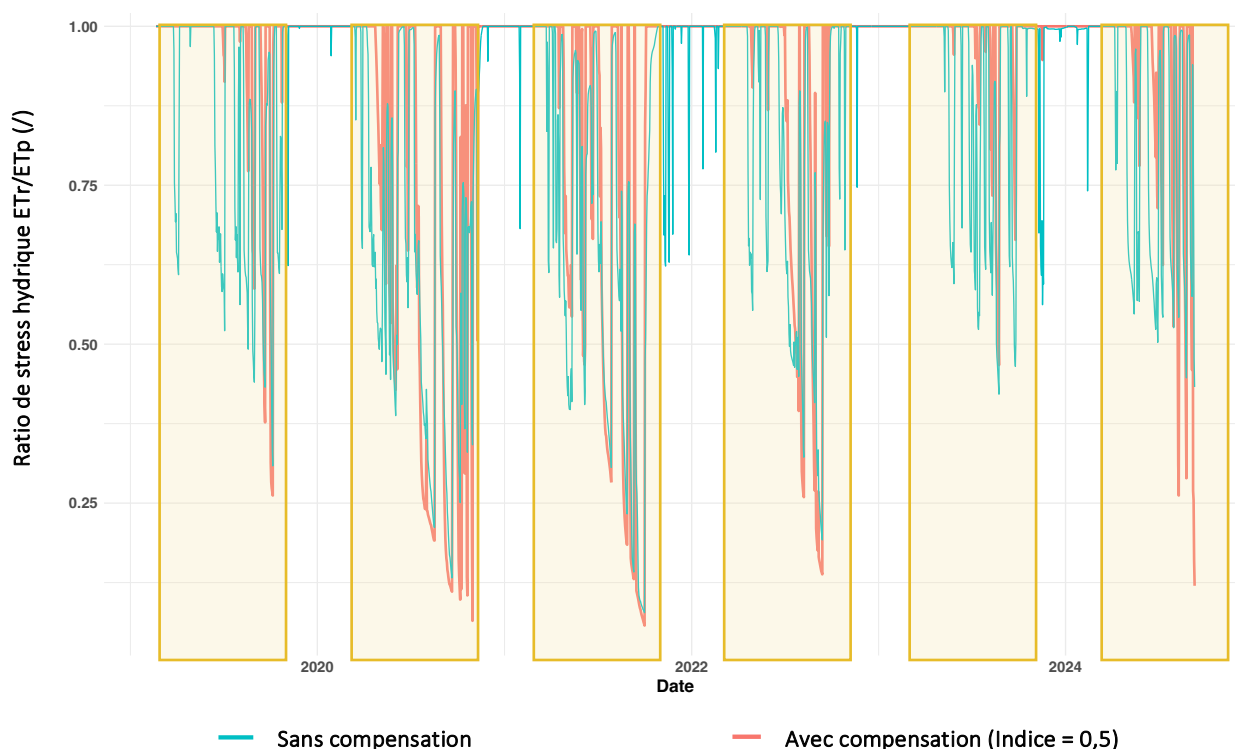


Figure 18 : Stress hydrique, représenté par le ratio E_{Tr}/E_{Tp} (en y) en fonction du temps (en x) durant les 6 années de simulation. La courbe bleue représente le scénario sans compensation et la courbe rouge représente le scénario avec compensation. Les rectangles jaunes représentent les saisons sèches.

À l'inverse, dans le scénario sans compensation, certaines zones du profil peuvent rester partiellement humides lorsque d'autres sont asséchées car les racines n'exploitent pas l'ensemble du profil de manière opportuniste. Les végétaux présents dans les zones encore humides peuvent alors continuer à transpirer, ce qui maintient un ratio E_{Tr}/E_{Tp} global légèrement supérieur dans ces situations extrêmes.

Ces dynamiques sont cohérentes avec les résultats obtenus par B. Delvoie (2023) sur la parcelle R40, qui montrait que le stress hydrique se concentre exclusivement en saison sèche et prend la forme de pics correspondant à des périodes prolongées sans pluie. Dans son étude, le ratio E_{Tr}/E_{Tp} montrait des paliers lors des épisodes de stress. Pour la majorité des épisodes, les valeurs observées variaient entre 0,7 et 0,4 avec des minima ponctuels autour de 0,3 lors de quatre sécheresses particulièrement marquées (2020 et 2021). Dans la présente étude, les

valeurs minimales sont nettement plus basses. Pour le scénario avec compensation, les périodes de stress intense se traduisent d'emblée par des valeurs comprises entre 0,6 et 0,25, et lors des épisodes les plus sévères, comparables à ceux identifiés par B. Delvoie, le ratio descend jusqu'à 0,06. Dans le scénario sans compensation, les minima atteignent 0,08. Cette différence suggère que la représentation des processus racinaires et des paramètres pédologiques dans le modèle actuel amplifie la chute du ratio lors des sécheresses extrêmes, probablement du fait d'un assèchement plus rapide et plus complet du profil exploité par les racines.

Les analyses de profils de prise d'eau racinaire modélisés par B. Delvoie ont confirmé que, lors d'un épisode de sécheresse en 2020, la différence entre ET_p et ET_r pouvait atteindre jusqu'à 90 cm sur R40 mais restait relativement faible. Ces observations, combinées aux résultats présentés ici, suggèrent que la compensation racinaire permet une meilleure exploitation des réserves hydriques disponibles à court terme mais peut accélérer l'épuisement global du profil en cas de sécheresse prolongée. Cette stratégie maximise la transpiration potentielle tant que des ressources sont accessibles mais conduit à un stress plus prononcé lorsque l'ensemble du profil est sec.

L'analyse conjointe des résultats de stress hydrique cumulé et du ratio ET_r/ET_p montre l'ajout d'une compensation racinaire au modèle facilite l'extraction d'eau dans les zones moins sèches dans le profil et permet à la végétation d'augmenter son ET_r . Cependant, cette stratégie se couple avec des épisodes stress plus intenses en période de sécheresse prolongée.

VI. Perspectives

Les résultats obtenus dans cette étude confirment l'intérêt d'une approche par modélisation physique pour analyser le fonctionnement éco-hydrologique d'une forêt régénérée et évaluer l'impact potentiel de la reforestation sur le bilan hydrique. Toutefois, plusieurs limites méthodologiques et contraintes techniques ont été rencontrées, ouvrant la voie à des pistes d'amélioration pour de futurs travaux.

La première piste d'amélioration concerne les échantillons collectés cette année sur la parcelle étudiée. Bien que des triplicats aient été obtenus par profondeur afin de renforcer la robustesse des mesures (K_{sat} et Hyprop), seule une série unique a pu être analysée pour les données Hyprop, faute de temps et de disponibilité du matériel. Cette limitation réduit la précision du modèle, d'autant que les paramètres hydrodynamiques du sol sont généralement très variables. Pour les mesures de K_{sat} par exemple, des variations de l'ordre de grandeur peuvent exister d'un échantillon à l'autre, jusqu'à un facteur $\times 10$ dans certaines situations. Disposer des triplicata pour chaque profondeur permettrait non seulement de commenter la variabilité des données utilisées dans la modélisation mais aussi d'en intégrer l'incertitude dans l'analyse de sensibilité du modèle.

Une deuxième perspective intéressante repose sur une prairie adjacente, déforestée en même temps que R40 mais sans régénération naturelle. Les échantillons y ont également été collectés cette année (7 profondeurs $\times$ 3 répétitions) et un modèle Hydrus, qui lui est propre, était en construction. Poursuivre ces travaux permettrait de finalement pouvoir comparer les flux hydriques entre une forêt régénérée et une prairie. Cette comparaison est essentielle pour évaluer la pertinence de la reforestation comme stratégie de restauration hydrologique durable, en particulier pour déterminer si une forêt régénérée améliore la recharge de la nappe comparée à un état antérieur.

Une autre amélioration possible concerne la validation directe de l'évapotranspiration réelle (ET_r). Pour l'instant, elle est estimée comme l'ET₀ calculée à partir de l'équation de Penman–Monteith, pondérée par un coefficient dérivé des travaux de L. Parmentier (2024). Des capteurs de flux de sève sont déjà installés sur R40, fournissent une estimation de la transpiration continue. Leurs séries de données nécessitent un prétraitement approfondi. Une fois ces étapes réalisées, ces données pourront être mises en regard des sorties du modèle et le cas échéant, confrontées aux références méthodologiques de SAPFLUXNET. L'usage de dendromètres constitue aussi une piste complémentaire pour documenter la dynamique hydrique des tiges, sous réserve d'un traitement spécifique des signaux.

Il serait également pertinent de renforcer la quantification de la densité racinaire. La méthode utilisée dans cette étude pourrait être complétée par une approche de comptage racinaire au moyen d'une grille pour augmenter la précision. Ce paramètre est un arrache mécanique critique dans la modélisation Hydrus mais en pratique souvent sous-estimé à cause de contraintes de temps et de budget.

Ensuite, des mesures directes du potentiel foliaire avec une chambre de pression de type Scholander offrirait un complément solide pour caractériser l'état hydrique. Réalisées à la pré-aube et à midi elles décrivent respectivement l'équilibre avec le sol et la contrainte en forte demande atmosphérique. Associées à la transpiration issue des flux de sève ou de l'ETr elles permettent d'estimer la conductance du continuum sol plante et les résistances hydrauliques le long du trajet racines tiges feuilles. Ces informations fournissent la base nécessaire pour paramétrer dans HYDRUS un schéma de prélèvement racinaire de type Couvreur en remplacement de la fonction empirique de Feddes afin de relier explicitement gradients de potentiel et distribution raculaire aux flux simulés.

La rigueur du gap filling des données météo a été satisfaisante, mais d'autres approches pourraient être envisagées. Par exemple, PyPOTS, une boîte à outils en Python spécialisée dans l'imputation et l'analyse de séries temporelles partiellement observées avec intelligence artificielle, constituent une alternative moderne. Tester PyPOTS pour comparer la qualité des séries imputées au sous-ensemble lacunaire reproduit artificiellement permettrait d'évaluer si cette méthode apporte un gain significatif par rapport à l'approche actuelle.

VII. Conclusion

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'éco-hydrologie d'une parcelle forestière tropicale de la Mata Atlantica brésilienne, dans un contexte de forte déforestation et de pressions actuelles sur les ressources en eau. L'objectif principal était de caractériser, à l'échelle de la parcelle, la dynamique du bilan hydrique d'une forêt régénérée depuis quarante ans (R40) et d'évaluer l'influence de la compensation racinaire sur les flux simulés par HYDRUS-1D. A travers les modélisations obtenues, plusieurs enseignements ont pu être tirés.

L'étude des propriétés hydrodynamiques du sol constitue une première analyse effectuée dans ce mémoire. Les campagnes successives de 2023, 2024 et 2025 ont permis de comparer et de consolider les courbes de rétention et de conductivité hydraulique. Malgré l'incertitude relevée à 50cm et à l'absence de données directes de K_{sat} en 2023, les trois campagnes montrent une cohérence globale, particulièrement en profondeur, où les conditions hydriques se stabilisent. Les divergences des résultats dans les horizons superficiels reflètent l'hétérogénéité naturelle des couches supérieures et montre que ces horizons sont plus difficiles à caractériser.

L'évaluation du modèle par la comparaison des séries temporelles simulées avec les mesures de terrain (teneur en eau et potentiels matriciels) révèle une cohérence qualitative satisfaisante, notamment pour la reproduction des tendances saisonnières et des ordres de grandeur. Les coefficients de corrélation restent cependant modestes (R^2 entre 0,3 et 0,6), en particulier dans les horizons superficiels où la variabilité temporelle est très élevée et difficile à reproduire par un modèle unidimensionnel. Les écarts observés s'expliquent aussi par des incertitudes instrumentales mais certainement aussi par l'utilisation d'un seul échantillon, par profondeur, dans les caractérisations des paramètres hydrodynamiques via les dispositifs HYPROP et KSAT. Ces limites rappellent la sensibilité de la modélisation aux paramètres de sol et soulignent la nécessité de consolider les bases expérimentales pour affiner les simulations.

L'analyse du bilan hydrique en sortie des simulations confirme que les simulations reproduisent correctement la saisonnalité du bilan hydrique, marquée par une infiltration et un drainage concentrés en saison humide, une évapotranspiration soutenue toute l'année mais réduite de moitié en saison sèche et des remontées capillaires ponctuelles en fin de saison sèche. Les ordres de grandeur obtenus sont cohérents avec ceux de la littérature et des travaux antérieurs menés sur la même parcelle, confirmant la robustesse des résultats. La corrélation observée entre les remontées capillaires et l'évapotranspiration souligne leur rôle dans le soutien temporaire de la végétation face aux fortes demandes atmosphériques.

La comparaison des deux scénarios étudiés (avec et sans compensation racinaire) a permis de mieux comprendre l'effet de ce paramètre sur la dynamique de l'eau dans le sol. Dans un premier temps, la confrontation des teneurs en eau et des potentiels hydriques simulés avec les observations de terrain a montré que la compensation améliorait globalement les coefficients de corrélation (R^2) sur l'ensemble de la série temporelle (six ans). En revanche, l'analyse détaillée d'un épisode de sécheresse a révélé que ce scénario reproduisait moins fidèlement les mesures in situ, suggérant que la compensation racinaire n'apporte pas une amélioration significative des performances de Hydrus-1D dans ce contexte particulier.

La comparaison des profils de prélèvements en eau a également mis en évidence un résultat inattendu. Les prises d'eau racinaires se concentraient davantage dans les horizons intermédiaires (30–50 cm), contrairement à ce que rapporte la littérature pour des forêts similaires, où la compensation tend à accentuer l'exploitation des couches profondes. Les modélisations menées sur la parcelle R40 laissent donc penser que la compensation racinaire amènerait les espèces présentes à privilégier une exploration horizontale du sol, en mobilisant l'eau plus loin latéralement dans le profil, plutôt que d'augmenter leur prélèvement en profondeur. Cette hypothèse, si elle se confirmait, mériterait d'être explorée dans de futurs travaux.

Enfin, l'analyse du stress hydrique a montré qu'il apparaît plus fréquemment dans le scénario sans compensation, mais reste globalement modéré, certaines zones du profil conservant probablement de l'eau non exploitée. À l'inverse, dans le scénario avec compensation, les épisodes de stress sont moins nombreux, mais leur intensité est plus forte lors des sécheresses prolongées. Les valeurs minimales du ratio ET_r/ET_p descendent jusqu'à 0,06–0,08, plus faibles que celles rapportées antérieurement pour R40, ce qui suggère une sensibilité accrue liée aux paramètres pédologiques utilisés dans ce mémoire. Toutefois, le cumul du stress hydrique sur six ans est globalement plus faible avec compensation, confirmant que ce mécanisme constitue une stratégie favorable pour optimiser la transpiration sur le long terme, malgré ses limites en conditions extrêmes.

Ces résultats, malgré une concordance parfois limitée entre les simulations et les observations de terrain, apportent des éléments utiles à la compréhension du fonctionnement hydrique d'une forêt secondaire régénérée de la Mata Atlantica. Ils contribuent à caractériser ses propriétés de sol et la dynamique saisonnière de son bilan hydrique, tout en mettant en évidence l'influence du paramètre de compensation racinaire sur la transpiration, le stress hydrique et la répartition spatiale des prélèvements. Ce travail souligne ainsi l'intérêt mais aussi les limites de cette représentation dans Hydrus-1D et confirme la nécessité d'une caractérisation locale approfondie pour interpréter de manière robuste le fonctionnement éco-hydrologique des forêts régénérées.

VIII. Bibliographie

- (1)
Weather Stations | Onset's HOBO Data Loggers.
<https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/weather-stations?srsId=AfmBOoo9DY4gte60ol04FKEImSkVnn5yn6DiqNSKM4e0cvLmXBhFT-38>
(accessed 2025-07-29).
- (2)
Mello, C. R.; Ávila, L. F.; Lin, H.; Terra, M. C. N. S.; Chappell, N. A. Water Balance in a Neotropical Forest Catchment of Southeastern Brazil. *CATENA* 2019, 173, 9–21.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.046>.
- (3)
Krishnaswamy, J.; Bonell, M.; Venkatesh, B.; Purandara, B. K.; Rakesh, K. N.; Lele, S.; Kiran, M. C.; Reddy, V.; Badiger, S. The Groundwater Recharge Response and Hydrologic Services of Tropical Humid Forest Ecosystems to Use and Reforestation: Support for the “Infiltration-Evapotranspiration Trade-off Hypothesis.” *Journal of Hydrology* 2013, 498, 191–209. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.034>.
- (4)
Solórzano, A.; Brasil, L. S. C. de A.; de Oliveira, R. R. The Atlantic Forest Ecological History: From Pre-Colonial Times to the Anthropocene. In *The Atlantic Forest: History, Biodiversity, Threats and Opportunities of the Mega-diverse Forest*; Marques, M. C. M., Grelle, C. E. V., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2021; pp 25–44.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7_2.
- (5)
TEROS 10 - METER Group. <https://metergroup.com/fr/products/teros-10/> (accessed 2025-07-25).
- (6)
Doerr, S. H.; Shakesby, R. A.; Walsh, R. P. D. Soil Water Repellency: Its Causes, Characteristics and Hydro-Geomorphological Significance. *Earth-Science Reviews* 2000, 51 (1), 33–65. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8).
- (7)
Markewitz, D.; Devine, S.; Davidson, E. A.; Brando, P.; Nepstad, D. C. Soil Moisture Depletion under Simulated Drought in the Amazon: Impacts on Deep Root Uptake. *New Phytologist* 2010, 187 (3), 592–607. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03391.x>.

(8)

Emeka, N.; Ikenna, O.; Okechukwu, M.; Chinenye, A.; Emmanuel, E. Sensitivity of FAO Penman–Monteith Reference Evapotranspiration (ET_o) to Climatic Variables under Different Climate Types in Nigeria. *Journal of Water and Climate Change* 2020, 12 (3), 858–878. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.200>.

(9)

Reference soil Brazil 10: Ferralsol | ISRIC World Soil Museum. <https://museum.isric.org/monoliths/reference-soil-brazil-10> (accessed 2025-08-12).

(10)

Šimůnek, J.; van Genuchten, M. Th.; Šejna, M. Recent Developments and Applications of the HYDRUS Computer Software Packages. *Vadose Zone Journal* 2016, 15 (7), vzj2016.04.0033. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.04.0033>.

(11)

Junqueira Junior, J. A.; de Mello, C. R.; de Mello, J. M.; Scolforo, H. F.; Beskow, S.; McCarter, J. Rainfall Partitioning Measurement and Rainfall Interception Modelling in a Tropical Semi-Deciduous Atlantic Forest Remnant. *Agricultural and Forest Meteorology* 2019, 275, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.016>.

(12)

de Oliveira, T. S.; Fernandes, R. B. A. Physical Subsoil Constraints of Agricultural and Forestry Land. In *Subsoil Constraints for Crop Production*; Oliveira, T. S. de, Bell, R. W., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2022; pp 125–160. https://doi.org/10.1007/978-3-031-00317-2_6.

(13)

Wa, P. Phone: 509-332-5600 Fax: 509-332-5158 Website: [Www.Decagon.Com](http://www.Decagon.Com) Email: Support@decagon.Com or Sales@decagon.Com.

(14)

(PDF) Estimating Components of the Hydrological Cycle in the Atlantic Forest Biome Using the INLAND Surface Model. ResearchGate 2025.

(15)

Sutanto, S. J.; Wenninger, J.; Coenders-Gerrits, A. M. J.; Uhlenbrook, S. Partitioning of Evaporation into Transpiration, Soil Evaporation and Interception: A Comparison between Isotope Measurements and a HYDRUS-1D Model. *Hydrology and Earth System Sciences* 2012, 16 (8), 2605–2616. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2605-2012>.

(16)

PART 2 MANAGEMENT PROPERTIES OF FERRALSOLS. <https://www.fao.org/4/x5867e/x5867e04.com> (accessed 2025-08-02).

(17)

Cai, G.; Vanderborght, J.; Couvreur, V.; Mboh, C. M.; Vereecken, H. Parameterization of Root Water Uptake Models Considering Dynamic Root Distributions and Water Uptake Compensation. *Vadose Zone Journal* 2018, 17 (1), 1–21.
<https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0125>.

(18)

Modeling Compensated Root Water and Nutrient Uptake | Request PDF.
ResearchGate 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.004>.

(19)

Rodriguez-Dominguez, C. M.; Forner, A.; Martorell, S.; Choat, B.; Lopez, R.; Peters, J. M. R.; Pfautsch, S.; Mayr, S.; Carins-Murphy, M. R.; McAdam, S. A. M.; Richardson, F.; Diaz-Espejo, A.; Hernandez-Santana, V.; Menezes-Silva, P. E.; Torres-Ruiz, J. M.; Batz, T. A.; Sack, L. Leaf Water Potential Measurements Using the Pressure Chamber: Synthetic Testing of Assumptions towards Best Practices for Precision and Accuracy. *Plant, Cell & Environment* 2022, 45 (7), 2037–2061. <https://doi.org/10.1111/pce.14330>.

(20)

Bertin, S.; Balandier, P.; Becquey, J.; Bonal, D.; Nathalie, B.; Perrier, C.; Riou-Nivert, P.; Sevrin, É. *Le Bilan Hydrique Des Peuplements Forestiers. Etat Des Connaissances Scientifiques et Techniques - Implications Pour La Gestion*; 2016.

(21)

Muñoz-Villers, L. E.; McDonnell, J. J. Land Use Change Effects on Runoff Generation in a Humid Tropical Montane Cloud Forest Region. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013, 17 (9), 3543–3560. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3543-2013>.

(22)

Morellato, L. P. C.; Haddad, C. F. B. Introduction: The Brazilian Atlantic Forest. *Biotropica* 2000, 32 (4b), 786–792. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00618.x>.

(23)

Vergnes, J.-P.; Decharme, B.; Habets, F. Introduction of Groundwater Capillary Rises Using Subgrid Spatial Variability of Topography into the ISBA Land Surface Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 2014, 119 (19), 11,065–11,086.
<https://doi.org/10.1002/2014JD021573>.

(25)

Nicoletti, A. L.; Refosco, J. C.; Pinheiro, A. Interception and Surface Runoff in Different Regeneration Stages of Atlantic Forest, Southern Brazil. *Ciênc. Florest.* 2023, 32, 2113–2135.
<https://doi.org/10.5902/1980509866884>.

(26)

François, M.; de Aguiar, T. R.; Mielke, M. S.; Rousseau, A. N.; Faria, D.; Mariano-Neto, E. Interactions Between Forest Cover and Watershed Hydrology: A Conceptual Meta-Analysis. *Water* 2024, 16 (23), 3350. <https://doi.org/10.3390/w16233350>.

(27)

François, M.; de Aguiar, T. R.; Mielke, M. S.; Rousseau, A. N.; Faria, D.; Mariano-Neto, E. Interactions Between Forest Cover and Watershed Hydrology: A Conceptual Meta-Analysis. *Water* 2024, 16 (23), 3350. <https://doi.org/10.3390/w16233350>.

(29)

Anache, J. A. A.; Wendland, E.; Rosalem, L. M. P.; Youlton, C.; Oliveira, P. T. S. Hydrological Trade-Offs Due to Different Land Covers and Land Uses in the Brazilian Cerrado. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2019, 23 (3), 1263–1279. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1263-2019>.

(30)

Bruijnzeel, L. A. Hydrological Functions of Tropical Forests: Not Seeing the Soil for the Trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2004, 104 (1), 185–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>.

(31)

de Vries, J. J.; Simmers, I. Groundwater Recharge: An Overview of Processes and Challenges. *Hydrogeology Journal* 2002, 10 (1), 5–17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>.

(32)

Oliveira, P. T. S.; Leite, M. B.; Mattos, T.; Nearing, M. A.; Scott, R. L.; de Oliveira Xavier, R.; da Silva Matos, D. M.; Wendland, E. Groundwater Recharge Decrease with Increased Vegetation Density in the Brazilian Cerrado. *Ecohydrology* 2017, 10 (1), e1759. <https://doi.org/10.1002/eco.1759>.

(33)

Mattos, T. S.; Oliveira, P. T. S. de; Lucas, M. C.; Wendland, E. Groundwater Recharge Decrease Replacing Pasture by Eucalyptus Plantation. *Water* 2019, 11 (6), 1213. <https://doi.org/10.3390/w11061213>.

(34)

Poyatos, R.; (...); Martínez-Vilalta, J. Global Transpiration Data from Sap Flow Measurements: The SAPFLUXNET Database. *Earth Syst. Sci. Data* 2021, 13 (6), 2607–2649. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2607-2021>.

(35)

Bezerra-Coelho, C. R.; Zhuang, L.; Barbosa, M. C.; Soto, M. A.; Van Genuchten, M. Th. Further Tests of the HYPROP Evaporation Method for Estimating the Unsaturated Soil Hydraulic Properties. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 2018, 66 (2), 161–169. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0046>.

(36)

Forest Evapotranspiration: Measurement and Modelling at Multiple Scales. In Forest hydrology: processes, management and assessment; CABI: UK, 2016; pp 32–50.

<https://doi.org/10.1079/9781780646602.0032>.

(37)

FAO Irrigation and Drainage Paper.

(38)

Lüdtke Paim, B.; Imbuzeiro, H. M. A.; Benezoli, V. H.; Martins, J. H.; Rocha, H. Estimating Components of the Hydrological Cycle in the Atlantic Forest Biome Using the INLAND Surface Model. *Physical Geography* 2024, 45 (6), 650–675.

<https://doi.org/10.1080/02723646.2024.2327223>.

(39)

Calmon, M.; Brancalion, P. H. S.; Paese, A.; Aronson, J.; Castro, P.; da Silva, S. C.; Rodrigues, R. R. Emerging Threats and Opportunities for Large-Scale Ecological Restoration in the Atlantic Forest of Brazil. *Restoration Ecology* 2011, 19 (2), 154–158.

<https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2011.00772.x>.

(40)

Jourgholami, M.; Karami, S.; Tavankar, F.; Lo Monaco, A.; Picchio, R. Effects of Slope Gradient on Runoff and Sediment Yield on Machine-Induced Compacted Soil in Temperate Forests. *Forests* 2021, 12 (1), 49. <https://doi.org/10.3390/f12010049>.

(41)

Ecography - Wiley Online Library.

<https://nsojournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecog.04564> (accessed 2025-07-31).

(42)

Dynamics in Four Forests Characterized Using Automated Dendrometer Bands. *ForestGEO*. <https://forestgeo.si.edu/dynamics-four-forests-characterized-using-automated-dendrometer-bands> (accessed 2025-08-21).

(43)

da Silva, D. A.; Pfeifer, M.; Pattison, Z.; Vibrans, A. C. Drivers of Leaf Area Index Variation in Brazilian Subtropical Atlantic Forests. *Forest Ecology and Management* 2020, 476, 118477. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118477>.

(44)

Kühnhammer, K.; van Haren, J.; Kübert, A.; Bailey, K.; Dubbert, M.; Hu, J.; Ladd, S. N.; Meredith, L. K.; Werner, C.; Beyer, M. Deep Roots Mitigate Drought Impacts on Tropical Trees despite Limited Quantitative Contribution to Transpiration. *Science of The Total Environment* 2023, 893, 164763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164763>.

(45)

- Chapter 2 - FAO Penman-Monteith equation.
<https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e06.htm#equation> (accessed 2025-07-24).
 (46)
- Deuchars, S. a.; Townend, J.; Aitkenhead, M. J.; FitzPatrick, E. a. Changes in Soil Structure and Hydraulic Properties in Regenerating Rain Forest. *Soil Use and Management* 1999, 15 (3), 183–187. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1999.tb00086.x>.
 (47)
- Changes in porosity and microaggregation in clayey Ferralsols of the Brazilian Cerrado on clearing for pasture - Balbino - 2002 - *European Journal of Soil Science* - Wiley Online Library. <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1365-2389.2002.00446.x> (accessed 2025-08-21).
 (48)
- Tabarelli, M.; Pinto, L. P.; Silva, J. M. C.; Hirota, M.; Bedê, L. Challenges and Opportunities for Biodiversity Conservation in the Brazilian Atlantic Forest. *Conservation Biology* 2005, 19 (3), 695–700. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00694.x>.
 (49)
- Chiapini, M.; Nascimento, D. L.; Santos, T. A.; Marques, K. P. P.; Rodrigues, B. M.; de Camargo, P. B.; Cooper, M.; Vidal-Torrado, P. Bioturbation in Very Deep Tropical Ferralsols: A Micromorphological Study of Biomantles. *CATENA* 2025, 256, 109084. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109084>.
 (50)
- Borma, L. S.; Costa, M. H.; da Rocha, H. R.; Arieira, J.; Nascimento, N. C. C.; Jaramillo-Giraldo, C.; Ambrosio, G.; Carneiro, R. G.; Venzon, M.; Neto, A. F.; van der Hoff, R.; Oliveira, B. F. A.; Rajão, R.; Nobre, C. A. Beyond Carbon: The Contributions of South American Tropical Humid and Subhumid Forests to Ecosystem Services. *Reviews of Geophysics* 2022, 60 (4), e2021RG000766. <https://doi.org/10.1029/2021RG000766>.
 (51)
- Lozano-Baez, S. E.; Cooper, M.; de Barros Ferraz, S. F.; Ribeiro Rodrigues, R.; Lassabatere, L.; Castellini, M.; Di Prima, S. Assessing Water Infiltration and Soil Water Repellency in Brazilian Atlantic Forest Soils. *Applied Sciences* 2020, 10 (6), 1950. <https://doi.org/10.3390/app10061950>.
 (52)
- Fisher, R. F. Amelioration of Degraded Rain Forest Soils by Plantations of Native Trees. *Soil Science Society of America Journal* 1995, 59 (2), 544–549. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900020039x>

IX. Annexes

Annexe 1 : Equation de Penman-Monteith

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

avec ET_0 , l'évapotranspiration de référence [$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$]

R_n , le rayonnement net à la surface de la culture [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$]

G , le flux de chaleur dans le sol [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$]

T , la température moyenne de l'air à 2 m [$^{\circ}\text{C}$]

u_2 , la vitesse du vent à 2 m [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

e_s , la pression de vapeur saturante [kPa]

e_a , la pression de vapeur réelle [kPa]

$e_s - e_a$, le déficit de pression de vapeur [kPa]

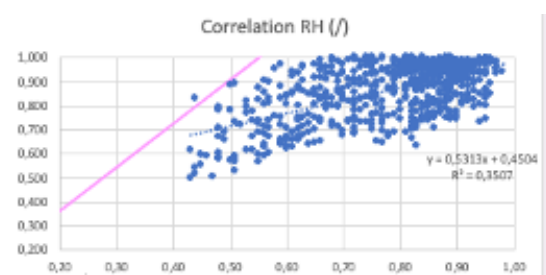
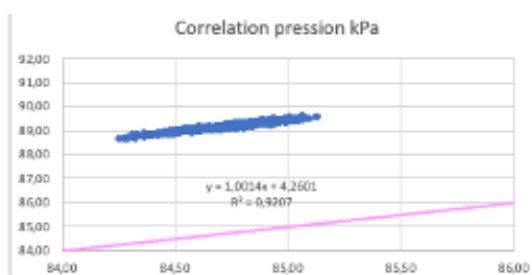
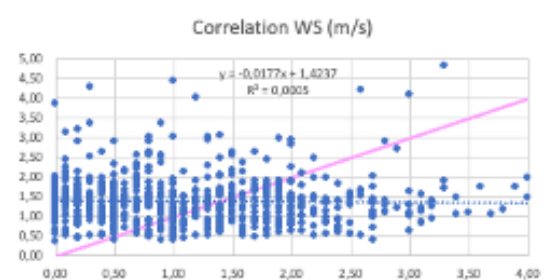
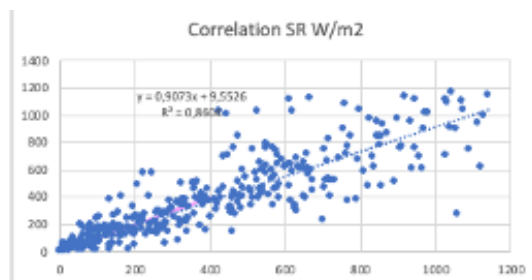
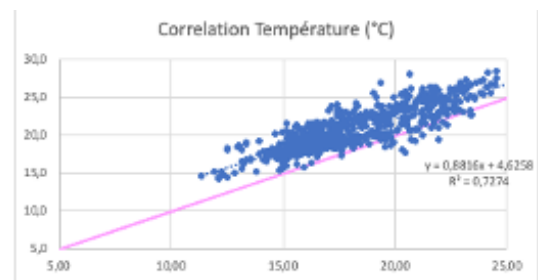
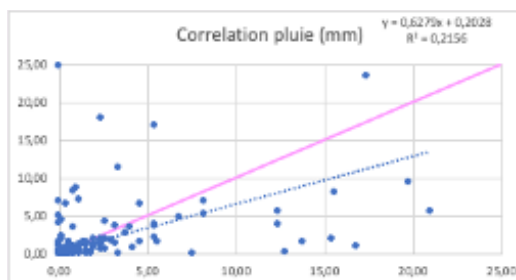
Δ , la pente de la courbe de pression de vapeur saturante [$\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$]

γ , la constante psychrométrique [$\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$]

Annexe 2 : Corrélation entre les variables de la station météorologique de l'INMET et l'INPE

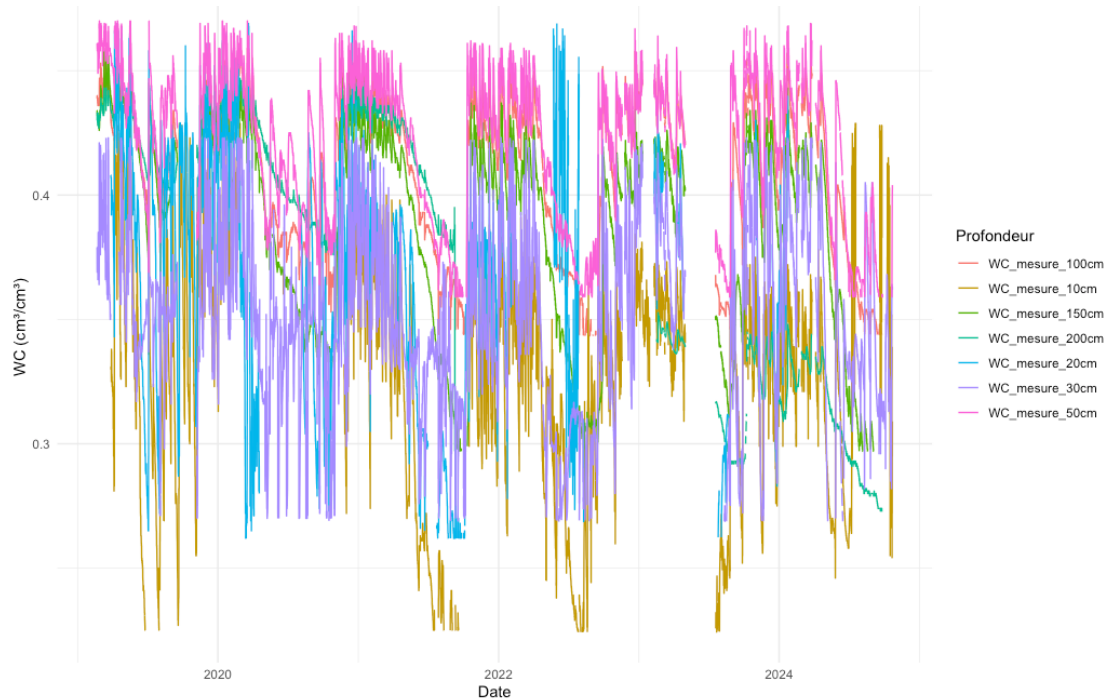
Ces graphiques montrent la corrélation entre les données provenant de la station météorologique de l'INMET et l'INPE pour chacune des variables utilisées pour le calcul de l'équation de Penman-Monteith pour le calcul de l'évapotranspiration de référence : la pluie (mm), la température (°C), la radiation solaire (SR, W/m²), la vitesse u vent (WS, m/s), la pression (kPa) et l'humidité relative (HR, %). La droite de régression, son équation, le coefficient R² ainsi qu'une droite 1:1 sont aussi représentés.

Les données de la station de l'INPE sont en y et celles de l'INMET en x.

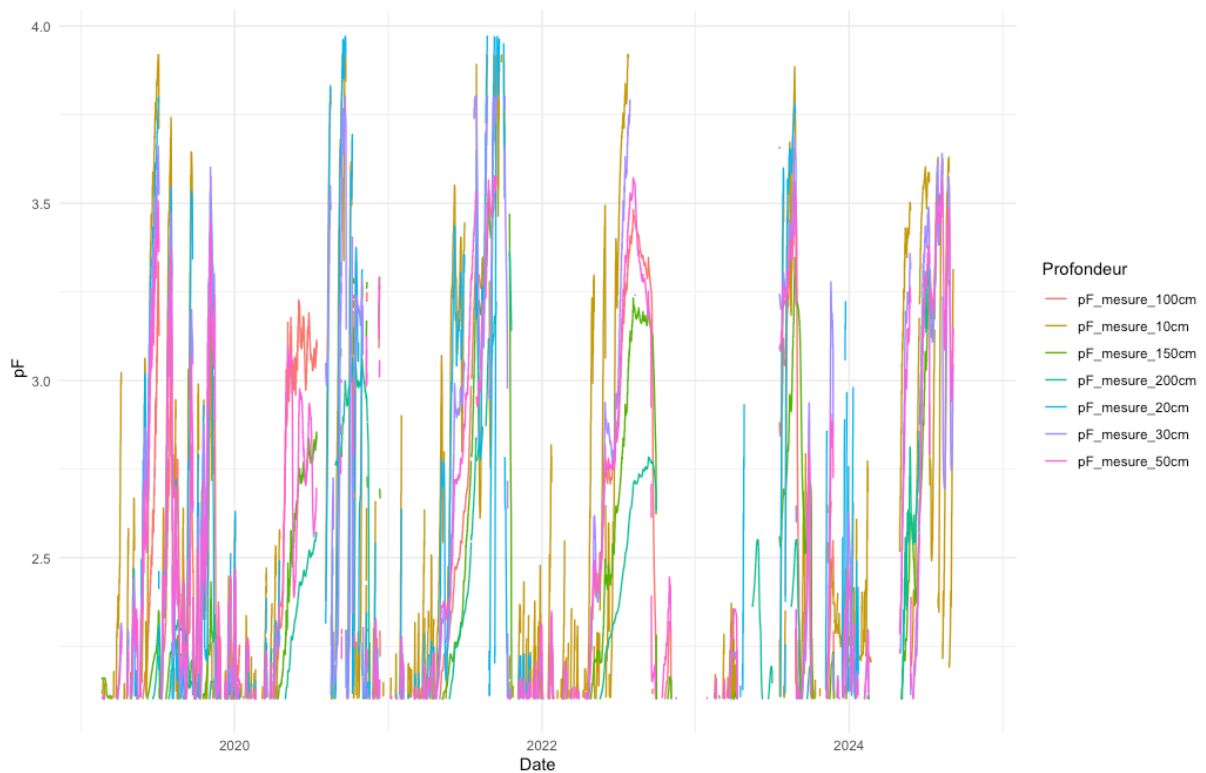


● INMET/INPE — droite 1:1 Linéaire (INMET/INPE)

Série temporelle de teneur en eau (WC en cm^3/cm^3) aux sept profondeurs caractérisées dans cette étude, après filtrage.

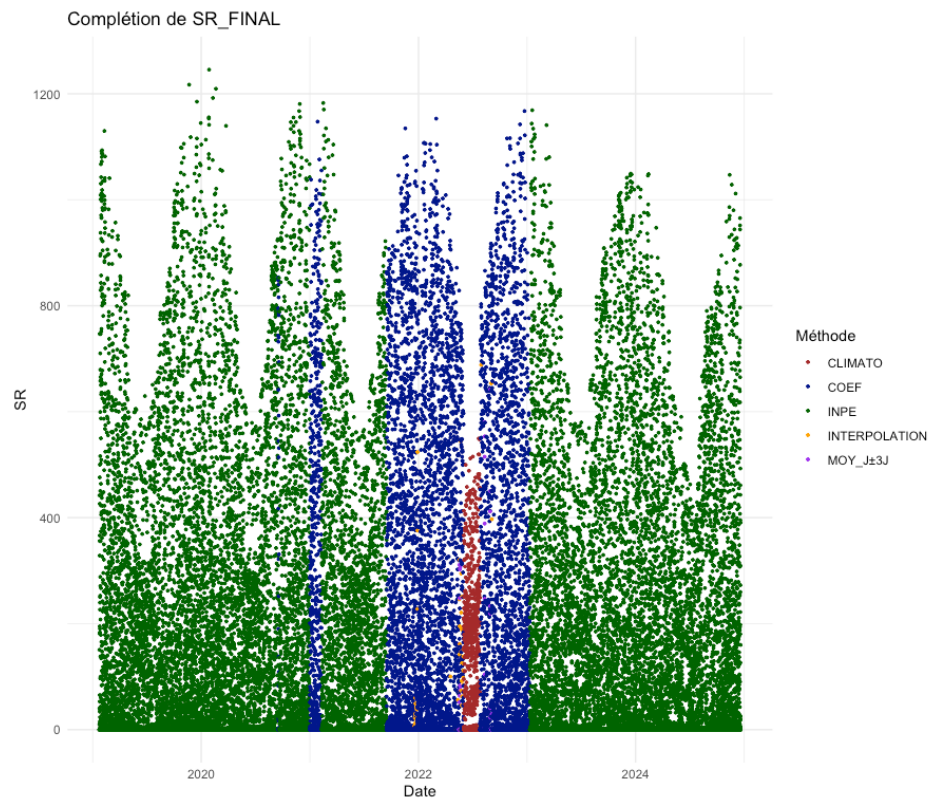


Série temporelle de potentiel matriciel (WP en pF) aux sept profondeurs caractérisées dans cette étude, après filtrage.

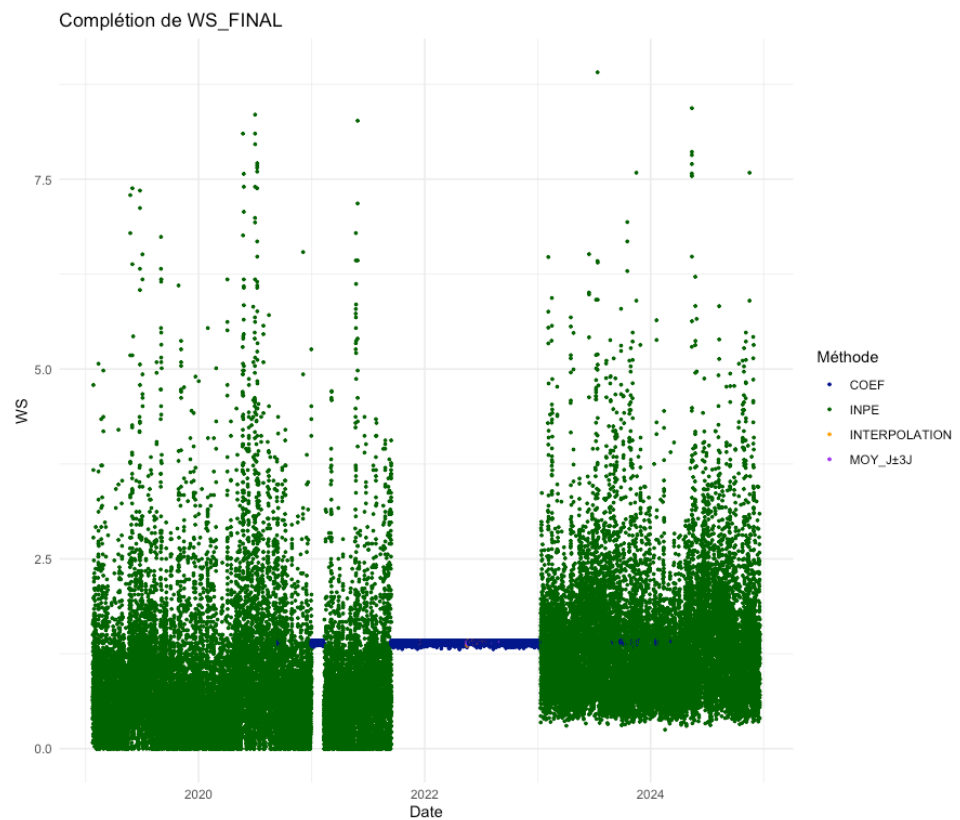


Annexe 4 : Résultat de la complétion des séries temporelles de données météorologiques et de potentiel matriciel à 2m

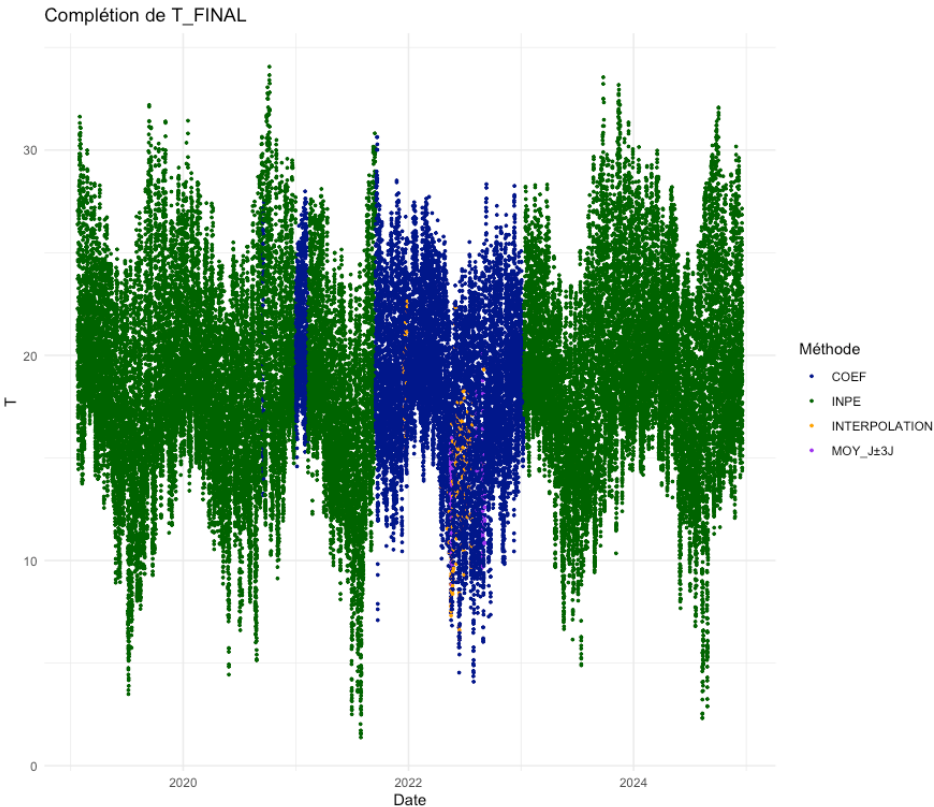
Radiation solaire (SR)



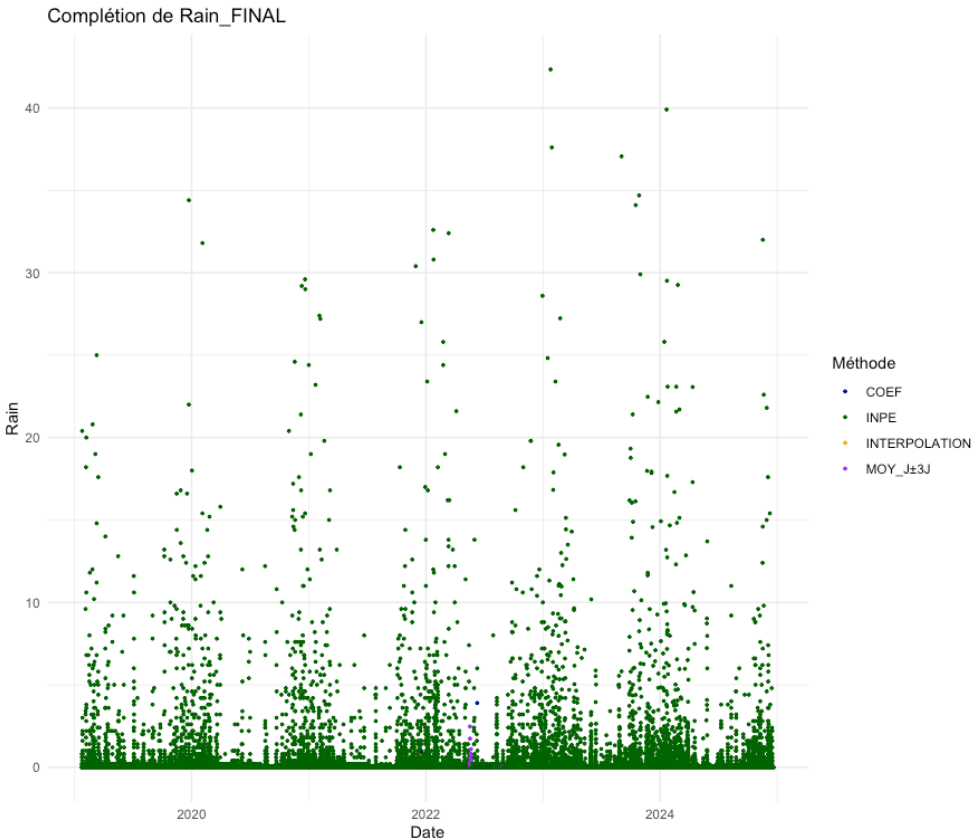
Vitesse du vent (WS)



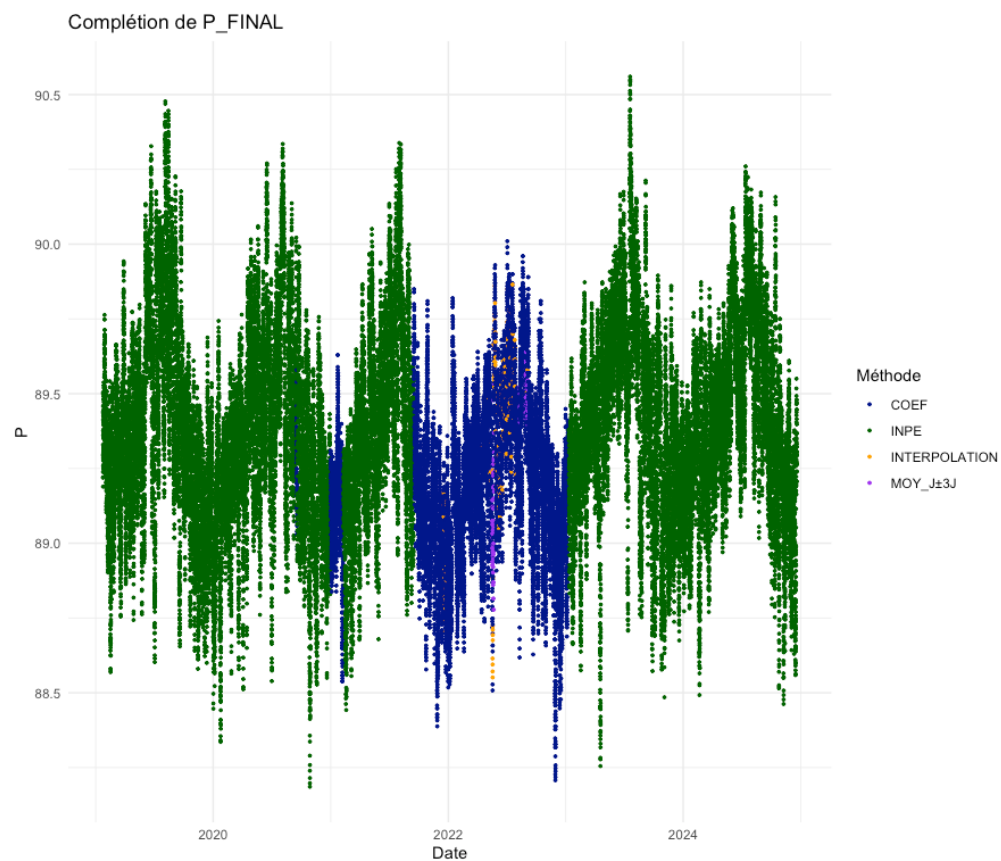
Température (T)



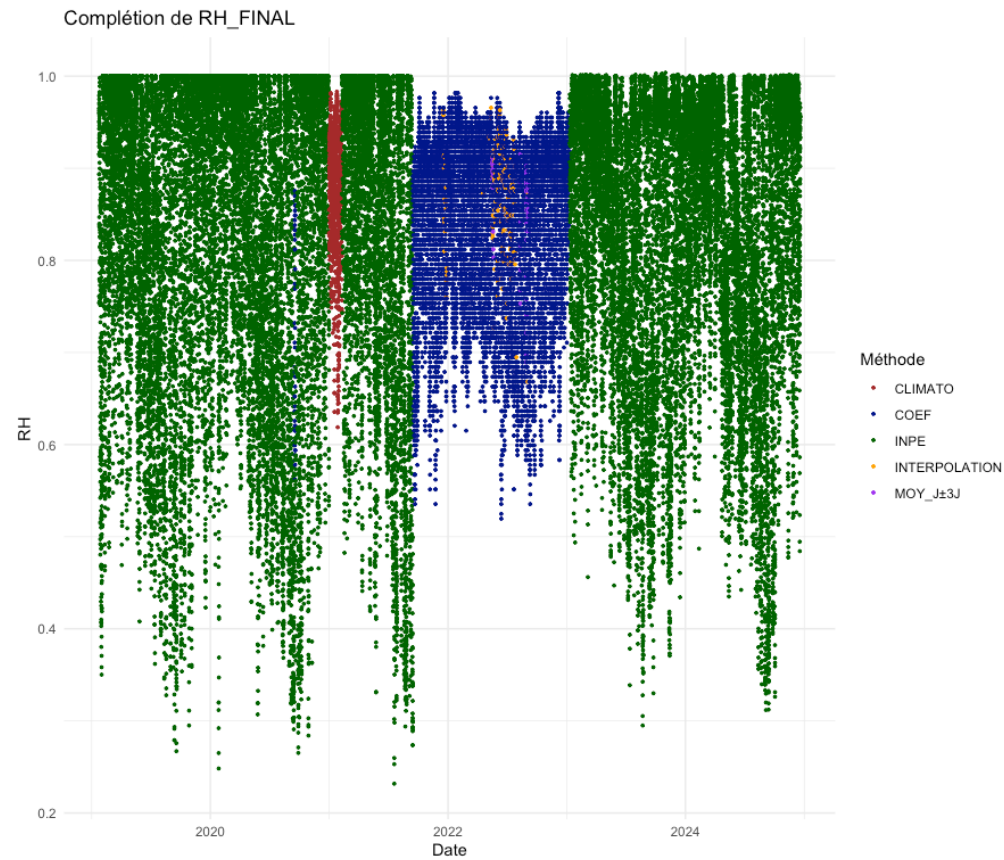
Pluie (Rain)



Pression (P)



Humidité relative (HR)



ET0 horaire selon l'origine des données ayant servi à son calcul. La série bleue « INMET » fait référence aux données provenant à la station météorologique de cet institut et « INPE », en vert, désigne la station de cet autre institut. La série « autres » en rose, désigne les valeurs d'ET0 ayant été calculées avec des données d'une provenance multiple et/ou basées sur une des méthodes de complétion.



Annexe 7 : Paramètres des courbes de rétention pour les 3 campagnes

En rose, la campagne 2025 (M. Ounifi), en violet la campagne 2024 (C. Dermauw), en vert la campagne 2023 (B. Delvoie)

Prof (cm)	θ_r (-)	θ_s (-)	alpha (1/cm)	n (-)	w2 (-)	alpha 2	n2 (-)
10	0,22	0,68	0,05	1,73			
	0,30	0,61	0,04	1,13			
	0,09	0,58	0,00	1,25	0,51	0,01	5,85
20	0,21	0,58	0,05	1,44			
	0,30	0,63	0,05	1,65			
	0,09	0,55	0,02	2,40	0,49	0,00	2,14
30	0,29	0,64	0,06	1,58			
	0,28	0,55	0,06	1,28			
	0,09	0,55	0,02	2,40	0,49	0,00	2,14
50	0,42	0,72	0,06	1,49			
	0,29	0,51	0,05	1,26			
	0,11	0,54	0,02	1,87	0,64	0,00	1,57
100	0,29	0,54	0,05	1,39			
	0,21	0,52	0,08	0,13			
	0,11	0,54	0,02	1,87	0,64	0,00	1,57
150	0,27	0,53	0,04	1,50			
	0,27	0,49	0,04	1,20			
	0,10	0,51	0,00	1,70	0,32	0,01	3,80
200	0,26	0,52	0,04	1,52			
	0,00	0,50	0,06	1,09			
	0,10	0,51	0,00	1,70	0,32	0,01	3,80

La Forêt Atlantique brésilienne, autrefois étendue sur environ 1,36 million de km², ne subsiste aujourd'hui qu'à l'état fragmenté. Face à cette déforestation massive, la reforestation est devenue un enjeu majeur pour restaurer la biodiversité et les services écosystémiques. Toutefois, l'effet de cette régénération sur le cycle de l'eau reste incertain. Si le couvert forestier favorise l'infiltration et la structuration des sols, l'évapotranspiration accrue peut réduire la recharge souterraine. Comprendre ces compromis est essentiel pour concilier restauration écologique et gestion durable de l'eau.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche conjoint entre l'INPE (Brésil) et l'UCLouvain (Belgique) et porte sur une parcelle forestière régénérée naturellement depuis une quarantaine d'années à São Francisco Xavier. Les propriétés hydrodynamiques du sol ont été mesurées à différentes profondeurs, puis intégrées dans le modèle Hydrus-1D pour simuler la dynamique hydrique du profil entre 2019 et 2024. Deux scénarios de prélèvement racinaire ont été testés : avec ou sans compensation racinaire.

Les résultats montrent que le modèle restitue correctement la saisonnalité du bilan hydrique, avec une infiltration et un drainage concentrés en saison humide et une évapotranspiration soutenue toute l'année mais réduite en saison sèche. L'introduction de la compensation racinaire accroît la transpiration réelle et réduit le stress hydrique cumulé mais tend à intensifier l'assèchement en période de sécheresse prolongée. De manière inattendue, les prélèvements en eau se sont accentués dans les horizons intermédiaires (30–50 cm) plutôt qu'en profondeur, suggérant une stratégie d'exploration latérale du profil racinaire.

Ces résultats, bien qu'ayant révélé certaines limites, contribuent à caractériser le fonctionnement hydrique d'une forêt secondaire régénérée de la Mata Atlantica et à évaluer la pertinence de la compensation racinaire dans Hydrus-1D. Ils mettent en évidence les atouts mais aussi les limites de cette représentation et soulignent la nécessité d'analyses locales détaillées pour mieux comprendre le rôle des forêts régénérées dans la dynamique éco-hydrologique tropicale.

Manele Ounifi