

Comparaison de la dynamique des eaux pluviales dans les sols de forêts dégradées et de savanes à Mayitoukou (Département du Pool, République du Congo)

Hugues-Yvan GOMAT^{1,3}, Guy MOUKANDI NKAYA², Darius Martin BENGO¹, Farel Bruce BAYIDIKILA³, Marnes NZOBANTOU BINZOLOLO³

Résumé

Cette étude analyse la dynamique des eaux pluviales dans les sols de forêts dégradées et de savanes à Mayitoukou, dans le département du Pool, République du Congo. L'objectif est de comparer la rétention et la distribution de l'humidité du sol entre ces deux écosystèmes, en réponse aux précipitations. La méthodologie a consisté en la mesure de la densité apparente du sol à différentes profondeurs (10, 20, 30, 50 et 100 cm) et en l'installation de sondes d'enregistrement de l'humidité à chaque profondeur. Les données d'humidité volumique ont été collectées en continu sur une période de 52 jours, tandis que les précipitations ont été enregistrées avec un pluviomètre.

Les résultats montrent une forte variabilité de la répartition de l'humidité entre les écosystèmes : en savane, l'eau de pluie s'infiltrait rapidement d'un horizon à l'autre, entraînant une humidification et un assèchement rapides. En forêt, l'infiltration est plus lente, avec une humidité constante en profondeur. Ces différences suggèrent une meilleure capacité de rétention d'eau en forêt, liée à la couverture végétale et au système racinaire, qui favorisent la durabilité des écosystèmes forestiers face aux fluctuations climatiques.

Mots clés : Forêt, Savane, Humidité du sol, Densité apparente de sol, Plateaux Batéké

Abstract

Comparison of Rainwater Dynamics in Degraded Forest and Savannah Soils at Mayitoukou (Pool Department, Republic of Congo)

This study analyzes the dynamics of rainwater in degraded forest and savannah soils at Mayitoukou, in the Pool department, Republic of Congo. The objective is to compare soil moisture retention and distribution in these two ecosystems in response to precipitation. The methodology involved measuring soil bulk density at different depths (10, 20, 30, 50, and 100 cm) and installing moisture recording probes at each depth. Volumetric moisture data were continuously collected over a 52-day period, while precipitation was recorded using a rain gauge.

The results show significant variability in moisture distribution between the ecosystems: in the savannah, rainwater quickly infiltrates from one horizon to the next, leading to rapid wetting and drying. In the forest, infiltration is slower, maintaining constant moisture at deeper levels. These differences suggest a better water retention capacity in the forest, attributed to vegetation cover and root systems, which support the sustainability of forest ecosystems in response to climatic fluctuations.

Key words : Forest, Savannah, Soil moisture, Soil bulk density, Batéké Plateaux

¹ENS (Ecole Normale Supérieure), Université Marien N'Gouabi, BP 69 Brazzaville

²ENSP (Ecole Nationale Supérieure Polytechnique), Université Marien N'Gouabi, BP 69 Brazzaville

³LTEF (Laboratoire de Teledetection et d'Ecologie Forestière), ENS, BP 69 Université Marien N'gouabi.

Adresse électronique de l'auteur : biblio_gomat@yahoo.fr

Téléphone : + 242 06 956 04 81

1. Introduction

Sous les climats tropicaux humides, les précipitations (pluie, rosée, brume et brouillard) contribuent à l'apport en eau du sol. Cependant, une partie de cette eau est perdue par évaporation directe pendant et après la pluie, ou interceptée par le feuillage (Muys et al., 2011 ; Puttick et al., 2011). L'eau qui atteint le sol peut ruisseler, s'infiltrer ou réhumidifier le sol. Une fraction de cette eau infiltrée est absorbée par les racines, puis transpirée par la plante, tandis qu'une faible portion atteint les nappes phréatiques en profondeur (Beauchamp, 2006).

L'eau du sol est un vecteur essentiel de transfert de gaz et de matières, et elle soutient des processus fondamentaux tels que la décomposition des matières organiques, la croissance des racines et l'absorption d'éléments

minéraux (Bonan & Shugart, 2018). Elle influence aussi la respiration du sol, les activités métaboliques de la microflore et de la faune du sol (Moukandi et Deleporte, 2005). L'humidité du sol représente donc un volume d'eau, stocké en surface ou en profondeur, sujet à l'évaporation.

Les variations de l'humidité dans le sol dépendent de facteurs physiques (porosité, texture, densité apparente, structure), chimiques (matière organique, capacité d'échange cationique) et biologiques (macrofaune, pratiques culturales), ainsi que de leurs interactions (Soutter et al., 2007 ; Oliveira et al., 2021). L'humidité du sol influence également la répartition des eaux de ruissellement et l'infiltration, ce qui peut contribuer à la recharge des nappes phréatiques (Zribi et al., 2011). Ces variations sont fonction des caractéristiques du

sol (paramètres hydrodynamiques), des conditions initiales (profils hydriques) et des éléments climatiques (Ngnepieba et al., 2002).

La dynamique de l'eau, à la surface et dans le sol, ainsi que les divers phénomènes physico-chimiques, rendent complexe l'évaluation de ces processus pour un développement harmonieux de la végétation en différents contextes agro-météorologiques (Soutter et al., 2007). En effet, le couvert végétal, par sa densité et sa hauteur, protège le sol contre les impacts de précipitations et limite le ruissellement superficiel (Soutter et al., 2007 ; Hoffmann et al., 2011). La croissance des végétaux repose sur l'absorption d'eau et d'éléments nutritifs par les racines. L'interaction entre plantes et eaux souterraines constitue un facteur essentiel des échanges d'eau en forêt comme en savane. Cela permet d'estimer la consommation en eau des plantations et de mieux gérer les ressources hydriques, qui influencent la recharge des nappes phréatiques (Moukandi, et Deleporte, 2005).

L'évolution de l'humidité du sol et son impact sur les plantes est cruciale pour adapter les cultures au pédoclimat (Oliveira et al. 2021). Avec le dessèchement du sol, les pores de grand diamètre se vident en premier, et l'eau s'écoule dans des pores de plus en plus fins (Zerner, 2011 ; Ward et al., 2018). Une densité apparente accrue entraîne la compression du sol, réduisant la porosité et influençant la capacité de stockage de l'eau (Whalley et al., 1995 ; Lange et al., 2019). En présence d'une strate peu perméable en surface, l'infiltration peut être bloquée, formant une nappe perchée et provoquant des excès d'eau liés à un drainage insuffisant (Mavimbela & Rensburg, 2011 ; Henine et al., 2024). Les sols stratifiés, avec des variations brusques de perméabilité, restreignent le drainage interne, entraînant une accumulation d'eau (Mavimbela & Rensburg, 2011).

Le climat de Brazzaville alterne entre périodes d'excès d'eau et de déficit hydrique (Guehl, 1984). La gestion des données climatiques et agricoles est donc essentielle pour anticiper les aléas climatiques et aider les populations à s'adapter. Dans ce contexte, étudier l'humidité du sol en forêt et en savane devient crucial. Ces connaissances permettent de détecter des périodes de stress hydrique (Song et al., 2020). Des études locales montrent que les sols autour de Brazzaville sont sableux et drainants, avec une faible capacité de rétention d'eau (Nzila et al., 2018). Ce travail a pour objectif d'étudier la distribution de l'eau de pluie dans les différents horizons du sol en forêt-galerie et en savane, afin de mieux comprendre les dynamiques hydriques de la région du Pool, contribuant ainsi à la conservation et à la durabilité des écosystèmes.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Description de la zone d'étude

L'étude est réalisée à Mayitoukou en banlieue sud de Brazzaville (Latitude : 4.317295° Sud, Longitude : 15.084005° Est) (Photo 1).

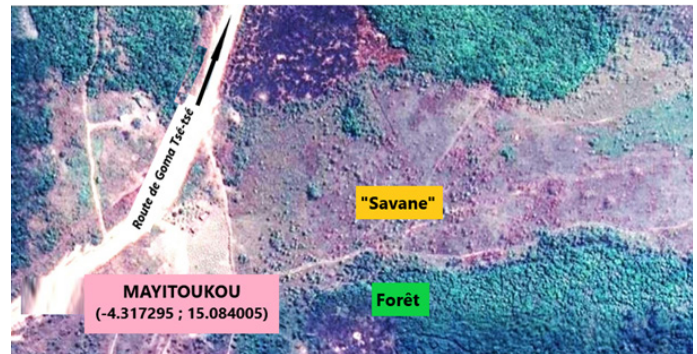


Photo 1 : Localisation du site d'expérimentation de Mayitoukou (Département du Pool, République du Congo)

Le climat est de type tropical humide caractérisé par une température moyenne de 20 °C et des précipitations autour de 1 250 mm d'eau par an. La saison sèche fraîche dure environ quatre mois : de juin à septembre ; et la saison des pluies relativement chaude dure environ huit mois d'octobre à mai (Samba Kimbata, 1995). Entre janvier et juin 2024, Brazzaville a connu des températures moyennes mensuelles comprises entre 24,5 °C et 26,2 °C ; les précipitations ont varié, avec des mois plus humides (67-94 mm) en début d'année (janvier et février) et une diminution progressive jusqu'en juin atteignant 1 mm (Climate-Data.org. 2024). Les sols du Pool appartiennent en général à la catégorie des sols ferrallitiques fortement désaturés. Dans l'ensemble, il s'agit des sols issus des matériaux pauvres des roches gréseuses de l'Inkisi d'âge primaire et des formations des "Grès Batéké" d'âge tertiaire. Ces sols sont argilo-sableux ou sableux, assez fragile vis-à-vis de l'érosion par l'eau ruisselante (Nzila et al., 2018). Sous forêt et sous savane, les profils présentent des différences notables, en particulier pour ce qui concerne la nature et la répartition de la matière organique (Descoings, 1975). Le parcours de la région du Pool montre une extension excessive des savanes et des forêts galeries en bas des vallées le long des rivières, généralement dégradées et subissant une forte pression humaine due à la demande énergétique croissante du bois et charbon de chauffe. Les savanes souvent herbacées, quelques fois arbustives sont floristiquement pauvres et sont régulièrement brûlées dans l'année. On y rencontre les espèces de *Imperata cylindrica*, *Pennisetum purpureum* et *Eupatorium odoratum* et des reliques des espèces forestières reliques comme *Parinari congensis*, *Abizzia zygia* et *Triplochiton scleroxylon* (Samba Kimbata, 1995).

2.2. Méthodologie

2.2.1 Sélection des points de mesure

Les points de mesure de l'humidité ont été choisis en fonction de l'accessibilité au site autour du village de Mayitoukou, garantissant ainsi la sécurité du matériel installé. Les zones de forêt et de savane sélectionnées pour l'étude sont adjacentes, avec une distance de 500 m entre les deux points de mesure, placés à équidistance de la lisière des deux écosystèmes.

2.2.2 Mesure de la densité apparente du sol

La collecte des données comprenait la mesure de la densité apparente du sol (g/cm^3) à chaque profondeur de mesure d'humidité (10, 20, 30, 50 et 100 cm) dans les deux écosystèmes. Pour mesurer la densité apparente, nous avons utilisé un cylindre

de volume connu, dans lequel un échantillon de sol a été prélevé. Après avoir pesé le contenu du cylindre, l'échantillon de sol a été séché à l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation du poids (Blake & Hartge, 1986). Le poids sec obtenu a ensuite permis de calculer la densité apparente en divisant cette masse sèche par le volume du cylindre, fournissant des informations sur la compaction du sol (Hillel, 1998). Cette mesure est essentielle pour mieux comprendre la structure et la compaction du sol, car la densité du sol affecte sa porosité et donc sa capacité à absorber et à stocker l'humidité (Hillel, 1998), ce qui est crucial pour interpréter les données d'humidité recueillies. Cela contribue également à la comparaison des capacités de rétention d'eau et d'infiltration entre les deux écosystèmes, donnant ainsi des indications sur les dynamiques hydriques spécifiques à chaque environnement (Cassel & Nielsen, 1986).

2.2.3 Installation des sondes d'enregistrement de l'humidité

Pour l'installation des sondes d'enregistrement de l'humidité (Photo 2), un trou de 100 cm de profondeur a été soigneusement creusé. Les sondes ont été insérées dans un côté du trou à chaque profondeur de mesure (10, 20, 30, 50 et 100 cm), en positionnant chaque sonde à l'horizontale. Horizon par horizon, le sol a été minutieusement remis en place afin de retrouver une compaction aussi proche que possible de celle d'origine, réduisant ainsi les perturbations et garantissant des mesures d'humidité reflétant les conditions naturelles (Topp et al., 1980). Les mesures ont été réalisées simultanément dans les deux écosystèmes, forêt et savane, afin de permettre une comparaison précise des dynamiques d'humidité entre les deux milieux.

2.2.4 Mesure de la pluie et enregistrement de l'humidité

La quantité de pluie tombée durant la période d'expérimentation (de février à avril 2024) a été mesurée à l'aide d'un pluviomètre installé en savane (Photo 2a). Le taux d'humidité volumique du sol (m³/m³) a été enregistré en continu toutes les trente minutes pendant 52 jours, grâce aux enregistreurs automatiques d'humidité avec Em50, Version 4 implantés dans le sol (Campbell & Norman, 1998).



Photo 2 : Installation des enregistreurs d'humidité (Em50 Decagon) a) en savanes et b) en forêt

3. Résultats

3.1. Quantité d'eau tombée pendant la durée de l'expérimentation

Il est tombé dans la période expérimentale de février à mars (pendant 52 jours) 9 jours de pluies pour un cumul de 144 mm d'eau. La quantité de pluies est comprise entre 2 et 48 mm d'eau dont trois pluies au-dessus de 25 mm (Figure 1).

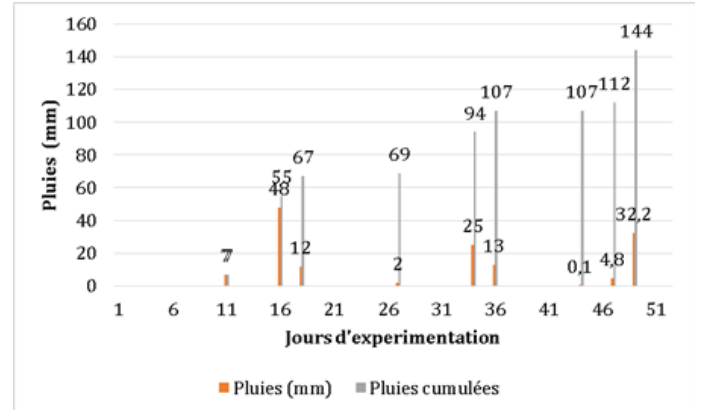


Figure 1 : pluviométrie dans la zone d'expérimentation

3.2. Densité apparente du sol mesurée en savane et en forêt

La densité moyenne du sol augmente avec la profondeur quel que soit le type d'écosystème. La différence de densité apparente entre les horizons est très remarquable en forêt comparée à la celle de la savane dans le sens : la densité apparente du sol est significativement plus forte en savane qu'en forêt (Figure 2).

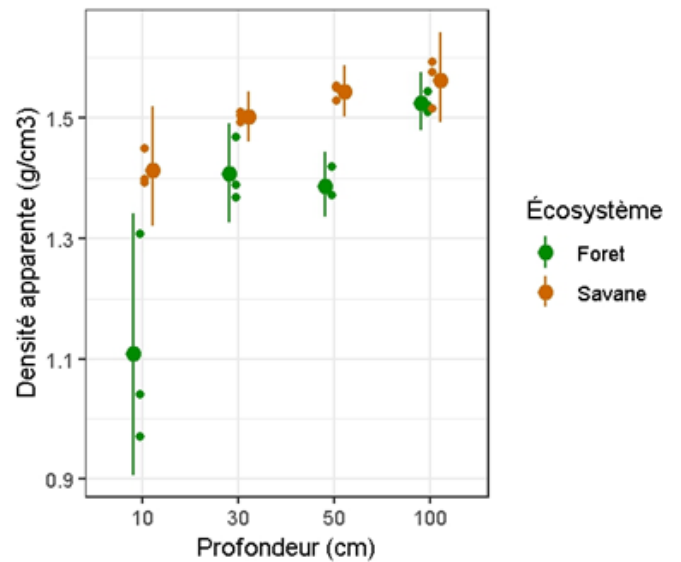


Figure 2 : Densité apparente moyenne dans les fosses de mesures d'humidité du sol (forêt et savane)

3.3. Humidité dans le sol de forêt et dans la savane à Mayitoukou

Les précipitations ne semblent pas entraîner le même mode d'humidification du sol selon que l'on se trouve en forêt ou en savane (Figure 3). L'observation comparée du niveau d'humidité en forêt et en savane montre que l'eau de pluie qui arrive dans le sol de savane est plus abondante (jusqu' 3 m³/

m³) que dans le sol forestier (maximum 0,1 m³/m³). Le passage de l'humidité d'un horizon à l'autre dans le sol de savane se fait aussi rapidement des horizons de surface vers les horizons profonds (Figure 4). A chaque pluie, on a des pics d'humidités dans les différents horizons du sol de savane (Figure 3). Alors qu'en forêt, les horizons de surface restent permanemment et faiblement humides par rapport à la savane sans montrer des pics d'humidité dans le sol. Si l'humidité dans l'horizon profond en savane est plus forte qu'en surface, cette tendance en savane apparait qu'après plusieurs pluies (Figure 4).

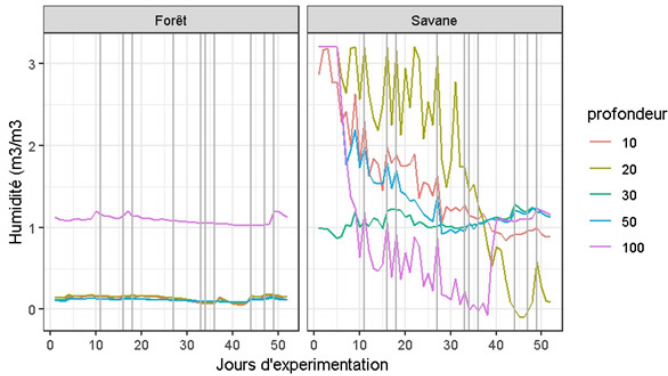


Figure 3: profil d'humidité en forêt et savane en période pluvieuse à Mayitoukou

3.4. Dynamique de l'humectation des horizons dans les sols de savane et forêt

Les eaux des pluies qui s'abattent en savane s'infiltrent progressivement dans le sol, en passant d'un horizon à un autre ce qui est visible dans l'observation de la Figure 4. L'eau de pluie qui atteint l'horizon 10 est vite drainée vers l'horizon 20 qui s'assèche aussi progressivement en rechargeant l'horizon 30 cm. A cet horizon, l'humidité reste relativement constante. Mais, on observe une recharge à 50 cm de profondeur qui se stabilise à la même humidité qu'à l'horizon 30 cm à la suite d'un cumul de 4 pluies totalisant 69 mm d'eau de pluies tombées depuis l'installation du dispositif. A 100 cm de profondeur, on observe aussi des fluctuations avec les pluies. Si l'humidité à 50 cm reste constante vers le 40^e jour de l'expérimentation après avoir recueilli xx mm d'eau, l'humidité remonte fortement à 100 cm.

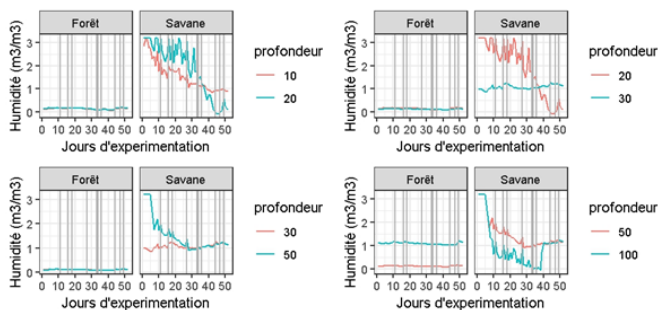


Figure 4 : Humectation dans le sol savanicole de Mayitoukou

On observe qu'en forêt, l'humidité des horizons de surface (de 10 à 50 cm) est très faible et régulièrement constante comparée à l'horizon profond (100 cm). Même les fortes pluies ne semblent pas créer des pics d'humidité. Cependant, dans l'horizon profond qui maintient une plus forte humidité par

rapport aux horizons de surfaces, les pics d'humidité ne sont que faiblement observés pendant toute la période expérimentale et ainsi malgré les intensités différentes des pluies (Figure 3)

4. Discussion

Le rôle de l'eau dans le sol est déterminant si l'on considère les deux formations que constituent les forêts et les savanes décrites dans cette étude. L'eau de pluie qui arrive à la surface du sol commence à humidifier la partie supérieure du sol puis progressivement modifie le profil hydrique. En effet, d'après nos observations, la dynamique de l'eau dans les deux écosystèmes suit deux tendances différentes. En savane, on observe un écoulement rapide des eaux alternant entre humectation et assèchement rapide des horizons, tandis qu'en forêt, la recharge d'un horizon à un autre est lente et l'humidité reste permanente, particulièrement en profondeur.

Même une fine pluie, et en particulier une forte pluviosité, fait augmenter l'humidité en profondeur en savane (Avenard, 1972 ; Puttick et al., 2011), ce qui se traduit par des pics d'humidité quelle que soit l'intensité de la pluie. Cette variabilité a également une incidence sur l'humidité préalable du sol et sur l'importance du ruissellement. En effet, "la vitesse d'infiltration sur un sol primitivement sec diminue au cours du temps avec l'éloignement du front d'humectation et la formation d'une pellicule de battance" (Roose, 1977 ; Liu et al., 2020). L'humectation des horizons profonds en savane montre que le drainage se produit en dehors de la zone racinaire, un phénomène également observé en Afrique du Sud (Van Lill et al., 1980 ; Hoffmann et al., 2011). La mesure de la densité apparente du sol a permis d'apprécier indirectement la perméabilité du sol et sa compaction (Maertens, 1964 ; Ward et al., 2018). On observe que l'humidité augmente avec la densité apparente du sol en profondeur.

La densité de la couverture végétale en zone forestière étale les précipitations et protège le sol du rayonnement solaire, limitant ainsi l'évaporation de l'eau au sol, contrairement à la savane. Les sols forestiers se dessèchent plus lentement et présentent une forte capacité d'absorption et de rétention, situation similaire à celle observée par Avenard (1972 ; Bonan et Shugart, 2018). La forêt agit comme un réservoir d'eau grâce à sa production de litière et à son système racinaire étendu, favorisant une accumulation accrue de matière organique et donc une meilleure infiltration de l'eau, ce qui améliore la rétention d'eau et la recharge des eaux souterraines (Muys et al., 2011 ; Lange et al., 2019 ; Cornet, 1971). L'humidité permanente en profondeur en forêt pourrait également s'expliquer par une évaporation et une transpiration moindres de la végétation (Avenard, 1972 ; Song et al., 2020). L'eau de pluie, lorsqu'elle n'est pas interceptée par les végétaux ni évacuée par évapotranspiration, s'infiltré dans le sol et circule plus librement dans les milieux physiques poreux, facilité par le pourrissement des racines qui forment un réseau de galeries, facilitant ainsi la circulation de l'eau dans le sol (Nizinski et al., 2008 ; Oliveira et al., 2021). En profondeur, la perte en eau du sol est également plus faible.

5. Conclusion

Les résultats auxquels nous aboutissons apportent des éléments intéressants dans la compréhension de la dynamique du profil d'humidité dans le sol forestier et de savane dans les environs du village Mayitoukou. Les sols sont très drainants, l'eau de pluie dans les deux écosystèmes passe d'un compartiment à un autre en maintenant la nutrition hydrique de la végétation. Si l'eau en savane est vite drainée en profondeur, par contre en forêt, l'eau forme une couche d'humidité constante qui maintiendrait une alimentation hydrique aussi longtemps.

Le rôle de l'eau dans le sol est déterminant dans le maintien de la forêt. La forêt se maintient et se renouvelle du fait de la permanence de la période continue écologiquement sèche du sol qui serait inférieure à celle de la savane. Il est indispensable de confirmer les résultats obtenus dans cette étude par une longue expérimentation qui va alterner les périodes sèches et pluvieuses afin de tirer des conclusions certaines du fait des variations interannuelles de la pluviosité dans la zone intertropicale.

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à l'Unité BEF de l'INRAE GE pour l'acquisition du matériel de mesure, au comité du village de Mayitoukou pour l'intérêt et le soutien apportés à cette étude, ainsi qu'aux évaluateurs de cet article pour leurs commentaires et suggestions, qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce manuscrit.

Références bibliographiques

- [1] Avenard, J.-M. (1972). Rôle des régimes hydriques des sols dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. *Annales de Géographie*, 81, 421-450.
- [2] Beauchamp, J. (2006). Pédologie : L'eau et le sol. Université de Picardie Jules Verne. Disponible sur : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm>.
- [3] Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Bulk Density. In *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, 363-375.
- [4] Bonan, G.B., & Shugart, H.H. (2018). Environmental factors and ecological processes in boreal forests. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 1-12.
- [5] Campbell, G.S., & Norman, J.M. (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics* (2nd ed.). Springer, New York, NY. ISBN 978-0-387-94937-6.
- [6] Cassel, D.K., & Nielsen, D.R. (1986). Field capacity and available water capacity. In *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods* (pp. 901-926).
- [7] Climate-Data.org. (2024). Climate: Brazzaville. Consulté le 08 novembre 2024. Disponible sur : <https://fr.climate-data.org/afrique/congo-brazzaville/brazzaville/brazzaville-4600/>.
- [8] Cornet, A. (1971). Méthodes de détermination de la capacité de rétention en eau du sol. Mémoire, DEA: Biologie Végétale, Écologie. Disponible sur : https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/vers15-11/32147.pdf.
- [9] Descoings, B. (1975). Esquisse phytogéographique du Congo. Atlas du Congo. O.R.S.T.O.M, Paris, 89 p.
- [10] Em50. (s.d.). Em50 Data Logger - User Manual, Version 4. Décagon Devices, Inc. Consulté sur <https://fr.scribd.com/document/462016520/Em50-manual-pdf>.
- [11] Guehl, J.M. (1984). Dynamique de l'eau dans le sol en forêt tropicale humide guyanaise. *Annales des Sciences Forestières*, 41(2), 195-236.
- [12] Henine, H., Tournebize, J., Chaumont, C., Blanchouin, A., Rivière, A., & Clément, R. (2024). Characterization of deep infiltrations in subsurface drained agricultural system. EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-20229. doi:10.5194/egusphere-egu24-20229.
- [13] Hillel, D. (1998) *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press, Waltham.
- [14] Hoffmann, W.A., Marchin, R.M., Abit, P., & Lau, O.L. (2011). Vegetation effects on water balance in savannas. *Ecohydrology*, 4(5), 670-679. doi:10.1002/eco.157.
- [15] Lange, H., Meier, M., & Lischeid, G. (2019). Effects of forest cover on groundwater recharge: A global analysis. *Ecohydrology*, 12(1), e2045. doi:10.1002/eco.2045
- [16] Liu, Y., Wang, T., Gao, Y., Zhang, X., & Zheng, H. (2020). Runoff and infiltration characteristics of degraded grassland in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 580, 124339. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124339.
- [17] Maertens, C. (1964). La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Annales Agronomiques*, 15(5), 539-554.
- [18] Mavimbela, S.S.W., & Van Rensburg, L.D. (2011). In-situ evaluation of internal drainage in layered soils (Tukulu, Sepane and Swartland). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8, 9797-9841.
- [19] Moukandi-Nkaya Dieudonne Guy, Deleporte Philippe. 2005. Paramétrisation de modèles de transfert hydrique dans le sol sous trois plantations d'eucalyptus dans la région de Pointe-Noire (Congo). Application à l'établissement de bilans hydriques. In : Séminaire international sur la modélisation de la pollution des sols et des nappes aquifères, Brazzaville, 4-9 juillet 2005. s.l. : s.n., 11 p. Séminaire international sur la modélisation de la pollution des sols et des nappes aquifères, Brazzaville, République du Congo, 4 Juillet 2005/9 Juillet 2005.
- [20] Muys, B., et al. (2011). Tree species diversity and forest productivity. *Forêt Méditerranéenne*, 32(4), 385-390.
- [21] Ngnepieba, P., et al. (2002). Parameters identification: an application to the Richards equation. *Revue Africaine de Recherche en Informatique et Mathématiques Appliquées*, 1, 127-157.
- [22] Nizinski, J.J., Nzila, J.D., & Moukandi-Nkaya, D.G. (2008). Bilan hydrique comparé d'une savane et d'une

- plantation d'eucalyptus dans le bassin du Kouilou (République populaire du Congo). *Climatologie*, 5, 99-112.
- [23] Nzila, J.D., Kimpouni, V., Watha-Ndoudy, N., Nanitelamio M.M., Mouhamed Salisou, Y. and Nguila-Ntsoko, D.P. (2018) Soils Typology and Floristic Diversity of the Forest of the "Cité Scientifique" of Brazzaville, Congo. *Open Journal of Ecology*, 8, 286-304. <https://doi.org/10.4236/oje.2018.84018>
- [24] Oliveira, R.S., Dawson, T.E., Burgess, S.S.O., & Nepstad, D.C. (2021). Root traits and water uptake dynamics in forest ecosystems. *Functional Ecology*, 35(5), 980-995.
- [25] Puttick, J.R., Hoffman, M.T., & Gambiza, J. (2011). Vegetation change in savanna woodlands of North-East Namibia. *African Journal of Ecology*, 49(2), 175-183. doi:10.1111/j.1365-2028.2010.01240.x.
- [26] Roose, E.J. (1977). Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. *Travaux et Documents ORSTOM*, 78.
- [27] Samba Kimbata, M.J. (1995). La déforestation de la région du Pool (Congo). *Geo-Eco-Trop*, 19(1-4), 105-118.
- [28] Song, X., Wang, Y., Li, Q., Zhou, G., & Lu, Y. (2020). Influence of vegetation on hydrological processes in forest ecosystems. *Forest Ecosystems*, 7, Article 33. doi:10.1186/s40663-020-00237-8.
- [29] Soutter, M., Musy, A., & Perrochet, P. (2007). *Ingénierie des eaux et du sol : processus et aménagements*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- [30] Topp, G.C., Davis, J.L., & Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582.
- [31] Van Lill, W.S., Kruger, F.J., & Van Wyk, D.B. (1980). The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* on streamflow from experimental catchments at Mokobulaan, Transvaal. *Journal of Hydrology*, 48, 107-118.
- [32] Ward, P.R., Micin, S.F., & Ferrante, A. (2018). Impact of soil compaction on crop production in dryland cropping systems. *Soil Science*, 183(4), 121-129. Whalley, W.R., et al. (1995). Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 35, 53-68.
- [33] Whalley, W.R., Dumitru, E., & Dexter, A.R. (1995). Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 35(1-2), 53-68.
- [34] Zerner, M. (2011). Interpolation percolation. Vol. 16, Paper 33, 981-1000.
- [35] Zribi, M., Pellarin, T., Albergel, C., Boutin, J., Calvet, J.-C., Fanise, P., & Wigneron, J.-P. (2011). Revue des méthodes d'estimation de l'humidité des sols par télédétection micro-onde passive et active et applications en Afrique de l'Ouest. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 194, 3-11.