

Caractérisation des eaux souterraines de la plaine alluviale du fleuve Mono au Bénin dans un contexte d'agriculture irriguée

Auteur : Dresse, Camille

Promoteur(s) : Brouyère, Serge; Orban, Philippe

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des mines et géologue, à finalité spécialisée en géologie de l'ingénierie et de l'environnement

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23285>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Caractérisation des eaux souterraines de la plaine alluviale du fleuve Mono au Bénin dans un contexte d'agriculture irriguée

Dresse Camille

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :

Ingénieur Civil des mines et géologue

Promoteurs :

Brouyère Serge

Orban Philippe

Année académique : **2024 – 2025**

Résumé

En raison des impacts croissants du réchauffement climatique sur les saisons de pluies, les producteurs de la plaine alluviale du fleuve Mono au Bénin ont de plus en plus recours à l'irrigation afin de garantir de bons rendements agricoles. Les eaux souterraines représentent alors une alternative prometteuse, celles-ci étant disponibles tout au long de l'année et, sous réserve d'une gestion durable, considérées comme inépuisables. Dans ce contexte, l'ONG *Join For Water* a entrepris l'installation d'une dizaine de forages à proximité de quatre zones humides : Ahoyo, Kpodji, Tozévé et Agbabadamè.

L'objectif principal de ce travail est d'améliorer la compréhension hydrogéologique de la plaine alluviale du fleuve Mono et d'évaluer la durabilité de l'exploitation de ses eaux souterraines pour l'irrigation.

L'étude des sous-sols des zones humides analysées a révélé une forte hétérogénéité des lithologies, en lien avec la nature même des dépôts alluviaux. Ceci complique par conséquent la planification de futurs ouvrages. Des essais de pompage de courte durée, similaire à celle d'une irrigation, et de longue durée ont été menés. Ceux-ci ont permis de mettre en évidence la probable absence de connexion entre des couches sableuses exploitées superficielles et profondes. De plus, les essais réalisés ont révélé une hétérogénéité de l'aquifère, marquée par des paramètres hydrauliques estimés et des temps de retour au niveau initial variables à l'échelle locale et régionale. Au cours des essais de courte durée, la stabilité des paramètres physico-chimiques de l'eau semblait indiquer l'absence d'une intrusion d'eaux issues du fleuve ou présentant un faciès hydrochimique distinct. L'analyse du suivi piézométrique mensuel réalisé par *Join For Water* n'a souligné, pour l'instant, aucune tendance à la baisse des niveaux d'eau. De plus, une première campagne hydrochimique été entreprise. Celle-ci est marquée par une importante diversité de la composition chimique des échantillons analysés et l'identification d'un échantillon présentant une conductivité et une teneur en chlorures particulièrement élevée, signe probable d'une pollution locale. En dehors de ce cas, la qualité de l'eau observée est jugée acceptable pour un usage en irrigation.

Ce travail a donc permis de conclure à une exploitation des eaux souterraines envisageable pour répondre aux besoins d'irrigation des cultures. Cependant, des recommandations sont proposées afin d'en assurer une gestion durable à long terme.

Abstract

Due to the increasing impact of global warming on rainy seasons, farmers on the alluvial plain of the Mono River in Benin are increasingly resorting to irrigation in order to guarantee good crop yields. Groundwater represents a promising alternative, as it is available throughout the year and, provided it is managed sustainably, is considered inexhaustible. Against this backdrop, the Organization *Join For Water* has installed a dozen boreholes near four wetlands: Ahoyo, Kpodji, Tozévé and Agbodadamè.

The main aim of this work is to improve hydrogeological understanding of the alluvial plain of the Mono river and to assess the sustainability of using its groundwater for irrigation.

The study of the subsoils of the wetlands analysed revealed a high degree of heterogeneity in the lithologies, linked to the very nature of the alluvial deposits. This complicates the planning of future works. Short-term pumping tests, similar to irrigation, and long-term pumping tests were carried out. These highlighted the probable lack of connection between the surface and deep exploited sand layers. The tests also revealed the heterogeneity of the aquifer, with estimated hydraulic parameters and return times to the initial level varying locally and regionally. During the short-term tests, the stability of the physico-chemical parameters of the water seemed to indicate the absence of an intrusion of water from the river or with a distinct hydrochemical facies. Analysis of the monthly piezometric monitoring carried out by *Join For Water* has not yet revealed any downward trend in water levels. In addition, an initial hydrochemical campaign has been undertaken. This was marked by a significant diversity in the chemical composition of the samples analysed and the identification of a sample with a particularly high conductivity and chloride content, a probable sign of local pollution. Apart from this case, the water quality observed is deemed acceptable for irrigation use.

This work has therefore led to the conclusion that groundwater can be used to meet crop irrigation needs. However, recommendations are proposed to ensure long-term sustainable management.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes promoteurs, Serge Brouyère et Philippe Orban, pour leur accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail. Ils m'ont offert la possibilité de réaliser un travail sur un sujet qui m'intéressait particulièrement et de vivre une expérience hors du commun au Bénin.

Merci à l'ensemble de l'équipe *Join For Water* Bénin pour leur accueil chaleureux durant ces six semaines enrichissantes. Une reconnaissance particulière envers Francis Guyon et Pierre Seeger pour leur aide et leur disponibilité qui m'ont permis de mieux comprendre les enjeux de ce travail. Merci également à Aimé pour son accompagnement et son appui précieux lors des journées de collecte de données sur le terrain.

Je remercie Joost Wellens, membre du jury, pour l'intérêt porté à ce travail et pour les échanges fructueux, au Bénin, concernant les pratiques d'irrigation.

Merci aux doctorants Victoria Collignon, Cédric Magain et Guillaume Renard pour leur disponibilité et leur aide au cours des différentes étapes de ce mémoire.

Un grand merci aux membres de ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours académique et particulièrement à ma maman pour ses relectures et nombreux conseils.

Enfin, un petit clin d'œil à mes amis et collègues de bureau qui feront de cette période un chouette souvenir.

Tables des matières

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Contexte environnemental	3
2.1. Géographie et géomorphologie.....	3
2.2. Climat.....	4
2.3. Sols et utilisation des sols	5
2.4. Hydrologie	6
2.5. Géologie.....	8
2.6. Hydrogéologie.....	11
3. Site d'étude	13
3.1. Présentation des sites d'étude	13
3.1.1. Contexte régional	13
3.1.2. Zone humide d'Ahoyo	14
3.1.3. Zone humide d'Agbobadamè	18
3.2. Monitoring des niveaux piézométriques.....	20
3.2.1. Evolution des niveaux piézométriques.....	20
3.2.2. Lien avec les niveaux d'eau dans le Mono.....	21
3.2.3. Lien avec les niveaux d'eau dans la zone humide.....	22
3.3. Bilan hydrique.....	23
3.4. Lien entre les paramètres météorologiques et les niveaux d'eau.....	25
4. Essais de pompage	27
4.1. Méthodologie d'acquisition des données.....	27
4.1.1. Essais de pompage de courte durée	27
4.1.2. Essais de pompage de longue durée	28
4.2. Méthodes d'interprétation	29
4.3. Résultats obtenus	31
4.3.1. Essais de courte durée	31
4.3.2. Essais de longue durée	34
5. Analyse chimique de l'eau.....	37
5.1. Mesures des paramètres physico-chimiques pendant les essais de pompage	37
5.2. Campagne d'échantillonnage.....	38
5.3. Description et qualité du jeu de données	39
5.4. Analyse statistique	41
5.5. Représentation graphique de l'hydrochimie générale.....	42
5.5.1. Diagramme de Piper.....	42
5.5.2. Diagramme de Stiff.....	43
5.5.3. Diagramme de Schöeller.....	44

Tables des matières

5.5.4. Conclusion générale des diagrammes	45
5.6. Analyses multivariées	46
5.6.1. Matrice de corrélations.....	46
5.6.2. Matrices auto-organisantes (SOMs)	49
5.7. Distribution spatiale des paramètres physico-chimiques et des concentrations.....	51
5.7.1. Conductivité et pH	51
5.7.2. Concentrations ioniques	52
5.8. Aptitude à l'irrigation	55
5.8.1. Indices utilisés.....	55
5.8.2. Résultats	56
6. Discussion générale	60
7. Conclusion	62
8. Bibliographie.....	64
9. Annexes.....	68
9.1. Carte pédologique de reconnaissance	68
9.2. Coupes hydrogéologiques	68
9.3. Monitoring des niveaux piézométrique.....	69
9.4. Lien entre les niveaux piézométriques et les niveaux d'eau dans le Mono	70
9.5. Lien entre les niveaux piézométriques et les eaux utiles.....	71
9.6. Evolution des profondeurs d'eau durant les essais de courte durée.....	72
9.7. Résultats des essais de longue durée.....	72
Premier essai :	72
Second essai :	74
9.8. Evolution des paramètres physico-chimiques.....	75
9.9. Résultats des analyses des échantillons d'eau.....	77
9.10. Analyse statistique : boites à moustaches	78
9.11. Diagrammes de Schoëller	81
9.12. Résultats des SOMs	82
9.13. Distribution spatiale des concentrations ioniques	82
9.14. Indices d'aptitude à l'irrigation.....	83
9.15. Classification de Wilcox	83
9.16. Directives de la FAO pour l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation.....	84

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la commune d'Athiémé au Bénin.....	3
Figure 2 : Géomorphologie du bassin sédimentaire côtier du Bénin (modifié d'après Dossou et al., 2021)	4
Figure 3 : Précipitations et température mensuelles moyennes entre 1991 et 2020 dans le département du Mono (The World Bank Group, 2021)	4
Figure 4 : Photographie du sol sur une zone d'étude	5
Figure 5 : Localisation du bassin versant du Mono.....	6
Figure 6 : Profil en long du fleuve Mono (d'après Amoussou, 2010)	7
Figure 7 : Profil en long du fleuve Mono au Bénin (d'après Le Barbé et al., 1993).....	7
Figure 8 : Evolution du débit moyen mensuel dans le Mono à la station d'Athiémé entre 2002 et 2022.....	8
Figure 9 : Carte géologique du Bénin (Schlüter, 2006).....	9
Figure 10 : Carte géologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin (d'après IRB, 1989)	9
Figure 11 : Carte hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin (d'après Bourguet et al., 2012).....	12
Figure 12 : Localisation des zones humides et des forages dans la zone d'étude	14
Figure 13 : Localisation des forages autour de la zone humide d'Ahoyo.....	14
Figure 14 : Coupe hydrogéologique F1-F4.....	15
Figure 15 : Coupe hydrogéologique F1-F5	15
Figure 16 : Localisation de la coupe traversant la zone humide d'Ahoyo jusqu'au fleuve.....	16
Figure 17 : Coupe traversant la zone humide d'Ahoyo et le fleuve Mono en octobre 2024.....	17
Figure 18 : Coupe traversant la zone humide d'Ahoyo et le fleuve Mono en mars 2025	17
Figure 19 : Coupe hydrogéologique F8-F9	18
Figure 20 : Localisation de la coupe traversant la zone humide d'Agbabadamè jusqu'au fleuve	19
Figure 21 : Coupe traversant la zone humide d'Agbabadamè et le fleuve Mono en octobre 2024.....	19
Figure 22 : Coupe traversant la zone humide d'Agbabadamè et le fleuve Mono en mars 2025	19
Figure 23 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis novembre 2021 dans les forages privés (1).....	20
Figure 24 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis novembre 2021 dans les forages privés (2).....	20
Figure 25 : Lien niveau d'eau dans le fleuve – profondeur d'eau dans les forages durant toute la période étudiée	21
Figure 26 : Lien niveau d'eau dans le fleuve – profondeur d'eau dans les forages (1).....	21
Figure 27 : Lien hauteur d'eau dans la zone humide - profondeur d'eau dans les forages.....	22
Figure 28 : Sommes mensuelles des précipitations, ETP, ETR et des eaux utiles en considérant un stock initial de 50 mm	24
Figure 29 : Sommes mensuelles des précipitations, ETP, ETR et des eaux utiles en considérant un stock initial de 125 mm	24
Figure 30 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages peu profonds	25
Figure 31 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages de profondeur intermédiaire (1).....	26
Figure 32 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages profonds	26
Figure 33 : Localisation des forages dans lesquels les essais de courte durée ont été réalisés.....	27
Figure 34 : Localisation des forages dans lesquels les essais de longue durée ont été réalisés.....	28
Figure 35 : Evolution du rabattement dans le puits d'observation du premier ELD durant le pompage	29
Figure 36 : Cône de dépression du premier ELD	30
Figure 37 : Evolution du rabattement en fonction du $\log(t)$ dans le puits d'observation	30
Figure 38 : Evolution du rabattement en fonction de $\log(t/t')$ dans le puits de pompage.....	31
Figure 39 : Evolution du rabattement dans les forages durant le pompage et la remontée	32
Figure 40 : Evolution du rabattement dans les forages durant la remontée où les lignes en pointillés mettent en évidence la valeur du rabattement stabilisé durant le pompage	32
Figure 41 : Distribution spatiale des temps de retour à 90% du niveau initial	33
Figure 42 : Evolution du rabattement durant le premier ELD dans le puits de pompage F3 (gauche) et le puits d'observation F4 (droite)	34
Figure 43 : Evolution du rabattement durant le second ELD dans le puits de pompage F1.....	35
Figure 44 : Variation du rabattement dans le puits d'observation Forage Privé	35
Figure 45 : Distribution spatiale des mesures de potentiel redox.....	37
Figure 46 : Evolution de la conductivité électrique durant les essais de courte durée : pour tous les forages (à gauche) et en excluant F2 (à droite)	38
Figure 47 : Localisation des points d'échantillonnage.....	39

Liste des figures

Figure 48 : Diagramme de Piper des échantillons prélevés dans les différents forages et le Mono.....	42
Figure 49 : Diagramme de Piper des échantillons prélevés dans les différents forages et le Mono - groupes hydrochimiques.....	43
Figure 50 : Diagramme de Stiff Piper des échantillons prélevés dans les différents forages et le Mono où les forages représentés en orange proviennent de la zone humide d'Ahoyo, en jaune de Kpodji, en vert de Tozévé et en mauve d'Agbobadamè.....	44
Figure 51 : Diagramme de Stiff du forage 2	44
Figure 52 : Diagramme de Schöeller des échantillons prélevés dans les différents forages et le Mono où les forages représentés en orange proviennent de la zone humide d'Ahoyo, en jaune de Kpodji, en vert de Tozévé et en mauve d'Agbobadamè.....	45
Figure 53 : Matrice des coefficients de corrélation.....	47
Figure 54 : Matrice des composants et répartition des différents échantillons au sein des clusters	49
Figure 55: Distribution spatiale de la conductivité	51
Figure 56 : Distribution spatiale du pH.....	52
Figure 57 : Distribution spatiale des concentrations en magnésium	52
Figure 58 : Distribution spatiale des concentrations en calcium	53
Figure 59 : Distribution spatiale des concentrations en ion potassium	53
Figure 60 : Distribution spatiale des concentrations en chlorures.....	54
Figure 61 : Distribution spatiale des concentrations en nitrates	54
Figure 62 : Diagramme de Riverside (à gauche) et Wilcox (à droite) où les forages représentés en orange proviennent de la zone humide d'Ahoyo, en jaune de Kpodji, en vert de Tozévé et en mauve d'Agbobadamè ..	56
Figure 63 : Diagramme de Wilcox log où les forages représentés en orange proviennent de la zone humide d'Ahoyo, en jaune de Kpodji, en vert de Tozévé et en mauve d'Agbobadamè	57
Figure 64 : Carte pédologique de reconnaissance avec la zone étudiée encadrée en rouge (d'après Volkoff, 1976)	68
Figure 65 : Coupe hydrogéologique F1-F3	68
Figure 66 : Coupe hydrogéologique F3-F4	68
Figure 67 : Coupe hydrogéologique F3-F5	69
Figure 68 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis février 2022 dans les forages privés (3).....	69
Figure 69 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis février 2023 dans les forages privés et les forages de JFW (4).....	69
Figure 70 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis mai 2024 dans les forages de JFW (5)	70
Figure 71 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis mai 2024 dans les forages de JFW (6)	70
Figure 72 : Lien niveau d'eau dans le fleuve – profondeur d'eau dans les forages (2).....	70
Figure 73 : Lien hauteur d'eau dans le fleuve – profondeur d'eau dans les forages (3).....	71
Figure 74 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages de profondeur intermédiaire (2)	71
Figure 75 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages de profondeur intermédiaire (3)	71
Figure 76 : Evolution des profondeurs d'eau durant les essais de courte durée	72
Figure 77 : ELD1 - Evolution du rabattement dans le puits de pompage F3 durant toute la période de mesures (gauche) et le pompage (droite)	72
Figure 78 : ELD1 - Evolution du rabattement en fonction du $\log(t)$ durant le régime transitoire dans le puits de pompage F3.....	72
Figure 79 : ELD1 - Evolution du rabattement en fonction de $\log(t/t')$ dans le puits de pompage F3 durant la remontée.....	73
Figure 80 : ELD1 - Evolution du rabattement dans le puit d'observation F4 durant toute la période de mesures (gauche) et le pompage (droite)	73
Figure 81 : ELD1 - Evolution du rabattement en fonction du $\log(t)$ durant le régime transitoire dans le puits d'observation F4	73
Figure 82 : Cône de dépression du premier ELD	73
Figure 83 : ELD1 - Evolution du rabattement en fonction de $\log(t/t')$ dans le puits d'observation F4 durant la remontée.....	74
Figure 84 : ELD2 - Evolution du rabattement dans le puits de pompage F1 durant toute la période de mesures (gauche) et le pompage (droite)	74
Figure 85 : ELD2 - Evolution du rabattement en fonction de $\log(t/t')$ dans le puits de pompage F1 durant la remontée.....	74

Liste des figures

Figure 86 : ELD2 - Evolution du rabattement dans le puits d'observation F5 durant toute la période de mesures	75
Figure 87 : Evolution de la concentration en oxygène dissous durant les pompages de courte durée	75
Figure 88 : Evolution du pH durant les pompages de courte durée	75
Figure 89 : Evolution du potentiel redox durant les pompages de courte durée	76
Figure 90 : Boites à moustaches des analyses des échantillons d'eau	81
Figure 91 : Diagrammes de Schoëller des échantillons F1 et F4 & F3-T0 et F3-T1.....	81
Figure 92 : Matrice U obtenue par la méthode des SOMs	82
Figure 93 : Distribution spatiale des concentrations en sulfates	82
Figure 94 : Distribution spatiale des concentrations en ions sodium	83

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1 : Unités stratigraphiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin (d'après Géohydraulique, 1985)	10
Tableau 2 : Forages réalisés par Join For Water	13
Tableau 3 : Niveaux piézométriques en octobre 2024 et mars 2025 et altitudes des crépines dans les forages de la zone humide d'Ahoyo	16
Tableau 4 : Niveaux piézométriques en octobre 2024 et mars 2025 et altitudes des crépines dans les forages de la zone humide d'Agbabadamé.....	18
Tableau 5 : Résumé des essais de courte durée.....	27
Tableau 6 : Résumé des essais longue durée.....	28
Tableau 7 : Résultats des essais de courte durée	33
Tableau 8 : Résultats du premier essai de longue durée.....	34
Tableau 9 : Résultats du second essai de longue durée	36
Tableau 10 : Récapitulatif des échantillons prélevés	39
Tableau 11 : Valeurs des concentrations totales en anions, cations et des balances ioniques pour chaque échantillon	40
Tableau 12 : Comparaison entre les conductivités et les pH mesurés sur le terrain et en labo	40
Tableau 13 : Analyse statistique de la composition des échantillons d'eau souterraine analysés et résultats de l'analyse de l'échantillon provenant du fleuve Mono	41
Tableau 14 : Caractéristiques des forages.....	46
Tableau 15 : Comparaison des paramètres hydrochimiques utilisés pour les SOMs entre les clusters définis....	50
Tableau 16 : Comparaison des paramètres hydrochimiques analysés entre les clusters définis	50
Tableau 17 : Caractéristiques par paramètres de chaque groupe délimité par la méthode SOMs.....	51
Tableau 18 : Evaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le SAR (Richards, 1954)	55
Tableau 19 : Evaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le risque de salinité (Richards, 1954).....	55
Tableau 20 : Evaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le pourcentage de sodium (Wilcox, 1955)	56
Tableau 21 : Evaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le RSC (Eaton, 1950)	56
Tableau 22 : Classification de la qualité des eaux pour l'irrigation des échantillons selon Wilcox.....	57
Tableau 23 : Classification de la qualité des eaux pour l'irrigation des échantillons selon la FAO	59
Tableau 24 : Caractéristiques des forages dont les paramètres physico-chimiques ont été étudiés	76
Tableau 25 : Résultats des analyses des échantillons d'eau.....	77
Tableau 26 : Analyse des éléments corrélés avec la méthode des SOMs	82
Tableau 27 : Indices d'aptitude à l'irrigation des échantillons.....	83
Tableau 28 : Classification de Wilcox sur l'aptitude à l'irrigation des eaux.....	83
Tableau 29 : Directives de la FAO sur la qualité des eaux d'irrigation (d'après Ayers & Westcot, 1994)	84

1. Introduction

Le secteur de l'agriculture joue un rôle majeur au Bénin. En 2021, il représentait 27% du Produit Intérieur Brut et employait près de 60% de la population active. Cependant, les conséquences du réchauffement climatique pèsent déjà sur le secteur agricole. La variabilité accrue des précipitations, les hausses de température et la multiplication des évènements météorologiques extrêmes provoquent des baisses significatives de rendement pour les cultures (FAO, 2016 ; Ezin *et al.*, 2018 ; MAEP, 2021).

Dans la plaine alluviale du fleuve Mono, face à la variabilité des saisons des pluies marquées par un début tardif, des interruptions prolongées des précipitations en cours de saison ainsi que de fortes irrégularités interannuelles, les producteurs sont de plus en plus contraints de recourir à l'irrigation afin de garantir de bons rendements. Parmi les ressources hydriques disponibles, les eaux souterraines constituent une alternative intéressante. En effet, celles-ci sont disponibles tout au long de l'année et, sous réserve d'une gestion durable, elles peuvent être considérées comme inépuisables. Par ailleurs, cette région, classée comme zone à potentiel hydrogéologique élevé et présentant des débits d'exploitations très satisfaisants, est favorable à leur exploitation (Bourguet *et al.*, 2012 ; Gbaguidi, 2014). On assiste, par conséquent, depuis quelques années, à un développement de puits d'une profondeur de quelques dizaines de mètres, destinés à exploiter ces eaux souterraines.

Dans ce contexte, l'ONG *Join For Water* a entrepris l'installation d'une dizaine de forages à proximité de quatre zones humides dans la plaine alluviale du Mono : Ahoyo, Kpodji, Tozévé et Agbabadamè. Ce projet s'est accompagné de la fourniture d'équipements d'irrigation aux producteurs locaux. L'organisation assure également un suivi piézométrique mensuel de la nappe et a mis en place un protocole d'essais visant à caractériser les lithologies et les puits.

Face au développement de l'utilisation des eaux souterraines, il est donc crucial d'en améliorer la connaissance, celles-ci étant jusqu'ici assez peu étudiées. Une meilleure compréhension du comportement de la nappe permettrait de procéder à une exploitation durable de cette ressource pour l'irrigation, sans mettre en danger les eaux souterraines et les zones humides, véritables réservoirs de biodiversité. Ce travail s'inscrit dans cette démarche, avec pour objectif principal de contribuer à l'amélioration des connaissances hydrogéologiques de la plaine alluviale et d'évaluer la durabilité de cette exploitation. Il repose sur une analyse complète des données piézométriques collectées par *Join For Water*, une caractérisation hydrodynamique des eaux souterraines via la réalisation des essais de pompage et la réalisation d'une première campagne hydrochimique.

Dans ce travail, après avoir présenté le contexte environnemental de la zone d'étude, une description plus détaillée des sites analysés sera effectuée, accompagnée d'une analyse de l'évolution des niveaux piézométriques et de leurs liens avec les niveaux d'eaux de surface et les paramètres météorologiques. Ensuite, deux composantes essentielles de l'hydrogéologie seront explorées. La première concerne l'interprétation d'essais de pompage, qui permettra de mieux comprendre le comportement de la nappe face aux sollicitations des pompages effectués et de quantifier ses paramètres hydrauliques. La seconde porte sur une analyse chimique des eaux souterraines, incluant une analyse descriptive du jeu de données (statistique et diagrammes), des analyses multivariées, une étude de la distribution spatiale des éléments, ainsi qu'une évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation. Enfin, les résultats obtenus feront l'objet

Introduction

d'une discussion générale permettant d'apporter des éléments de réponse quant à la durabilité de l'exploitation des eaux souterraines.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une collaboration avec l'ONG *Join For Water*, active dans la gestion durable des ressources en eau, notamment au Bénin. L'ensemble des données utilisées pour la réalisation de ce travail a été récolté durant un stage, de six semaines, réalisé au sein de cet organisme.

2. Contexte environnemental

2.1. Géographie et géomorphologie

La zone étudiée se situe dans la plaine alluviale du fleuve Mono au Bénin, un pays d'Afrique de l'Ouest d'une superficie de 114 763km². Le Bénin est limité par l'océan Atlantique au Sud et partage ses frontières terrestres avec le Togo à l'Ouest, le Burkina Faso au Nord-Ouest, le Niger au Nord et le Nigéria à l'Est (Gbaguidi, 2014).

L'ensemble des sites est localisé sur la commune d'Athiémé (Figure 1), dans le sud-ouest du Bénin à environ 25 kilomètres de la côte. Cette commune est limitée à l'Ouest par le fleuve Mono, servant de frontière naturelle entre le Togo et le Bénin.

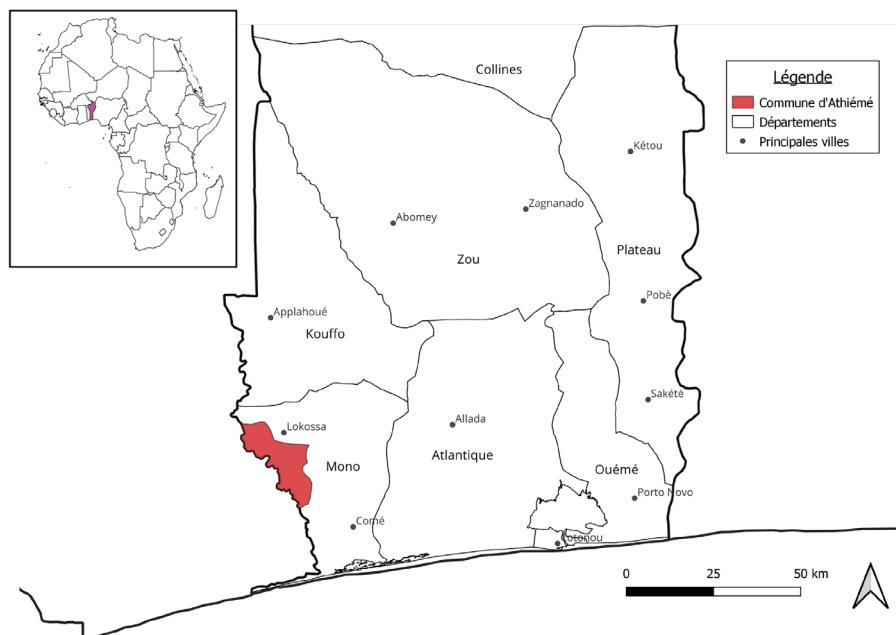


Figure 1 : Localisation de la commune d'Athiémé au Bénin

Concernant la géomorphologie générale, la zone d'étude, localisée par une flèche rouge dans la Figure 2, se trouve au sein du bassin sédimentaire côtier du Bénin. Celui-ci est caractérisé par deux zones principales de plateaux (nord et sud), séparées par la dépression de Lama orientée ENE-WSW. Ces zones sont entaillées par les vallées nord-sud des rivières du Couffo, de l'Ouémé et du Mono ; servant de limites entre les différents plateaux du bassin sédimentaire et y définissant ainsi au total six plateaux principaux (Lebarbé *et al.*, 1993 ; Dossou *et al.*, 2021).

Contexte environnemental

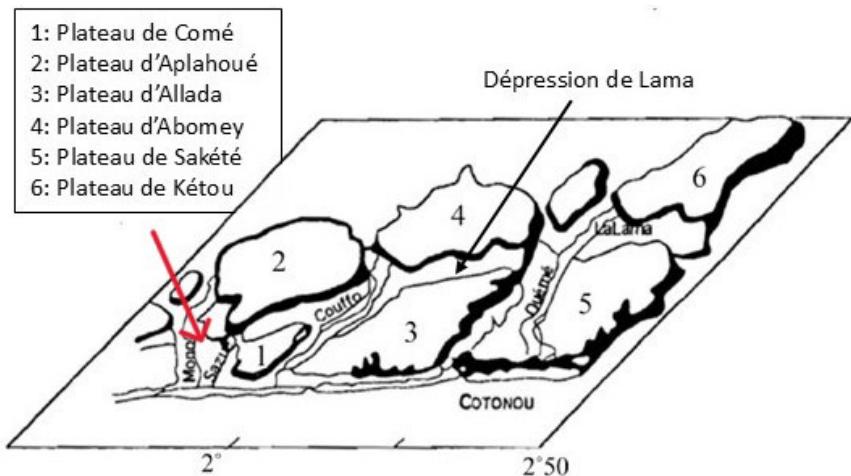


Figure 2 : Géomorphologie du bassin sédimentaire côtier du Bénin (modifié d'après Dossou *et al.*, 2021)

2.2. Climat

Le Bénin est divisé en trois zones climatiques en raison des différentes positions géographiques et du relief des régions (Le Barbé *et al.*, 1993 ; Gruber *et al.*, 2009 ; Gbaquidi, 2014) :

- Une zone subéquatoriale de la côte au centre du Bénin.
- Une zone soudano-guinéenne de transition.
- Une zone soudanienne semi-aride dans le nord.

La région étudiée est située dans la zone climatique subéquatoriale, caractérisée par un régime bimodal à quatre saisons (deux saisons de pluies et deux saisons sèches). La première saison de pluie se déroule, environ, d'avril à juin/juillet et la seconde de septembre à novembre (Figure 3). Celles-ci sont marquées par des humidités relatives très élevées (Gruber *et al.*, 2009 ; Dossou *et al.*, 2021).

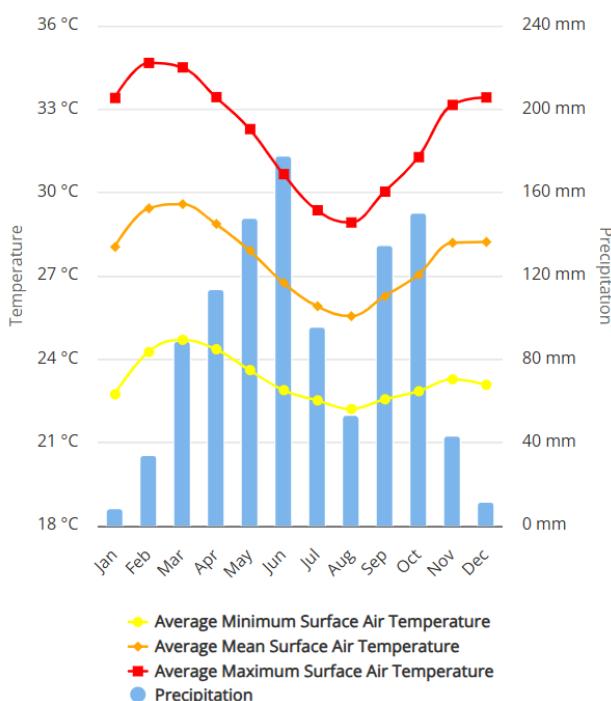


Figure 3 : Précipitations et température mensuelles moyennes entre 1991 et 2020 dans le département du Mono (The World Bank Group, 2021)

Contexte environnemental

Au sud-ouest du Bénin, les précipitations annuelles avoisinent les 900mm/an (Agossou *et al.*, 2022). Une étude menée par Nakou *et al.*, 2023, sur la variation de celles-ci dans le bassin versant du Mono, a mis en évidence une augmentation d'environ 8.45% entre 1980 et 2014.

En raison du changement climatique, le déclenchement des saisons de pluies et les volumes de précipitations sont très variables d'une année à l'autre, rendant très incertaines les conditions climatiques. De plus, depuis le début des années 2000, la fréquence des inondations dans la plaine alluviale est en augmentation, entraînant d'importants dégâts matériels et des pertes humaines (Gruber *et al.*, 2009 ; Nakou *et al.*, 2023). Cette augmentation marquée des événements très humides et extrêmes dans le bassin laisse présager des inondations et catastrophes préoccupantes dans le futur (Nakou *et al.*, 2022).

2.3. Sols et utilisation des sols

D'après la carte pédologique de reconnaissance du Dahomey (Annexe 9.1), les sols de la zone d'étude sont des sols hydromorphes. On retrouve des sols hydromorphes humiques à gley non salés (sur matériau alluvio-colluvial fluviatile) et des sols hydromorphes à pseudo-gley à tâche et concrétions. La Figure 4 présente une photographie du sol sur une zone d'étude.



Figure 4 : Photographie du sol sur une zone d'étude

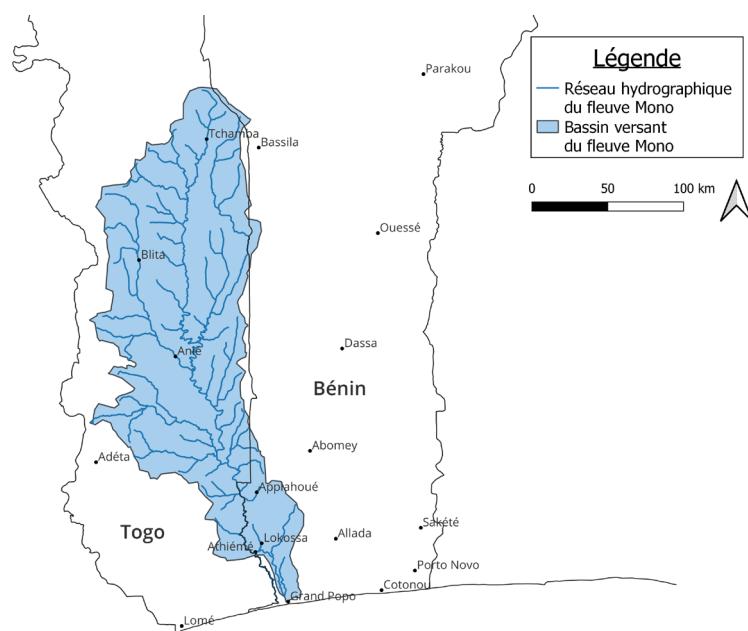
La plaine alluviale du Mono est principalement composée de champs de cultures, de savanes, de prairies marécageuses et de mangroves. On recense dans cette région plusieurs ethnies constituées en majorité d'agriculteurs et de pêcheurs (Ago *et al.*, 2005).

2.4. Hydrologie

Au sud du Bénin, s'écoulent principalement trois rivières, le Couffo, l'Ouémé et le Mono, qui séparent les différents plateaux (Figure 2).

La zone d'étude se situe dans la plaine alluviale du fleuve Mono qui prend sa source dans les monts Koura, sur la commune de Bassila, au Togo. Long de 530 kilomètres, il coule d'abord au Togo avant de servir de frontière entre le Bénin et le Togo sur ses 150 derniers kilomètres. Il se jette finalement dans l'océan Atlantique par un large delta appelé « Bouche du Roi ». Dans sa partie aval, le fleuve est sujet à des intrusions d'eau de la mer. Sa profondeur varie de 3 à 8 mètres, selon les périodes et les sections (Amoussou, 2010).

La superficie de son bassin versant est d'environ 25.000 km², dont environ 21.000 km² au Togo et 4.000 km² au Bénin (Figure 5) (Ago *et al.*, 2005 ; Emmanuel *et al.*, 2019).



Parmi les principaux affluents du fleuve Mono, on trouve l'Ogou (210 kilomètres de long) et l'Anié (161 kilomètres de long), qui prennent leur source respectivement dans le massif de Tchaoudjo, à 400 mètres d'altitude (pente moyenne de 1,2 m/km), et sur le mont Fazao, à 500 mètres d'altitude (pente moyenne de 2,5 m/km). Plus en aval, l'Amou (114 kilomètres de long) et l'Amoutchou (62 kilomètres de long) proviennent du plateau Akposso, à environ 800–830 mètres d'altitude, avec des pentes moyennes marquées de 6,45 m/km et 11 m/km. Enfin, le Kra (69 kilomètres de long) prend sa source au mont Haïto, à 390 mètres d'altitude, avec une pente moyenne de 3,6 m/km (Amoussou, 2010).

Les Figure 6 et Figure 7 représentent respectivement les profils en long du fleuve Mono sur toute sa longueur et uniquement au Bénin.

Contexte environnemental

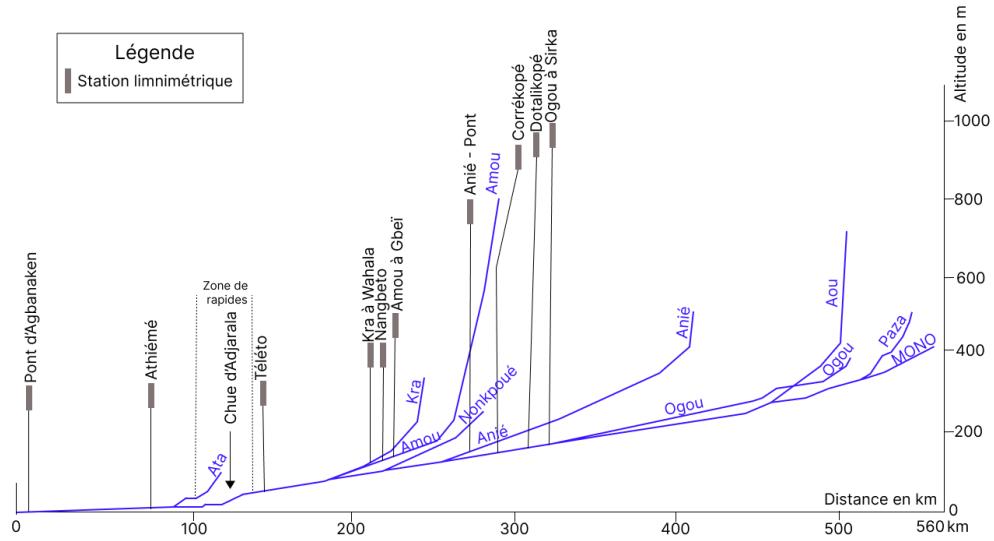


Figure 6 : Profil en long du fleuve Mono (d'après Amoussou, 2010)

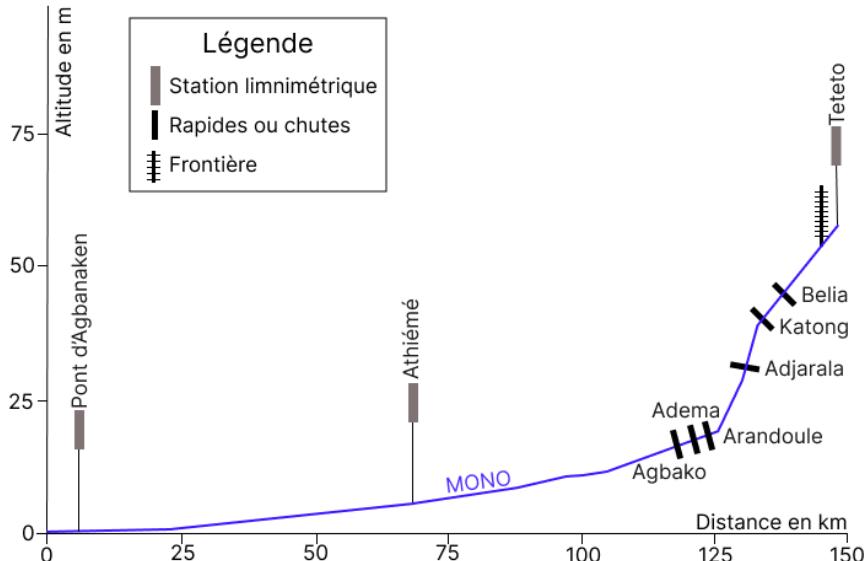


Figure 7 : Profil en long du fleuve Mono au Bénin (d'après Le Barbé et al., 1993)

Dans la vallée du Mono au Bénin, celui-ci s'écoule dans un premier temps avec une pente de 1.5 à 3 m/km et présente de nombreux rapides. Il rejoint ensuite le bassin sédimentaire côtier et s'écoule dans une large vallée alluviale où sa pente diminue fortement (0.06 à 0.4 m/km). Dans la vallée alluviale existe un réseau hydrographique très développé, avec la présence de mares et de lacs à sa périphérie (Le Barbé *et al.*, 1993 ; Ago *et al.*, 2005).

Le barrage de Nangbeto (Figure 6), d'une capacité de 1715Mm³, a été construit sur le fleuve à environ 150 kilomètres de la côte. Son réservoir couvre une surface d'environ 180 km² et a une profondeur maximale de 40 mètres. Celui-ci a été construit avec pour objectifs une production d'énergie électrique, une régularisation partielle (30 %) du cours du fleuve Mono, l'irrigation des terres et la promotion de la pêche pour soutenir les efforts des communautés rurales. L'influence de ce barrage sur les crues est donc non négligeable. De plus, des volumes importants de sédiments sont piégés par la retenue. Une plus forte érosion des berges pour compenser le déficit de charges solides a donc été observée en aval du barrage (Amoussou, 2010).

Contexte environnemental

L'analyse des débits du Mono mesurés à la station d'Athiébé de 2002 à 2022 montre un débit moyen de $154\text{m}^3/\text{h}$. Les plus élevés sont généralement observés durant le mois de septembre, avec un débit moyen de $375\text{m}^3/\text{h}$ (Figure 8). Durant cette période, le fleuve sort généralement de son lit et inonde une partie des champs à proximité.

La corrélation pluie/débit montre que les débits des hautes eaux dans le bassin sont à la fois liés aux précipitations du mois en cours mais aussi à celles des mois précédents de l'année en cours. En effet, le barrage permet un stockage d'eau qui sera lâché durant les périodes d'étiage. Suite à la construction du barrage, une faible diminution du débit maximum et une augmentation du débit minimal annuels ont également été observées (Amoussou, 2010).

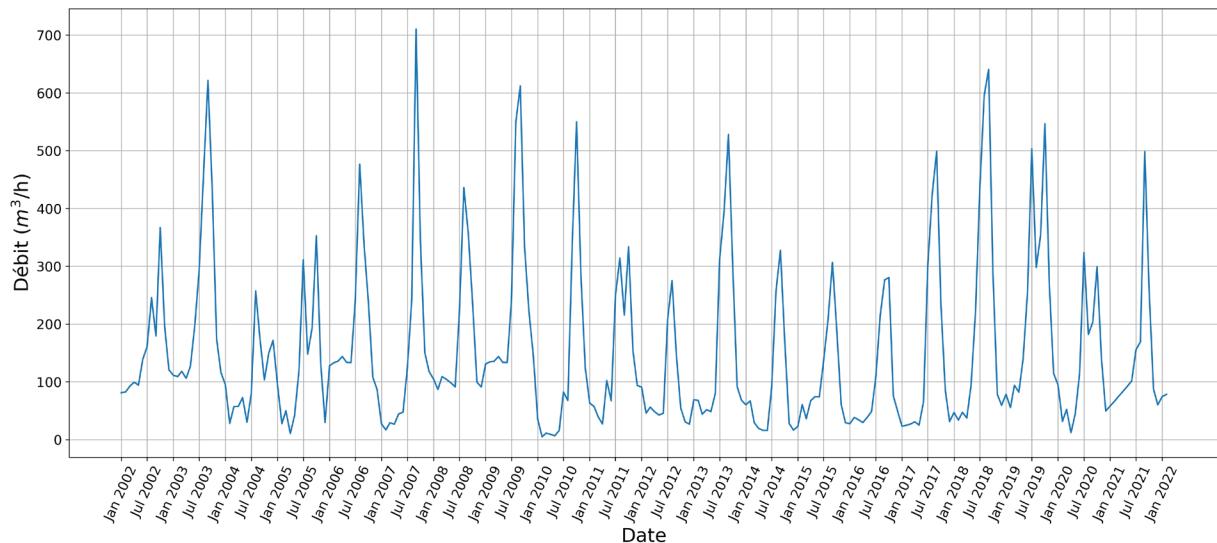


Figure 8 : Evolution du débit moyen mensuel dans le Mono à la station d'Athiébé entre 2002 et 2022

2.5. Géologie

Au Bénin, la géologie est principalement divisée en deux grandes unités, séparées environ au niveau de la 7^{ème} latitude (Figure 9) (Schlüter, 2006).

Dans le Nord, un socle précambrien contient des roches cristallines du Néoprotérozoïque (schistes, micaschistes, gneiss, quartzites, roches carbonatées, granites et amphiboles) ayant subi les orogènes Dahomeyenne et/ou Atacorienne du Néoprotérozoïque. Celui-ci est partiellement recouvert au Nord-Ouest par des sédiments du Paléozoïque au Néoprotérozoïque et au Nord-Est par des dépôts alluviaux de l'âge Néogène (Lebarbé *et al.*, 1993 ; Schlüter, 2006).

Contexte environnemental

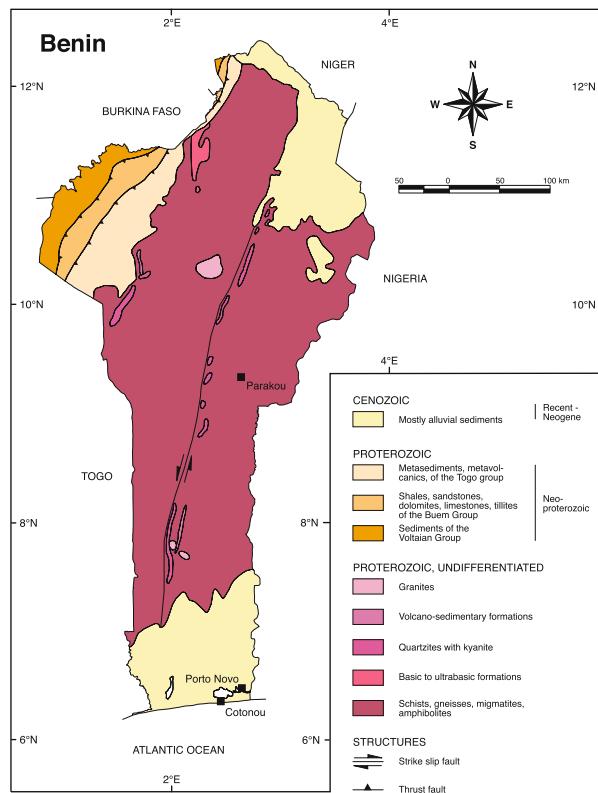


Figure 9 : Carte géologique du Bénin (Schlüter, 2006)

Le Sud du Bénin contient, quant à lui, des roches sédimentaires de l'âge Crétacé à récent, déposées en discordance sur le socle cristallin, formant le bassin sédimentaire côtier (Schlüter, 2006 ; Glodji *et al.*, 2019). Ce bassin s'étend du Ghana au Nigéria. Il présente une structure monoclinale très légèrement inclinée (pendage inférieur à 1%) vers le SSE (Houessou & Lang, 1978 ; Dossou *et al.*, 2021).

La Figure 10 présente la carte géologique du bassin sédimentaire côtier. Au total, huit unités stratigraphiques y ont été énumérées (Tableau 1), résultant des variations successives du niveau de la mer (Géohydraulique, 1958 ; Dossou *et al.*, 2021).

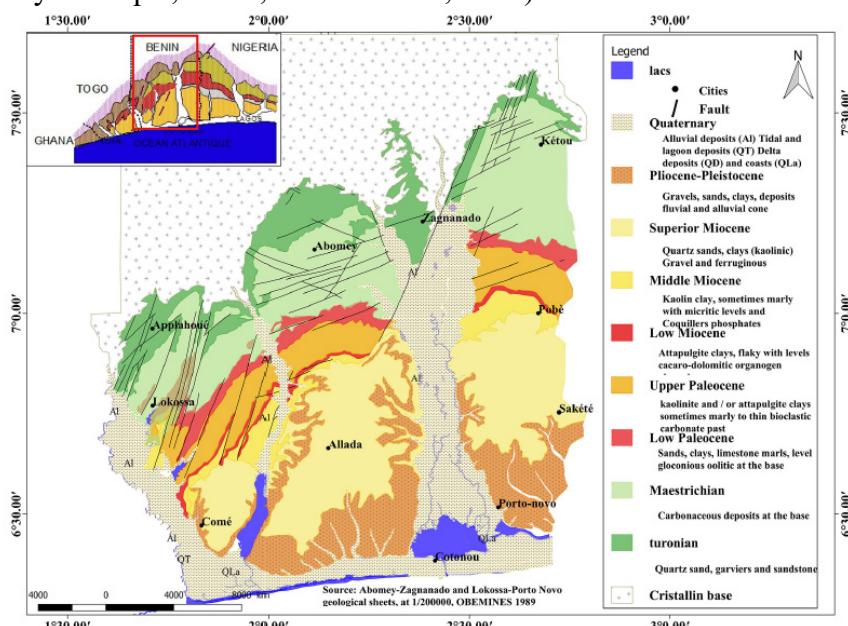


Figure 10 : Carte géologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin (d'après IRB, 1989)

Contexte environnemental

Tableau 1 : Unités stratigraphiques du bassin sédimentaire côtier du Bénin (d'après Géohydraulique, 1985)

Périodes	Unités stratigraphiques	Epaisseur (m)	Perméabilité	Lithologie dominante	Aquifère
Turonien-Coniacien	I	50 ~ 150	Perméable	Sables quartzitiques avec galets, intercalations de niveaux marno-calcaires	Aquifère du sable du Crétacé supérieur
Maastrichtien	IIa	< 180	Imperméable	Argiles, marnes	/
Paléocène inférieur et moyen	IIb	< 50	Perméable	Sables, calcaires	Aquifère des calcaires du Paléocène
Paléocène supérieur	IIIa	~ 155	Imperméable	Argiles et marnes	/
Éocène inférieur	IIIb			Marnes	
Éocène moyen	IV	~ 170		Marnes	
Miocène inférieur	V	~ 145	Perméable	Sables quartzitiques	Aquifère des sables du Miocène supérieur-Pliocène
Miocène supérieur	VI	< 120	Perméable	Sables quartzitiques	
Miocène-Pleistocene	VII	~ 15	Semi-perméable	Sables fins	
Quaternaire	VIII	~ 50	Perméable, imperméable	Sables et argilites	Aquifère du Quaternaire

Les formations du Quaternaire sont d'origine diverses (Lebarbé *et al.*, 1993) :

- Formations littorales d'origine marine (sable de plage avec des niveaux d'argiles vaseuses).
- Alluvions des vallées du Mono et de l'Ouémé allant jusqu'à 100 mètres d'épaisseur, où se situe la zone d'étude.

2.6. Hydrogéologie

Du point de vue hydrogéologique, dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin, les formations géologiques sont regroupées en quatre aquifères en raison de leurs natures lithologiques (Glodji *et al.*, 2019 ; Dossou *et al.*, 2022).

On dénombre, du plus ancien au plus récent, les aquifères suivants (Glodji *et al.*, 2019 ; Dossou *et al.*, 2021 ; Agossou *et al.*, 2022 ; Dossou *et al.*, 2022) :

- *L'aquifère du sable du Crétacé supérieur* (Unité I) : pouvant atteindre 150 mètres d'épaisseur. Il est principalement libre au nord de la dépression de Lama et devient captif ou artésien dans le sud, recouvert par une couche d'argiles et de marnes d'épaisseur comprise entre 15 et 85 mètres du Maastrichtien et de l'Eocène
- *L'aquifère des calcaires du Paléocène* (Unité IIb) : d'épaisseur variable entre quelques mètres et un maximum de 30 mètres. Il est essentiellement captif sous les argilites et marnes du Paléocène supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen
- *L'aquifère des sables du Miocène supérieur-Pliocène* (Unités V, VI et VII) : d'épaisseur de maximum 120 mètres ; nappe généralement libre
- *L'aquifère du Quaternaire* (Unité VIII) représenté par les aquifères des sables littoraux, d'une part et ceux des sables alluviaux en alternance avec des couches de silt et d'argile d'autre part. Son épaisseur maximale est d'environ 20 mètres.

L'aquifère exploité dans la plaine alluviale du Mono appartient à l'unité aquifère du Quaternaire. Dans cette zone, celui-ci est généralement captif, sous une couche superficielle d'argilites, avec également des phénomènes artésiens (Dossou *et al.*, 2021). Plus en amont, l'épaisseur des alluviaux diminue pour devenir insignifiante. Les débits d'exploitation de cet aquifère se limitent généralement entre 1 et 20 m³/h (Achidi *et al.*, 2010).

En 2010, le Ministère de l'Energie et de l'Eau de la République du Bénin a publié un rapport de *Mise en place d'un dispositif de protection des zones de captage d'eau potable*, rédigé par Achidi *et al.* Les forages étudiés sur la commune d'Athiéché de l'aquifère du Quaternaire présentaient une épaisseur de zone non saturée variable entre 30 et 50 mètres et une transmissivité estimée de 10⁻³ à 10⁻² m²/s. De plus, l'aquifère a été défini comme aquifère de pore, en opposition à un aquifère de fissure.

La carte hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin (Figure 11) présente la plaine alluviale du Mono comme zone favorable pour l'exploitation des eaux souterraines (Bourguet *et al.*, 2012)

Contexte environnemental

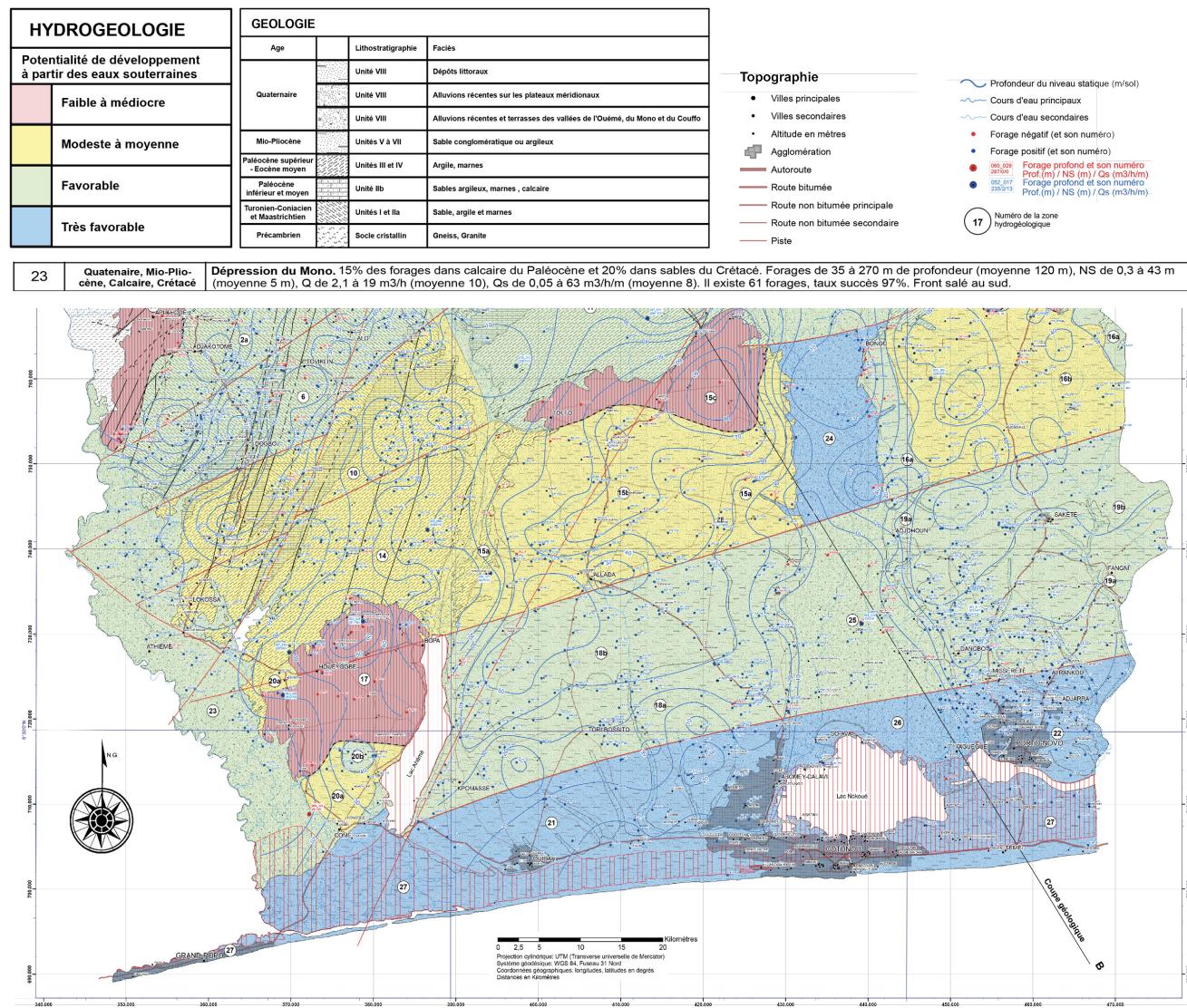


Figure 11 : Carte hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier du Bénin (d'après Bourguet et al., 2012)

3. Site d'étude

3.1. Présentation des sites d'étude

3.1.1. Contexte régional

L'ensemble des sites étudiés se situe dans la plaine alluviale du fleuve Mono sur la commune d'Athiébé.

Dans cette région, l'utilisation de forages augmente de plus en plus afin de répondre aux demandes en eau pour l'agriculture durant les saisons sèches. Certains producteurs possèdent donc leurs propres forages, que l'on appellera dans ce travail « forages privés ». L'ASBL *Join For Water* (*JFW*) a quant à elle réalisé 11 forages, mis à disposition des producteurs, dans cette même région. Un de ces forages, datant octobre 2024, n'est pas encore exploité et ne sera donc pas étudié dans ce travail.

L'ensemble des données acquises pour ce travail ont été récoltées, au cours du stage, dans les forages réalisés par *Join For Water*. Ceux-ci présentent l'avantage d'être bien décrits en termes de lithologie et d'équipements de forage, rendant l'interprétation des résultats plus fiable et cohérente. Cependant, ceux-ci sont assez récents ; très peu de données de suivi piézométrique sont donc disponibles. Pour cette raison, des données provenant de forages privés, réalisés depuis plus longtemps mais présentant le désavantage de ne pas être caractérisés, vont également être étudiés afin de pouvoir évaluer l'influence des pompages depuis le début de l'exploitation des eaux souterraines. Les localisations de ces forages sont présentées dans la Figure 12.

Les forages réalisés par *Join For Water* se situent autour de quatre zones humides différentes : Ahoyo, Kpodji, Tozévé et Agbabadamè. Celles-ci sont localisées respectivement à proximité des villages d'Abloganmè, Ahoho, Adjassi-Condji et Adjovè (Tableau 2). Ces zones humides sont formées par des bas-fonds qui se rechargent principalement durant les périodes de crue du Mono. Une partie des producteurs utilisent donc également, dans la mesure du possible, les ressources en eau provenant de ces zones humides afin de procéder à l'irrigation de leurs cultures.

Tableau 2 : Forages réalisés par *Join For Water*

Zone humide	Village à proximité	Nombre de forages de <i>JFW</i>	Nom des forages
Ahoyo	Abloganmè	4	F1, F3, F4, F5
Kpodji	Ahoho	1	F2
Tozévé	Adjassi-Condji	3	F6, F7, F10
Agbabadamè	Adjovè	2	F8, F9

Des données topographiques précises des zones d'Ahoyo et d'Agbabadamè étant disponibles, ces deux zones vont être étudiées plus en détails dans les sections 3.1.2 et 3.1.3.

Site d'étude

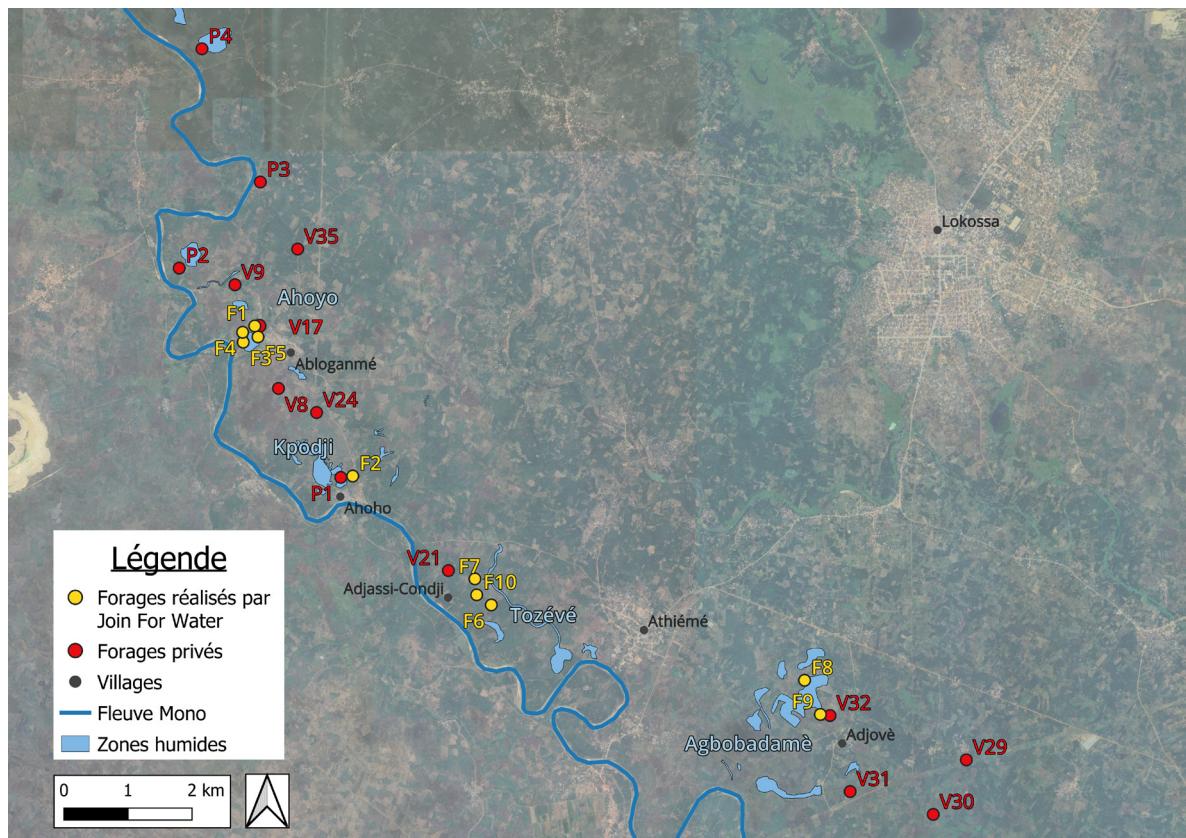


Figure 12 : Localisation des zones humides et des forages dans la zone d'étude

3.1.2. Zone humide d'Ahoyo

La zone humide d'Ahoyo, d'une superficie d'environ 40000 m^2 , est la zone la plus au nord de la zone d'étude (Figure 12). Elle se situe à proximité du village d'Abloganmè. Autour de celle-ci se trouvent 4 forages réalisés par *Join For Water* (F1, F3, F4 et F5) et un forage privé (V17) (Figure 13).

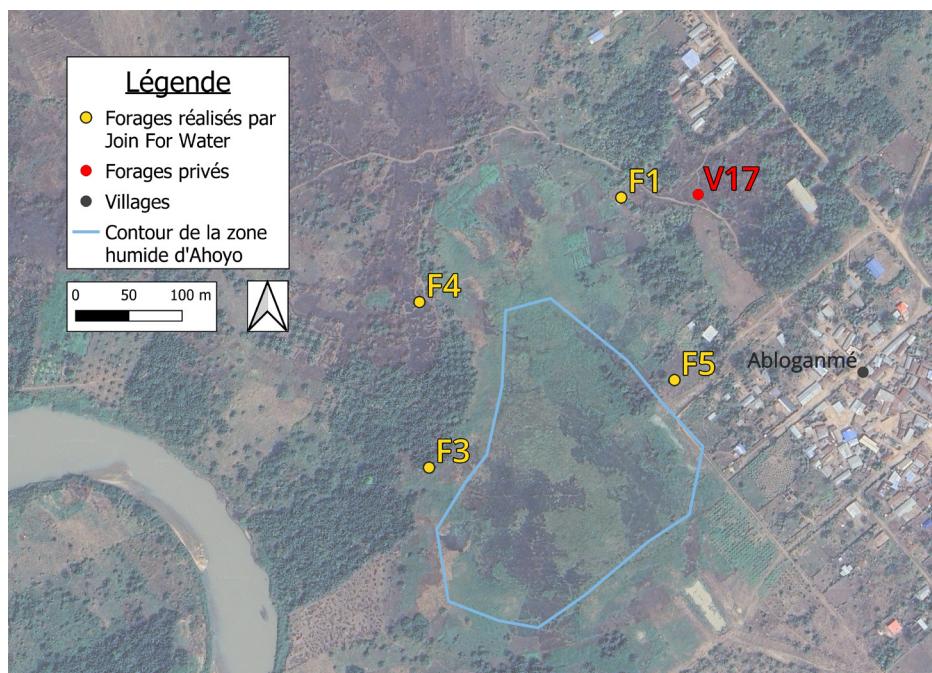


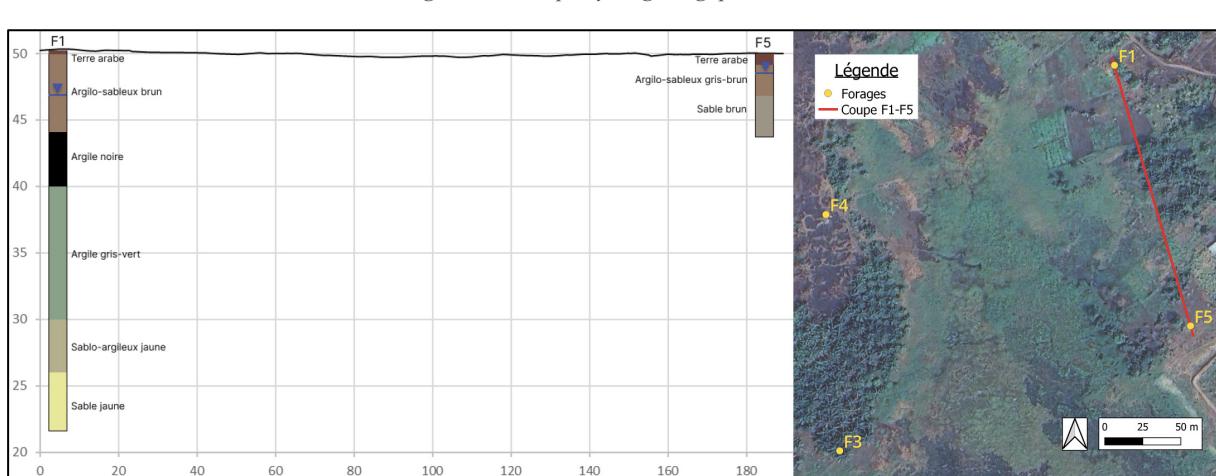
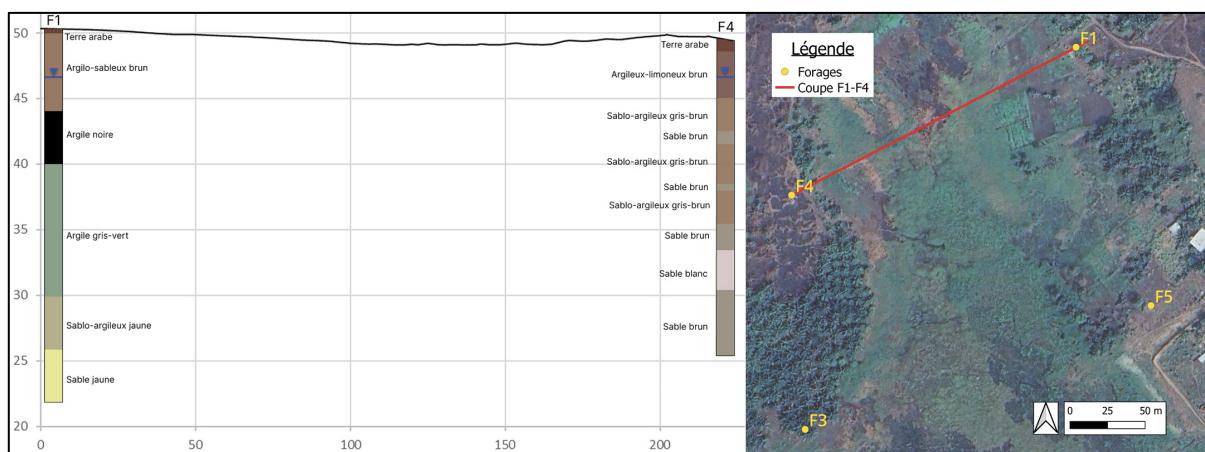
Figure 13 : Localisation des forages autour de la zone humide d'Ahoyo

Site d'étude

Afin de décrire cette zone, des coupes hydrogéologiques simplifiées ont été réalisées, basées sur les données des log lithologiques des forages, les niveaux d'eau mesurés durant le stage et les données topographiques récoltées par *Join For Water*. Ces coupes sont présentées dans les Figure 14, Figure 15 et en Annexe 9.2.

Ces coupes révèlent une forte hétérogénéité des lithologies. Les successions de couches ainsi que leurs épaisseurs varient considérablement d'un forage à l'autre, malgré leur proximité. De plus, l'entièreté des forages a été arrêté au niveau de la couche sableuse productive. La profondeur à laquelle celle-ci a été atteinte diffère également au sein de la zone.

Cette variabilité s'explique par le contexte géologique des plaines alluviales, marqué par une sédimentation discontinue et contrôlée par les anciens tracés du fleuve Mono et ses paléochénaux. Ces dynamiques fluviales entraînent donc une répartition spatiale des sédiments très variable localement.



Les niveaux piézométriques mesurés en octobre 2024 et en mars 2025 dans les forages de la zone, ainsi que les altitudes des crépines, sont présentés dans le Tableau 3. La comparaison entre les mesures d'octobre 2024 et mars 2025 permet d'évaluer la différence entre les niveaux piézométriques à la fin de la saison des pluies et durant la période d'exploitation des eaux souterraines pendant la sèche saison.

Site d'étude

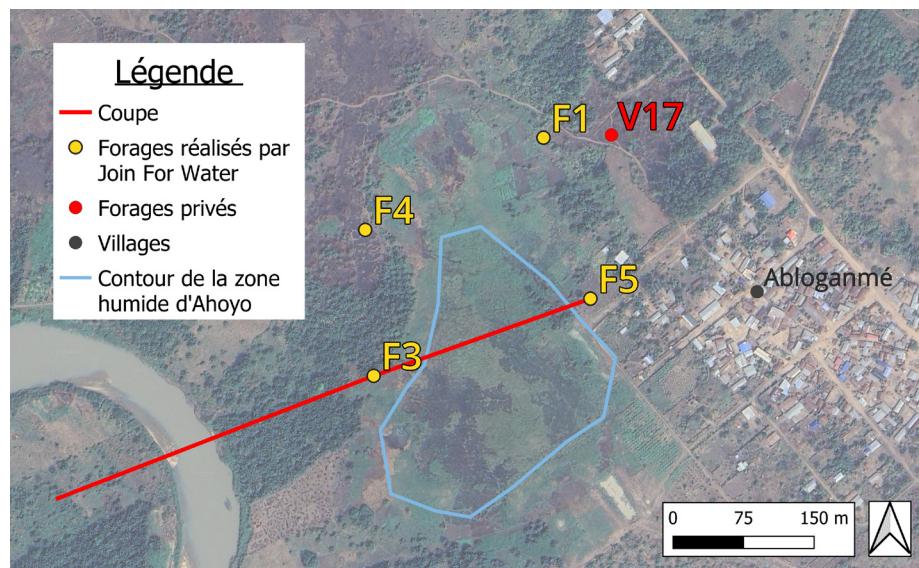
Tableau 3 : Niveaux piézométriques en octobre 2024 et mars 2025 et altitudes des crêpines dans les forages de la zone humide d'Ahoyo

Forage	Niveau piézométrique en octobre 2024 [m]	Niveau piézométrique en mars 2025 [m]	Altitude des crêpines [m]
F1	47.86	46.85	23.3 – 26.3
F3	47.83	46.85	26.9 – 32.9
F4	47.31	46.30	26.4 – 35.4
F5	49.43	48.23	44.5 – 45.5

Les forages 3 et 4 présentent des altitudes de crêpines semblables, suggérant qu'ils exploitent probablement la même couche sableuse. La crêpine du forage 1 se situe à une altitude légèrement plus élevée. En revanche, la crêpine du forage 5 est beaucoup plus élevée en altitude, ce qui signifie qu'elle exploite vraisemblablement une couche sableuse plus superficielle. Ces conclusions pourront être confirmées à l'aide de la réalisation d'essais de pompage de longue durée (section 4.1.2).

Concernant les niveaux piézométriques, les niveaux des forages 1 et 3 sont très proches. Le forage 5, plus superficiel, présente le niveau piézométrique le plus élevé de la zone. Un niveau piézométrique plus élevé d'environ un mètre est observé en octobre 2024, par rapport au mois de mars 2025.

Deux coupes, allant jusqu'au le fleuve, ont été réalisées afin de comparer les niveaux piézométriques des eaux souterraines et les niveaux d'eau dans la zone humide et le fleuve (Figure 16). La première coupe correspond à la situation en octobre 2024, après la saison des pluies (Figure 17). La seconde coupe illustre la situation en mars 2025, période d'exploitation des eaux souterraines, entraînant une baisse des niveaux piézométriques (Figure 18).



La réalisation de ces coupes comporte cependant certaines limites. Des données topographiques précises ont été relevées au sein de la zone humide mais elles ne s'étendent pas au-delà du forage 3.

Pour compléter le profil topographique, le modèle numérique de terrain (DEM), issu des données Copernicus, a été utilisé. Avec une résolution de 30 mètres, ces données ne garantissent toutefois pas une représentation précise du relief. Par ailleurs, les niveaux d'eau du fleuve Mono proviennent d'une station hydrométrique située à environ 10 kilomètres en aval.

Site d'étude

Les derniers enregistrements disponibles datent de novembre 2023. Les niveaux d'eau représentés correspondent donc à la moyenne de ceux-ci durant le mois correspondant sur les 15 dernières années d'enregistrement.

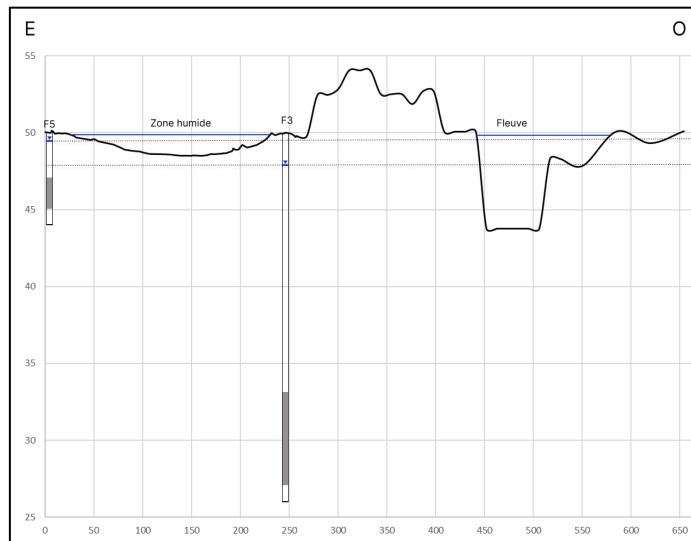


Figure 17 : Coupe traversant la zone humide d'Ahoyo et le fleuve Mono en octobre 2024

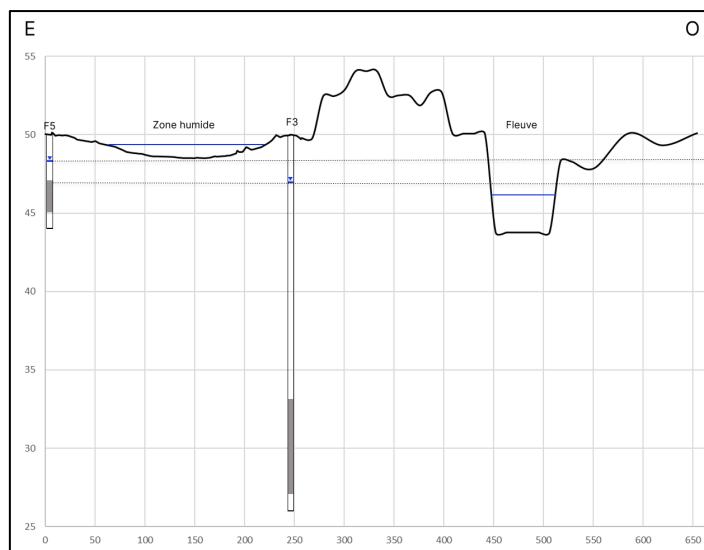


Figure 18 : Coupe traversant la zone humide d'Ahoyo et le fleuve Mono en mars 2025

Les interactions entre les niveaux d'eau de la zone humide, du fleuve et des eaux souterraines sont difficiles à caractériser en raison de la précision limitée de certaines mesures et d'un manque de données.

Les niveaux d'eau de la zone humide semblent déconnectés de ceux de la nappe souterraine. La zone humide apparaît comme perchée, son niveau n'étant pas gouverné par celui de la nappe. Une exploitation des eaux souterraines ne constituerait donc, à priori, pas une menace directe pour cette zone humide.

Les données disponibles ne permettent pas d'évaluer une éventuelle interaction avec le fleuve de manière fiable. Compte tenu de l'altitude des crépines du forage 5 par rapport à celle du fleuve, ainsi que de leur éloignement, une connexion hydraulique semble peu probable.

Pour affiner ces observations, un niveling plus précis ainsi qu'une meilleure connaissance des lithologies dans la zone seraient nécessaires. En l'absence de telles données, il demeure difficile de tirer des conclusions définitives.

Site d'étude

3.1.3. Zone humide d'Agbabadamè

La zone humide d'Agbabadamè est située au sud de la zone d'étude (Figure 12). Autour de celle-ci, se trouvent deux forages réalisés par *Join For Water*, distants de 585 mètres, et un forage privé (Figure 20).

La Figure 19 représente la coupe hydrogéologique reliant ces deux forages. On y retrouve également une hétérogénéité des lithologies rencontrées et une profondeur de la couche de sable productive différente.

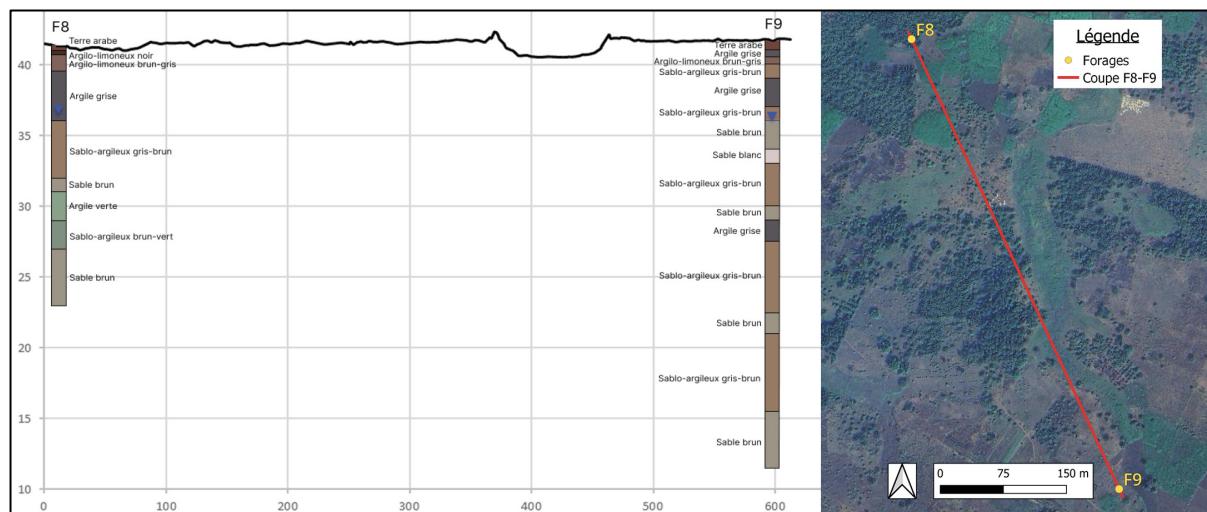


Figure 19 : Coupe hydrogéologique F8-F9

Le Tableau 4 présente des altitudes de crépines très différentes entre les deux forages. Le niveau piézométrique du forage 9, plus profond, est légèrement inférieur à celui du forage 8. De plus, on retrouve une différence de niveau d'environ 1,5 mètre entre le mois d'octobre 2024 et celui de mars 2025 dans les deux forages.

Tableau 4 : Niveaux piézométriques en octobre 2024 et mars 2025 et altitudes des crépines dans les forages de la zone humide d'Agbabadamè

Forage	Niveau piézométrique en octobre 2024 [m]	Niveau piézométrique en mars 2025 [m]	Altitude des crépines [m]
F8	37.68	36.27	24.8 – 27.8
F9	37.52	36.04	12.2 – 15.2

Deux coupes entre la zone humide d'Agbabadamè et le fleuve, localisées sur la Figure 20, ont également été réalisées (Figure 21 et Figure 22). Les incertitudes liées à la précision du DEM utilisé sont similaires à celles présentées pour la réalisation des coupes à Ahoyo. Cependant, dans ce cas, la station hydrométrique est située à seulement un kilomètre en amont.

Site d'étude

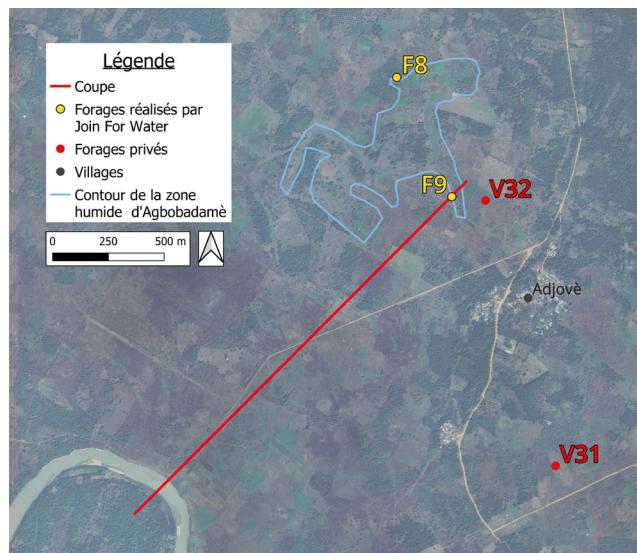


Figure 20 : Localisation de la coupe traversant la zone humide d'Agbabadamè jusqu'au fleuve



Figure 21 : Coupe traversant la zone humide d'Agbabadamè et le fleuve Mono en octobre 2024

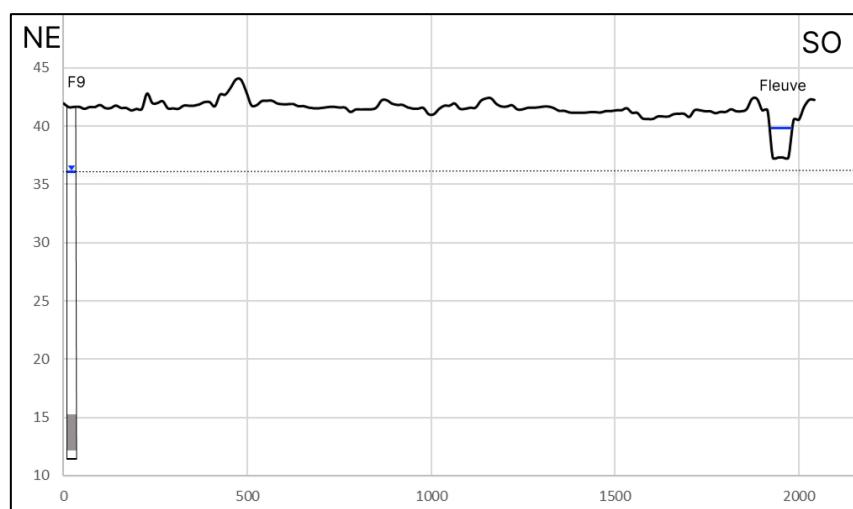


Figure 22 : Coupe traversant la zone humide d'Agbabadamè et le fleuve Mono en mars 2025

Aucune connexion claire entre le fleuve et la couche sableuse exploitée par le forage 9 ne peut être mise en évidence. Il est donc impossible de formuler une conclusion définitive concernant les interactions eaux souterraines – rivière dans cette zone.

3.2. Monitoring des niveaux piézométriques

3.2.1. Evolution des niveaux piézométriques

Un monitoring des niveaux piézométriques a été mis en place depuis novembre 2021 sur 16 forages privés.

Les Figure 23 et Figure 24 présentent une partie des résultats, le complément étant disponible en Annexe 9.3.

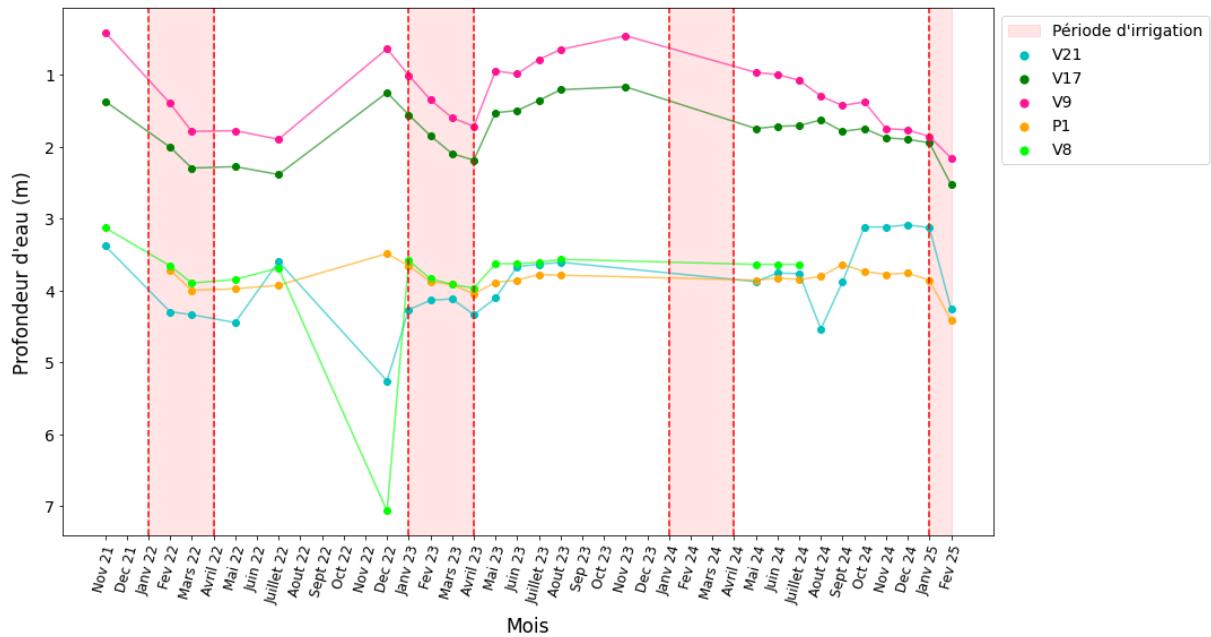


Figure 23 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis novembre 2021 dans les forages privés (1)

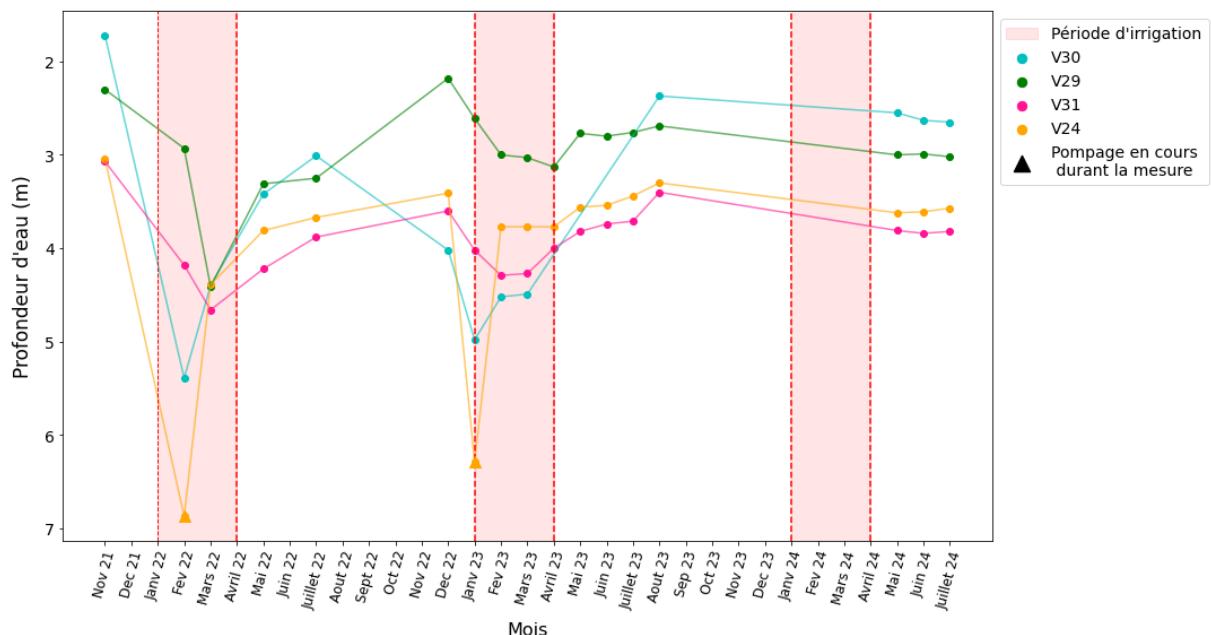


Figure 24 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis novembre 2021 dans les forages privés (2)

L'analyse des variations des profondeurs d'eau au cours des trois dernières années met en évidence une tendance générale similaire entre les forages.

Site d'étude

Durant les périodes d'irrigation, généralement de janvier à avril, une augmentation des profondeurs d'eau est observée en raison des pompages effectués ou l'absence d'une recharge durant cette saison sèche. Certaines mesures, marquées par un signe triangulaire, ont été prises durant un pompage. Elles présentent des profondeurs plus importantes en raison du rabattement temporaire induit par ce dernier et doivent ainsi être interprétées avec précaution car elles ne reflètent pas le niveau naturel de la nappe.

À la suite de chaque saison des pluies, les niveaux piézométriques tendent à revenir à leurs valeurs initiales observées hors période d'irrigation, ce qui témoigne d'une recharge effective de la nappe. Il convient également de noter que, dans de nombreux forages, aucune donnée n'est disponible pour les mois d'octobre et de novembre, en raison des crues du fleuve Mono qui inondent la plaine alluviale et rendent l'accès aux forages impossible.

Il peut donc être conclu que, durant les trois dernières années, les pompages n'ont pas entraîné de rabattement excessif et qu'une tendance à la baisse du niveau de la nappe n'est pas observée.

3.2.2. Lien avec les niveaux d'eau dans le Mono

Les niveaux d'eau dans le fleuve Mono ont été enregistrés dans une station hydrométrique située à Athiémé.

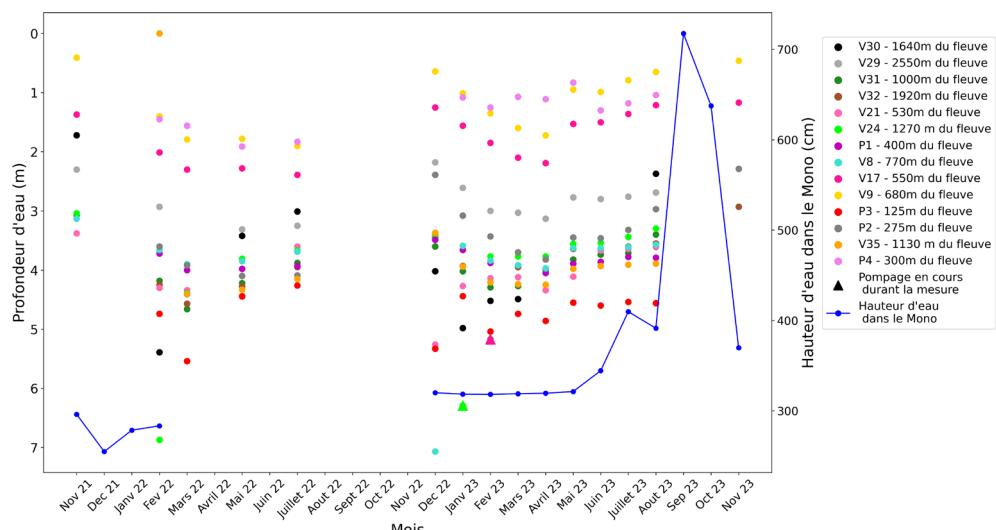


Figure 25 : Lien niveau d'eau dans le fleuve – profondeur d'eau dans les forages durant toute la période étudiée

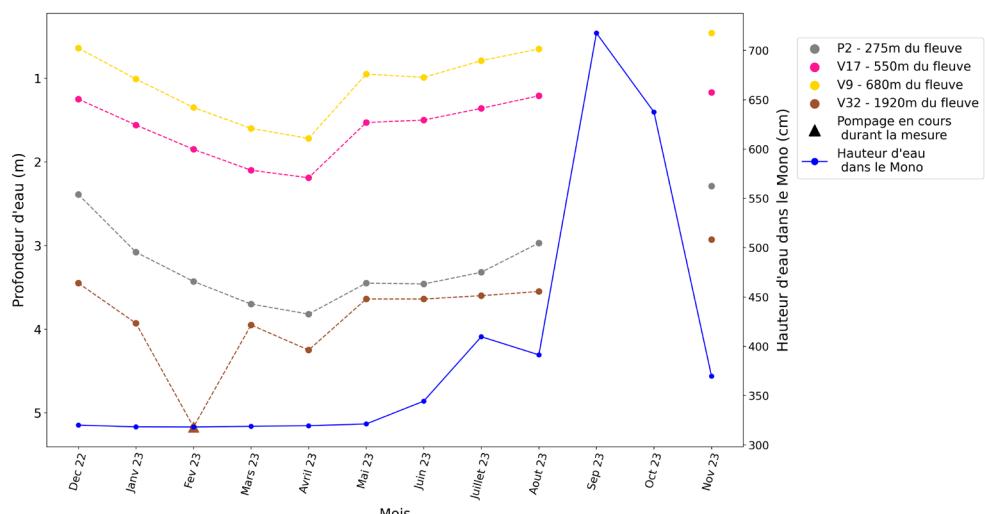


Figure 26 : Lien niveau d'eau dans le fleuve – profondeur d'eau dans les forages (1)

Site d'étude

Le lien entre les niveaux d'eau du fleuve Mono et ceux observés dans les forages est difficile à établir, principalement en raison de la disponibilité limitée des données. Des mesures simultanées ne sont disponibles que sur une période d'environ un an (Figure 26) ou moins (voir Annexe 9.4). De plus, les données relatives aux forages sont absentes pendant les périodes où les hauteurs d'eau du fleuve augmentent. Ce manque d'informations rend toute conclusion définitive prématuée.

3.2.3. Lien avec les niveaux d'eau dans la zone humide

Le lien entre le niveau d'eau enregistré dans la zone humide d'Ahoyo et le forage privé superficiel V17, situé à 150 mètres de celle-ci (Figure 13), peut également être examiné à l'aide de la Figure 27.

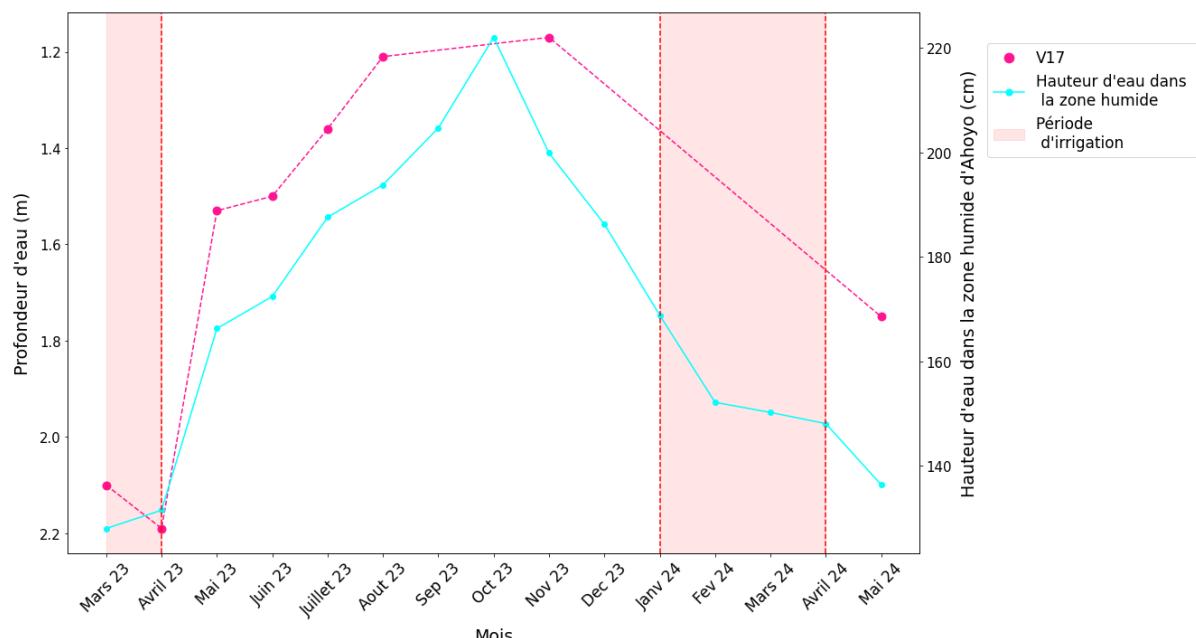


Figure 27 : Lien hauteur d'eau dans la zone humide - profondeur d'eau dans les forages

Cette analyse est également limitée par la disponibilité incomplète des données. Les niveaux d'eau dans la zone humide et dans le forage ne peuvent être comparés que sur une seule année, laquelle présente néanmoins de nombreux mois sans mesure de niveaux d'eau.

Malgré ces lacunes, une tendance générale similaire peut être observée : les variations des niveaux d'eau dans les deux milieux se produisent de manière synchrone, avec des phases de hausse et de baisse coïncidant dans le temps.

Une remontée des niveaux d'eau dans les forages et la zone humide est observée entre avril et octobre. Cela correspond à l'influence combinée de la première saison des pluies et de la seconde, ainsi qu'à la crue du fleuve Mono, qui intervient généralement en septembre et octobre. Ces éléments contribuent à une recharge importante des zones humides et de la nappe phréatique.

À partir d'octobre, les niveaux d'eau dans la zone humide diminuent progressivement. Dans le forage, les mesures disponibles en novembre et en mai montrent une diminution du niveau d'eau entre ces deux dates. La mesure de mai, qui suit la période d'irrigation, reflète encore l'effet du rabattement induit par les pompages et la saison sèche.

3.3. Bilan hydrique

Un bilan hydrique simplifié a été réalisé à l'aide du modèle de Thornthwaite-Mather (1955). Celui-ci permet, sur base des données d'évapotranspiration potentielle (ETP) et des précipitations, une estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) ainsi que des eaux utiles, disponibles pour la recharge des nappes et le ruissellement. Dans ce travail, l'algorithme a été appliqué à un pas de temps journalier.

Ce modèle conceptuel repose sur l'hypothèse d'un réservoir unique représentant l'humidité du sol, de capacité maximale S_{\max} exprimée en mm. Lorsque les précipitations dépassent l'ETP et que le stock du sol atteint sa capacité maximale, l'excédent est considéré comme un surplus, pouvant alimenter la recharge ou le ruissellement. À l'inverse, en période de déficit, une partie du stock est mobilisée pour compenser l'ETP, jusqu'à épuisement du réservoir (Dassargues, 2018).

Afin d'estimer l'évapotranspiration de référence (ET_0), la formulation de la FAO de l'équation de Penman-Monteith telle que décrite dans les directives FAO-56 (Allen *et al.*, 1998), a été utilisée :

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

où : ET_0 est l'évapotranspiration de référence (mm/jour), Δ le taux de variation de la pression de vapeur saturante en fonction de la température de l'air (kPa/°C), R_n le rayonnement net à la surface du sol (MJ/m²/jour), G le flux de chaleur dans le sol (MJ/m²/jour), γ la constante psychrométrique (kPa/°C), T la température moyenne journalière de l'air à 2 mètres de hauteur (°C), u_2 la vitesse du vent à 2 mètres de hauteur (m/s), e_s la pression de vapeur saturante (kPa), e_a la pression de vapeur réelle (kPa) et $(e_s - e_a)$ le déficit de pression de vapeur (kPa).

Les données nécessaires pour l'estimation de l' ET_0 et l'élaboration du bilan ont été téléchargées sur le site du *NASA POWER Project's Data Access Viewer (DAV)*, qui fournit les données météorologiques et solaires du programme *POWER* (Prediction of Worldwide Energy Resources) de la NASA. Les données ont été extraites pour la période du 01/10/2014 au 31/09/2024 afin de couvrir une période de 10 années, avec l'hypothèse d'un stock initial maximal dans le réservoir.

Cette méthode est très sensible à la valeur de stock maximale imposée. La Figure 28 présente les sommes mensuelles des précipitations, ETP, ETR et des eaux utiles en considérant un stock initial de 50 mm. La Figure 29 illustre, quant à elle, la situation avec stock initial de 125 mm. La présence d'eau utile est donc plus fréquente dans le cas d'un stock limité à 50 mm, celui-ci étant plus rapidement saturé.

Site d'étude

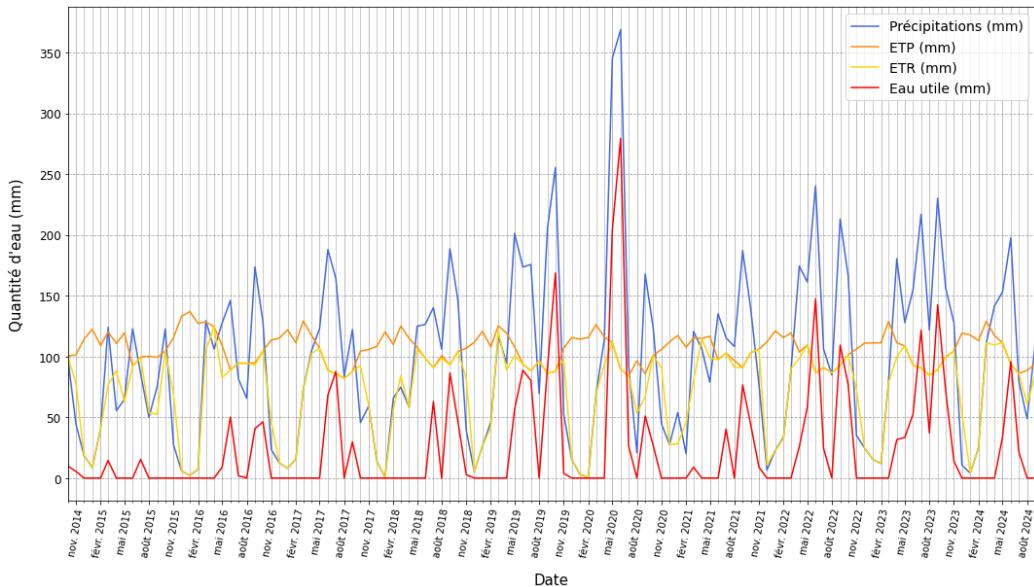


Figure 28 : Sommes mensuelles des précipitations, ETP, ETR et des eaux utiles en considérant un stock initial de 50 mm

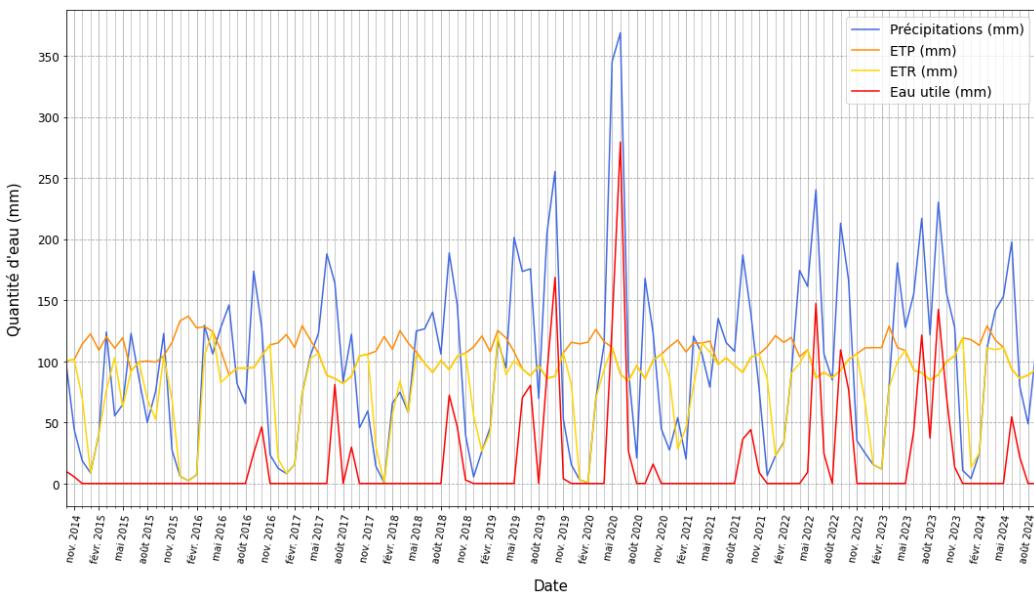


Figure 29 : Sommes mensuelles des précipitations, ETP, ETR et des eaux utiles en considérant un stock initial de 125 mm

Une estimation du stock maximal peut être réalisée à l'aide du concept de *Total Available Water* (TAW), défini dans les directives FAO-56 (Allen *et al.*, 1998). La TAW représente la réserve maximale d'eau mobilisable par les plantes et l'évapotranspiration. Elle se calcule selon la formule suivante :

$$TAW = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r$$

Où : TAW est la quantité d'eau totale disponible dans la zone racinaire (mm), θ_{FC} la teneur en eau à la capacité au champ (m^3/m^3), θ_{WP} la teneur en eau au point de flétrissement permanent (m^3/m^3) et Z_r la profondeur d'enracinement (m).

Cette valeur dépend donc du type de sol (via θ_{FC} et θ_{WP}) et de culture (via Z_r). Dans la région étudiée, les coupes lithologiques indiquent des sols à dominante argilo-limoneuse. Pour ce type de sol, la différence ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$) est généralement comprise entre 0.13 et 0.19. Les cultures sont variées (maïs, palmier à huile, haricot, corète potagère), mais la profondeur racinaire est généralement comprise entre 0.6 et 1.2 m (Allen *et al.*, 1998).

Site d'étude

Au vu de ces estimations, une valeur de stock maximale proche de 125 mm semble plus représentative que 50 mm.

Pour la période 2014 – 2024, les précipitations marquent les deux saisons des pluies dans cette région : un premier pic, généralement observé de mars à juin-juillet, et un second en septembre-octobre (Figure 29).

On remarque que l'ETR correspond à l'ETP durant les saisons des pluies, en raison du stock d'eau disponible pour être évaporé à cette période dans le sol. Cependant, pendant les saisons sèches, l'ETR est largement inférieur à l'ETP, marquant une indisponibilité d'eau dans le sol et ne permettant donc pas d'évapotranspiration.

Enfin, les pics d'eau utile sont principalement observés aux mois de juin, septembre et octobre, permettant ainsi une recharge de l'aquifère. Notons que cette quantité est assez variable d'une année à l'autre, selon les conditions météorologiques.

3.4. Lien entre les paramètres météorologiques et les niveaux d'eau

La relation entre les eaux utiles, calculées à l'aide du bilan hydrique (section 3.3), et les niveaux piézométriques peut désormais être entreprise. Cette analyse permettra ainsi de comprendre la dynamique de recharge de l'aquifère et le lien de cette dernière avec la présence d'eau utile durant les saisons des pluies.

Le lien entre les eaux utiles et les niveaux d'eau a été analysé en distinguant trois types de forages : les forages peu profonds (moins de 10 mètres, Figure 30), ceux de profondeur intermédiaire (entre 16 et 22 mètres, Figure 31 et Annexe 9.5) et les forages profonds (entre 28 et 36 mètres, Figure 32).

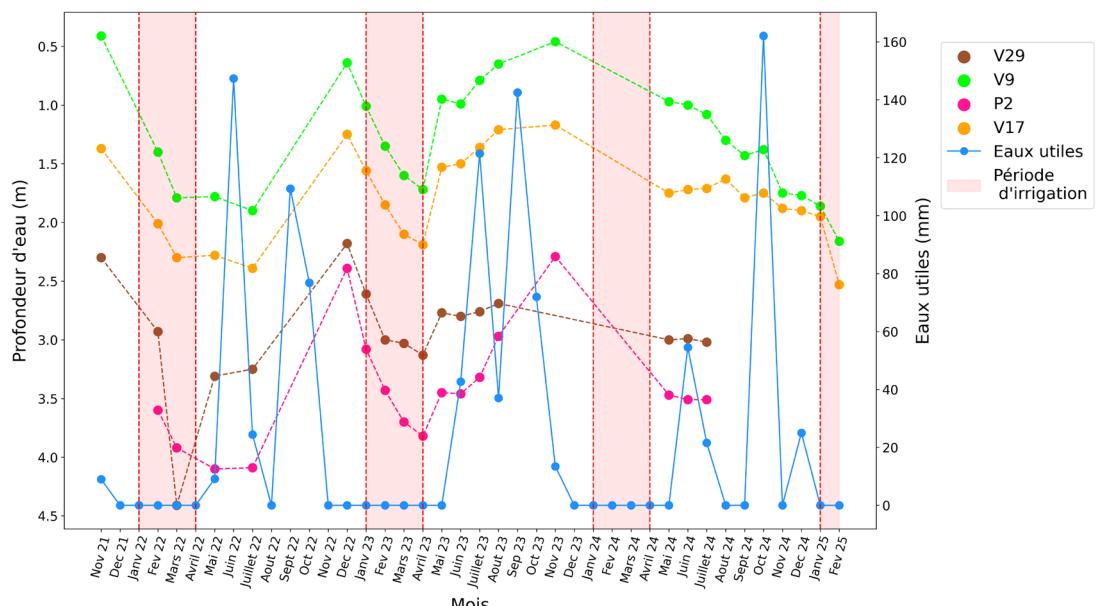


Figure 30 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages peu profonds

Site d'étude

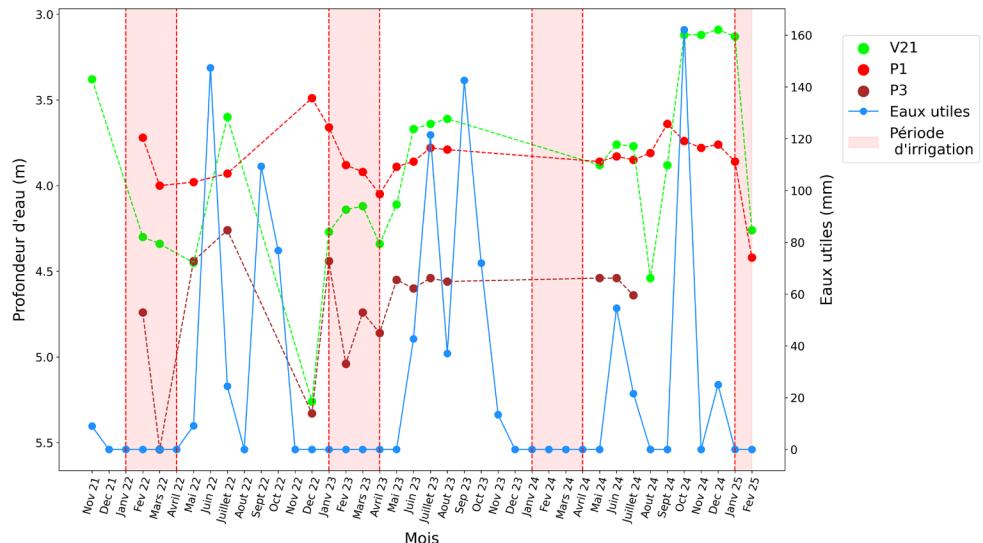


Figure 31 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages de profondeur intermédiaire (1)

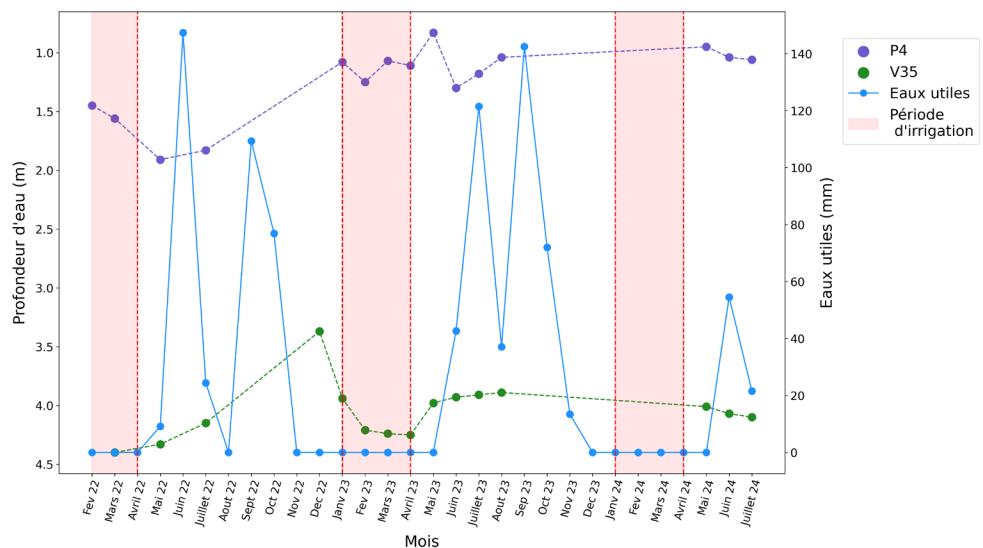


Figure 32 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages profonds

L'analyse des graphiques représentant l'évolution conjointe des niveaux d'eau et de la quantité d'eau utile met en évidence une tendance similaire pour l'ensemble des forages, quelle que soit leur profondeur.

Une baisse des niveaux d'eau est observée durant les périodes d'irrigation des cultures, se produisant pendant la saison sèche. Cette diminution s'explique à la fois par les pompages effectués, provoquant un rabattement de la nappe, et par l'absence d'eau utile liée au déficit pluviométrique, ne permettant pas la recharge de cette dernière.

A partir des mois d'avril et jusqu'en décembre, une remontée progressive des niveaux d'eau est constatée, en raison des deux saisons de pluie, induisant des eaux utiles et permettant ainsi la recharge de la nappe. Toutefois, cette recharge n'est généralement pas immédiate. Une quantité importante d'eau utile, un mois donné, n'entraîne pas une forte hausse des niveaux d'eau ce même mois, quelle que soit la profondeur du forage considéré. À l'inverse, certaines hausses piézométriques surviennent en l'absence d'eau utile, suggérant un effet différé de la recharge.

Ce comportement s'explique vraisemblablement par les caractéristiques lithologiques de la région, dominées par des formations argileuses peu perméables, qui ralentissent l'infiltration et induisent une recharge différée dans le temps.

4. Essais de pompage

Les données provenant des essais de pompage ont été récoltés durant le stage au sein de l'ONG *Join For Water*.

Deux types d'essais ont été réalisés :

- Des essais de courte durée : 30 minutes de pompage.
- Des essais de longue durée : 6 heures de pompage.

De manière générale, ces essais ont pour objectif de déterminer les paramètres hydrauliques de la nappe et d'identifier d'éventuelles hétérogénéités au sein de celle-ci. Les essais de courte durée visent à reproduire des phases d'irrigation, généralement d'une durée moyenne de trente minutes. Les essais de longue durée permettent d'étudier le comportement de la nappe sous l'effet d'une sollicitation plus continue et d'identifier les interactions entre les puits.

4.1. Méthodologie d'acquisition des données

4.1.1. Essais de pompage de courte durée

Les essais de pompage de courte durée (ECD) ont été effectués dans sept forages appartenant à *Join For Water*, présentés dans le Tableau 5 et localisés dans la Figure 33. Chaque essai a été mené à débit constant, avec une durée de pompage de trente minutes.

Tableau 5 : Résumé des essais de courte durée

Nom zone humide	Nombre d'essais réalisés	Numéro d'identification du/des forage(s)
Ahoyo	2	F4, F5
Agbabadamé	2	F8, F9
Kpodji	1	F2
Tozévé	2	F6, F7

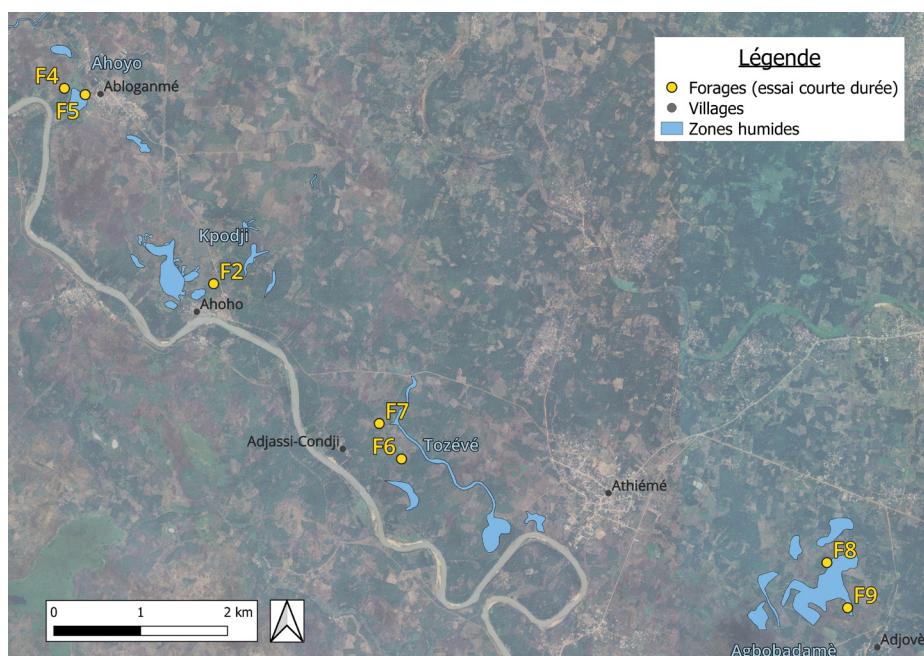


Figure 33 : Localisation des forages dans lesquels les essais de courte durée ont été réalisés

Essais de pompage

Durant ces essais, la profondeur de l'eau a été mesurée toutes les 30 secondes à l'aide d'une sonde piézométrique manuelle. Après l'arrêt du pompage, les mesures ont été poursuivies toutes les minutes, pendant une heure, afin de caractériser la remontée du niveau piézométrique. L'évolution des paramètres physico-chimiques de l'eau a également été suivie (section 5.1). Les débits de pompage ont, quant à eux, été déterminés par la méthode d'empotement.

4.1.2. Essais de pompage de longue durée

Deux essais de longue durée (ELD) ont été menés dans la zone humide d'Ahoyo afin de caractériser les paramètres hydrauliques de l'aquifère. Ceux-ci sont repris dans le Tableau 6 et localisés dans la Figure 34.

Durant ces essais, les hauteurs piézométriques ont été enregistrées toutes les minutes à l'aide d'un capteur de type *Diver*. Les mesures ont été poursuivies pendant les 36 heures suivant l'arrêt du pompage, afin de suivre la phase de remontée de la nappe.

Tableau 6 : Résumé des essais longue durée

Puits de pompage	Puits d'observation	Distance entre les puits (m)
F3	F4	154
F1	F5	177
	Un forage privé	72

Durant le premier essai, le forage 3 a été utilisé comme puits de pompage et le forage 4 comme piézomètre d'observation, ceux-ci étant distants de 154 mètres. Leurs crépines, installées à des profondeurs similaires, suggèrent que la couche de sable productive a été atteinte à la même profondeur (section 3.1.2).

Un second essai a également été réalisé en raison de la présence, sur le site de la zone humide d'Ahoyo, de deux forages superficiels. Ces forages, d'une profondeur d'environ 6 mètres, présentent des débits d'exploitation plus élevés (environ $20\text{m}^3/\text{h}$) que ceux observés dans les autres forages plus profonds dans la zone. Ces différences suggèrent l'existence possible d'une nappe perchée. L'objectif de cet essai est de vérifier si un pompage longue durée dans un forage profond (forage F1) influence ou non les niveaux d'eau des forages peu profonds à proximité (forage F5 et un forage privé V17).

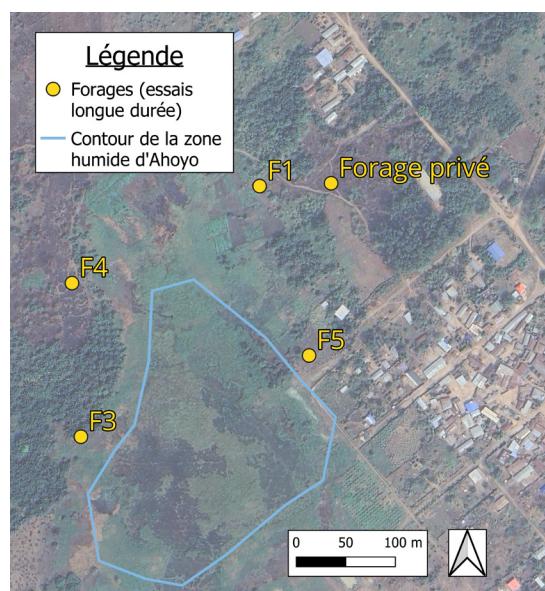


Figure 34 : Localisation des forages dans lesquels les essais de longue durée ont été réalisés

4.2. Méthodes d'interprétation

Lors d'un essai de pompage à débit constant, trois phases peuvent être distinguées. La première correspond au régime transitoire, durant lequel le niveau d'eau baisse progressivement. Ensuite, le rabattement se stabilise et le régime permanent est atteint (Figure 35). Après l'arrêt du pompage, une remontée transitoire est observée, correspondant au retour progressif du niveau d'eau vers sa valeur initiale.

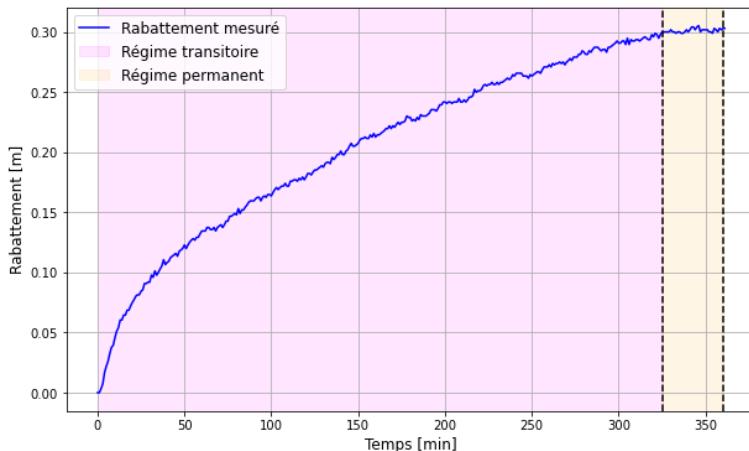


Figure 35 : Evolution du rabattement dans le puits d'observation du premier ELD durant le pompage

Afin d'interpréter les résultats, l'aquifère exploité est supposé captif, en raison de la présence d'une épaisse couche d'argile recouvrant la couche sableuse productive et d'un niveau d'eau supérieur au toit de la couche sableuse aquifère. Ainsi, la transmissivité (T) et la conductivité hydraulique (K) sont liées par la relation suivante, où e représente l'épaisseur crépinée :

$$T = K \times e$$

L'analyse du **régime permanent** repose sur la méthode de Dupuit pour les nappes captives. Cette méthode repose sur les hypothèses suivantes : régime permanent, eau et roche incompressibles, vitesse horizontale de l'eau constante, loi de Darcy applicable, composante verticale négligeable, milieu homogène et isotrope, régime d'influence constant dans le temps et ouvrage complet. Dans le contexte de cette étude, ces hypothèses peuvent être considérées comme satisfaites. L'équation de Dupuit s'écrit :

$$Q = 2.73 \cdot T \cdot \frac{\Delta}{\log\left(\frac{R}{x}\right)}$$

où Q est le débit d'exploitation, T la transmissivité, Δ le rabattement stabilisé, R le rayon d'influence et x la distance entre le forage de pompage et le point d'observation (égale au rayon du puits dans le cas du puits de pompage).

Pour appliquer cette méthode, la courbe d'évolution du rabattement en fonction du temps est analysée afin d'identifier la phase stable. Le rabattement stabilisé obtenu permet ainsi d'estimer la transmissivité.

De plus, l'analyse du cône de dépression, représenté dans la Figure 36, permet d'obtenir une estimation du rayon d'influence et de la transmissivité. En représentant le rabattement stabilisé en fonction du logarithme de la distance au puits de pompage, une droite caractéristique du cône de dépression est obtenue. L'intersection avec l'axe des abscisses offre une estimation du rayon d'influence et la pente de cette droite permet de calculer la transmissivité.

$$Pente = - \frac{0.366 Q}{T}$$

Essais de pompage

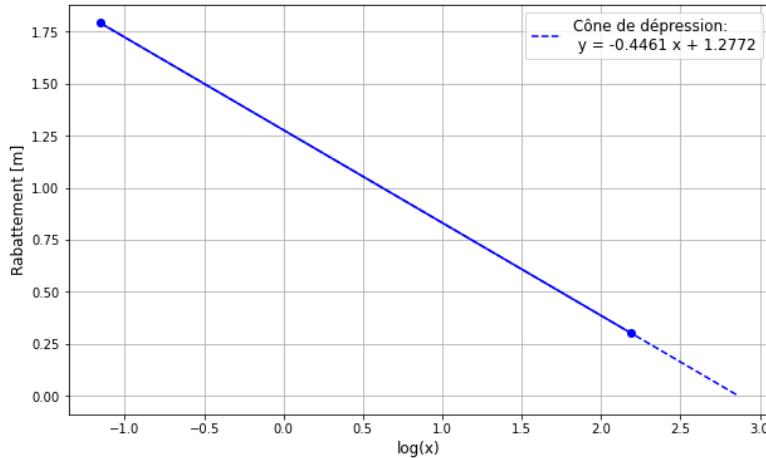


Figure 36 : Cône de dépression du premier ELD

Afin d'interpréter le **régime transitoire**, la méthode de Jacob est utilisée. Il s'agit d'une approximation de la méthode de Theis, dont les hypothèses sont : milieu homogène et isotrope, nappe captive infinie et d'épaisseur constante, absence de gradient piézométrique initial et faible rabattement par rapport à l'épaisseur de l'aquifère.

La formule d'approximation logarithmique de Jacob est la suivante :

$$\Delta(r, t) = \frac{0.183 Q}{T} \log \left(\frac{2.25 T t}{x^2 S} \right)$$

Cette relation est d'autant plus valide que le temps t est grand et r petit.

Ainsi, le rabattement est proportionnel au logarithme du temps. Il est donc possible de tracer son évolution en fonction de $\log(t)$, comme illustré dans la Figure 37. La pente de la droite de régression permet de déterminer la transmissivité et son intersection avec l'axe des abscisses (t_0) donne une estimation le coefficient d'emmagasinement (S).

$$Pente = \frac{0.183 Q}{T}$$

$$\frac{1}{t_0} = - \frac{2.25 T}{x^2 S}$$

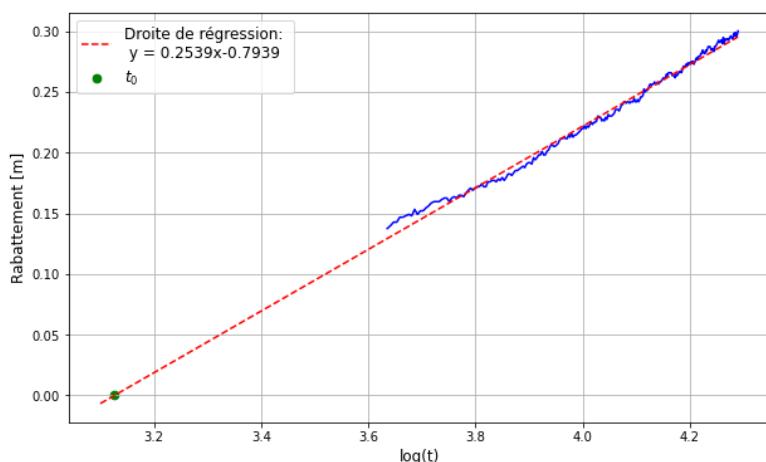


Figure 37 : Evolution du rabattement en fonction du $\log(t)$ dans le puits d'observation du premier ELD durant le régime transitoire

Essais de pompage

Finalement, la **remontée transitoire** est interprétée à l'aide du principe de superposition. Théoriquement, cela revient à considérer qu'un débit $-Q$ est injecté à partir de l'arrêt du pompage, tout en continuant à pomper un débit Q .

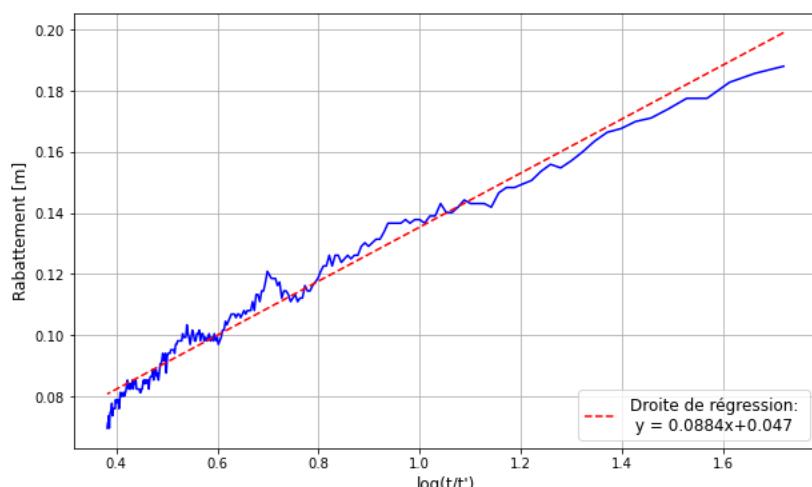
L'équation du régime transitoire se modifie alors de la manière suivante :

$$\Delta(t, t') = \frac{0.183 Q}{T} \log\left(\frac{t}{t'}\right)$$

Où t représente le temps écoulé depuis le début du pompage et t' le temps écoulé depuis la fin du pompage (début de la remontée)

En traçant l'évolution du rabattement en fonction du $\log(t/t')$, comme représenté dans la Figure 38, la pente de la droite de régression permet d'estimer la transmissivité selon la relation :

$$Pente = \frac{0.183 Q}{T}$$



4.3. Résultats obtenus

4.3.1. Essais de courte durée

L'analyse de l'évolution des profondeurs d'eau, disponible en Annexe 9.6, et des rabattements (Figure 39) durant les pompages met en évidence une stabilisation relativement rapide du niveau d'eau dans les forages après le démarrage du pompage. Toutefois, l'ampleur du rabattement observé varie fortement d'un forage à l'autre, allant d'environ 50 cm à plus de 5 mètres. Cette variabilité est également marquée au sein même des zones humides entre les différents forages.

Essais de pompage

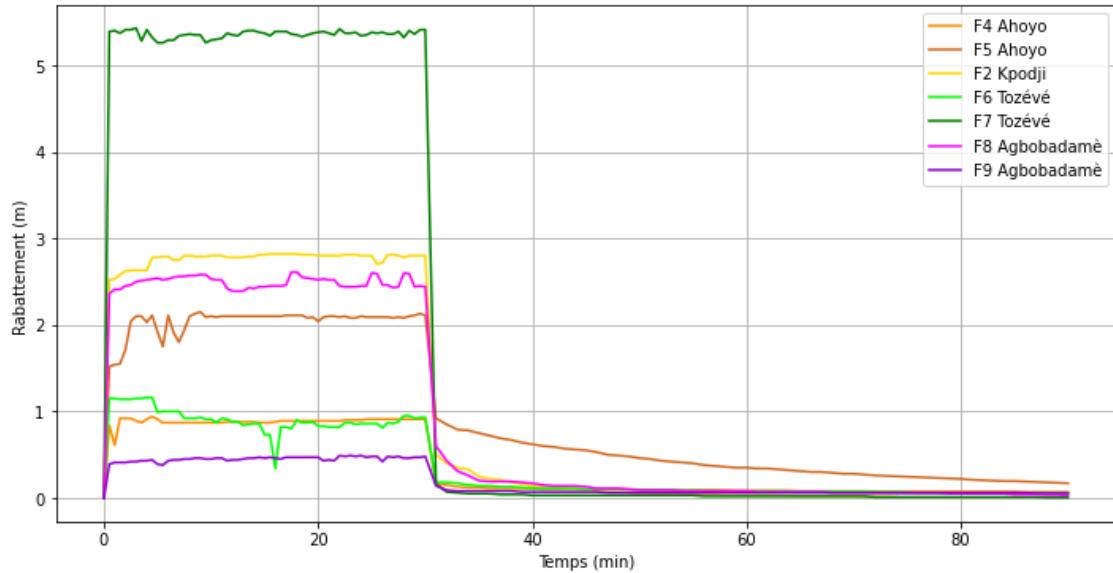


Figure 39 : Evolution du rabattement dans les forages durant le pompage et la remontée

Le rabattement mesuré étant stabilisé rapidement après le début du pompage, aucune phase transitoire significative n'est observée. Il est ainsi possible d'appliquer directement la méthode de Dupuit afin de déterminer les conductivités hydrauliques de l'aquifère et la transmissivité sur base de l'épaisseur des crépines. Les résultats se trouvent dans le Tableau 7.

Ensuite, l'évolution du rabattement peut être étudiée uniquement durant la remontée (Figure 40).

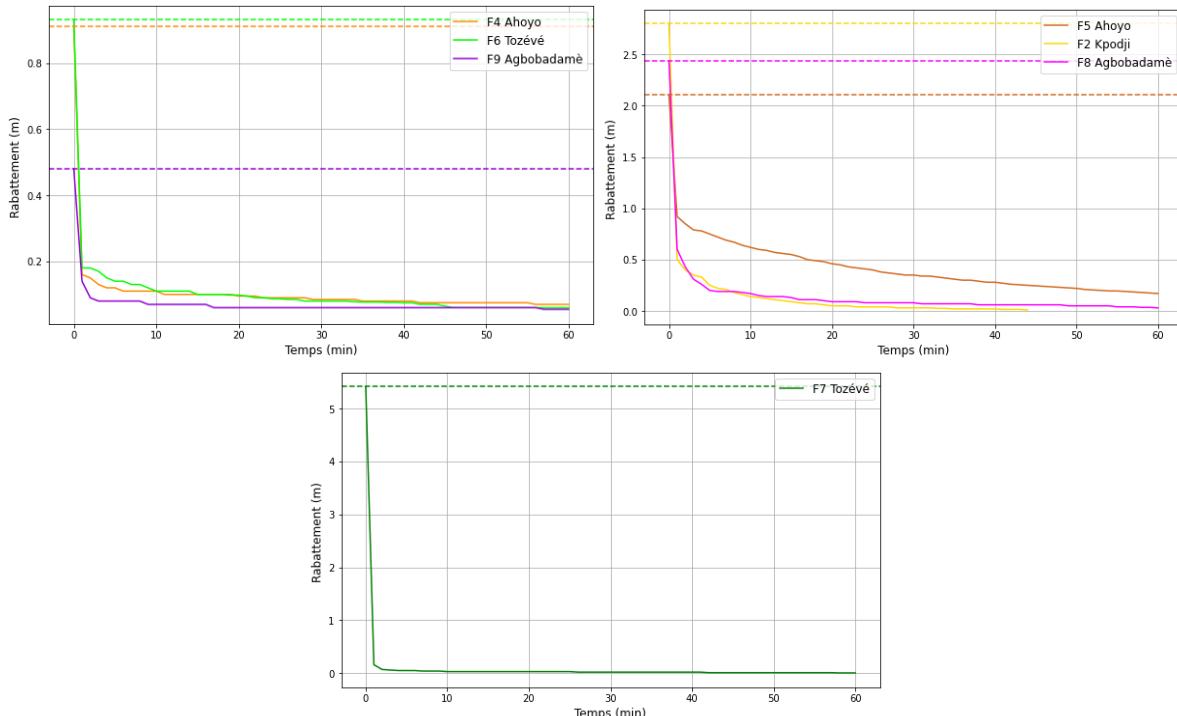


Figure 40 : Evolution du rabattement dans les forages durant la remontée où les lignes en pointillés mettent en évidence la valeur du rabattement stabilisé durant le pompage

Afin de caractériser cette remontée, le temps de retour pour lequel le niveau d'eau revient à 90% de son niveau initial est calculé (Tableau 7).

Essais de pompage

Tableau 7 : Résultats des essais de courte durée

Zone humide	Forage	Débit d'exploitation	Conductivité hydraulique	Transmissivité	Temps de retour
		[m ³ /h]	[m/s]	[m ² /s]	[min]
Ahoyo	F4	15.60	59.37×10^{-5}	53.43×10^{-4}	23
Ahoyo	F5	18.23	132.66×10^{-5}	26.53×10^{-4}	51
Kpodji	F2	6.51	17.77×10^{-5}	7.11×10^{-4}	4.5
Tozévé	F6	9.37	109.51×10^{-5}	32.85×10^{-4}	24
Tozévé	F7	5.45	2.82×10^{-5}	3.11×10^{-4}	0
Agbabadamé	F8	12.48	38.17×10^{-5}	15.27×10^{-4}	4
Agbabadamé	F9	19.48	438.65×10^{-5}	131.60×10^{-4}	> 60

Une variabilité des valeurs de conductivité hydraulique est observée entre les différents forages, allant de l'ordre de 2×10^{-5} à 4×10^{-3} m/s, traduisant une hétérogénéité des propriétés de la nappe. De plus, on retrouve des débits d'exploitation très différents entre les forages. Les motopompes utilisées ne proposaient que trois régimes de fonctionnement, ce qui limitait donc les possibilités d'ajustement. Par conséquent, les régimes utilisés étaient ceux habituellement choisis par les producteurs.

Une certaine hétérogénéité est également perceptible à l'échelle locale, comme dans la zone humide de Tozévé, où un facteur 40 sépare les mesures de conductivité hydraulique des deux forages.

De la même manière, les temps de retour à 90% du niveau piézométrique initial montrent une forte dispersion (Figure 41). A titre d'exemple, le forage 7 à Tozévé présente une remontée quasi immédiate, tandis que le forage 9 à Agbabadamé n'avait pas encore atteint ce seuil une heure après l'arrêt du pompage. Ce dernier présentait le rabattement mesuré le plus faible, d'environ 40 centimètres. De plus, au sein de la zone humide d'Ahoyo, le forage 5, plus superficiel, est marqué par un temps de retour nettement plus élevé que celui du forage 4 plus profond.

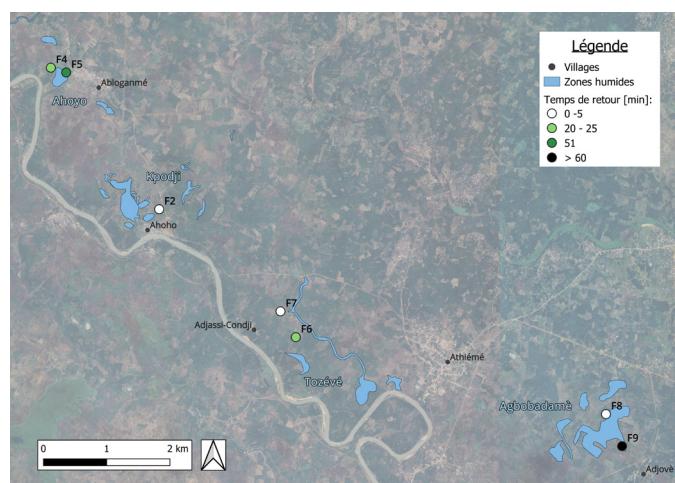


Figure 41 : Distribution spatiale des temps de retour à 90% du niveau initial

Certains forages, montrant des transmissivités élevées, présentent néanmoins des temps de retour prolongés, ce qui reflète une recharge limitée de la nappe. Ce phénomène est moins perceptible dans les forages à plus faible transmissivité où le rabattement reste plus localisé et les volumes mobilisés sont donc réduits.

Essais de pompage

4.3.2. Essais de longue durée

Le premier essai de longue durée, réalisé dans le forage 3 avec un débit d'exploitation d'environ $12\text{m}^3/\text{h}$, a été interprété avec la méthodologie décrite dans la section 4.2. La Figure 42 représente les graphiques d'évolution du rabattement dans le temps dans le puits de pompage F3 et le puits d'observation F4.

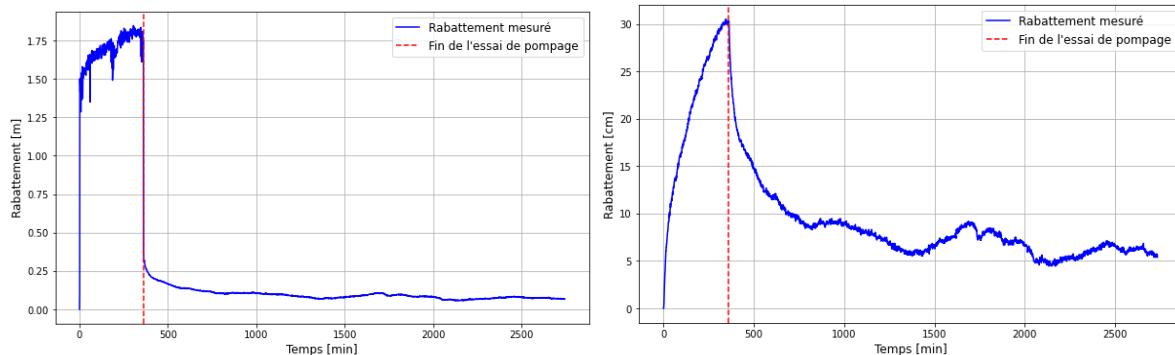


Figure 42 : Evolution du rabattement durant le premier ELD dans le puits de pompage F3 (gauche) et le puits d'observation F4 (droite)

Contrairement à ce qui a été observé pour les essais de courte durée, le rabattement dans le puits de pompage ne s'est pas stabilisé directement. Une phase transitoire est ainsi identifiée, traduisant un comportement différencié de la nappe dans la zone où cet essai a été mené. Cet essai de longue durée a été réalisé avec un débit légèrement inférieur à celui de l'essai de courte durée effectué dans le forage 4, situé à 150 mètres et dont le débit d'exploitation était de $15,6\text{ m}^3/\text{h}$. Un débit plus faible induit un rabattement plus progressif, permettant ainsi de mieux observer la phase transitoire, contrairement à un essai mené à débit plus élevé où le régime permanent peut s'installer plus rapidement.

L'influence du pompage réalisé s'est manifestée dans le puits d'observation, situé à environ 150 mètres du puits de pompage, avec un rabattement mesuré d'environ 30 centimètres.

Les valeurs estimées des paramètres hydrauliques de l'aquifère sont regroupées dans le Tableau 8. L'ensemble des graphiques d'interprétation est disponible dans l'Annexe 9.7.

Tableau 8 : Résultats du premier essai de longue durée

Essai 1							
Régime transitoire		Régime permanent			Remontée		
	Puits de pompage	Puits d'observation	Puits de pompage	Puits d'observation	Cône de dépression	Puits de pompage	Puits d'observation
T	3.72×10^{-3}	2.48×10^{-3}	2.61×10^{-3}	2.81×10^{-3}	2.82×10^{-3}	4.28×10^{-3}	4.32×10^{-3}
K	6.21×10^{-4}	2.76×10^{-4}	4.35×10^{-4}	3.13×10^{-4}		7.15×10^{-4}	4.80×10^{-4}
S	/		3.15×10^{-4}				
R	[m]				729.52		

Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues sont assez cohérentes entre elles, de l'ordre de 4 à 7×10^{-4} m/s dans le puits de pompage et de 3 à 5×10^{-4} m/s dans le puits d'observation, selon la phase du pompage interprétée.

Le coefficient d'emmagasinement calculé durant la phase transitoire dans le puits d'observation est de 3.15×10^{-4} , ce qui reste cohérent avec les valeurs attendues pour une nappe captive (Forkasiewicz, 1972).

Essais de pompage

Finalement, le rayon d'influence, correspondant à la distance maximale à laquelle les effets du pompage sont perceptibles dans l'aquifère, est estimé à environ 730 mètres. Celui-ci est également caractéristique d'une nappe captive où le transfert de pression se marque sur une distance relativement grande.

Concernant le second essai de longue durée, réalisé avec un débit d'exploitation de 9m³/h, la Figure 43 présente l'évolution du rabattement dans le puits de pompage (forage 1). Lors de cet essai, une stabilisation rapide est observée, de manière comparable aux essais de courte durée réalisé dans la même zone. Seules les interprétations du régime permanent et de la remontée ont été considérés afin d'évaluer les paramètres hydrauliques de l'aquifère.

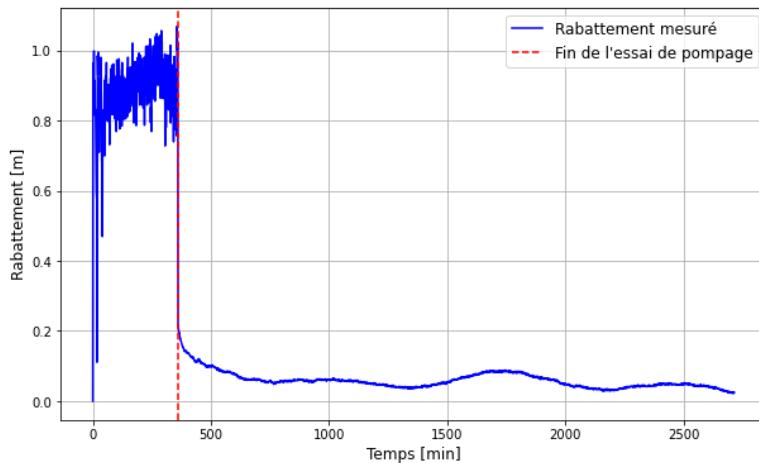


Figure 43 : Evolution du rabattement durant le second ELD dans le puits de pompage F1

Lors de la réalisation du second essai, des producteurs ont indiqué qu'ils allaient effectuer un pompage dans l'un des deux forages peu profonds étudiés (F5). L'étude de variations des hauteurs piézométriques dans ce forage est donc perturbée par cette activité externe et aucune conclusion ne peut être tirée quant à son comportement en réponse au pompage principal (Annexe 9.7).

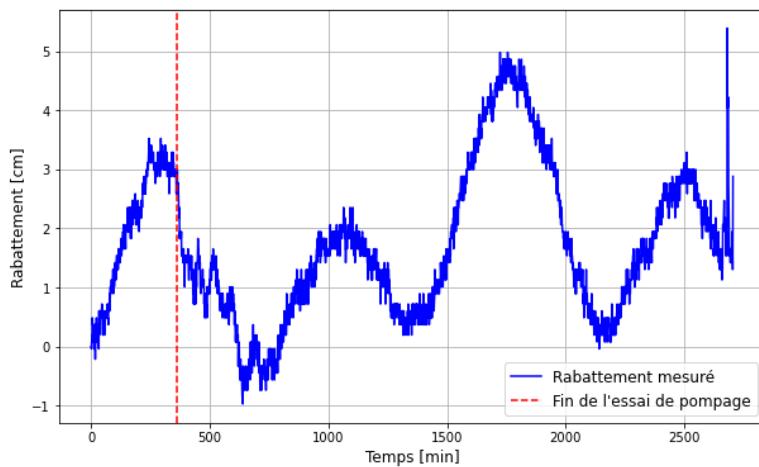


Figure 44 : Variation du rabattement dans le puits d'observation Forage Privé

Dans le puits d'observation privé (Figure 44), un rabattement maximal de seulement 3 centimètres est observé, avec des variations qui se poursuivent après l'arrêt de l'essai de pompage. Cette faible amplitude, combinée à la persistance des fluctuations, suggère que ce rabattement n'est pas lié à l'essai effectué malgré la faible distance séparant les deux ouvrages. Cet essai ne permet donc pas de conclure à l'existence d'une connexion entre les deux couches sableuses productives exploitées par les forages profonds et peu profonds.

Essais de pompage

Seules les données issues du puits de pompage peuvent être utilisés afin d'estimer les paramètres hydrauliques de l'aquifère. Les graphiques réalisés pour cette interprétation sont présentés en Annexe 9.7.

Tableau 9 : Résultats du second essai de longue durée

Essai 2			
	Régime permanent	Remontée	
T	[m ² /s]	3.84×10 ⁻³	5.18×10 ⁻³
K	[m/s]	1.28×10 ⁻³	1.73×10 ⁻³

Les valeurs de conductivité hydraulique estimées lors de ce second essai, présentées dans le Tableau 9, sont légèrement plus élevées que celles obtenues lors du premier essai et sont de l'ordre de 1.5×10^{-3} m/s.

5. Analyse chimique de l'eau

5.1. Mesures des paramètres physico-chimiques pendant les essais de pompage

Lors des essais de pompage de courte durée (voir section 4.1.1), plusieurs paramètres physico-chimiques des eaux (conductivité électrique, pH, potentiel redox et concentration en oxygène dissous) ont été suivis à l'aide d'une sonde multi-paramètre. Des mesures ont été prises après approximativement 1,10,15,25 et 29 minutes de pompage. L'objectif de ce suivi est d'identifier d'éventuelles évolutions de ces paramètres, susceptibles de refléter une intrusion d'eau issue du fleuve, de la zone humide, ou un mélange avec des eaux souterraines présentant un faciès hydrochimique différent.

L'ensemble des évolutions des paramètres mesurés et des caractéristiques des forages étudiés est disponible en Annexe 9.8.

Les mesures d'oxygène dissous ne permettent pas de tirer des conclusions fiables, celles-ci étant très sensibles aux conditions de prélèvement. Pour certaines mesures, le débit élevé a provoqué une agitation de l'eau lors du remplissage du seau. Les valeurs mesurées ne reflètent donc pas nécessairement les concentrations réelles d'oxygène dissous dans l'aquifère.

Les mesures du potentiel redox réalisées sur le terrain présentent une certaine incertitude, limitant ainsi la pertinence d'une analyse de leur évolution au cours du temps. En revanche, leur comparaison spatiale entre les différentes zones étudiées reste instructive. Les potentiels mesurés varient globalement entre -100 et 150 mV. Des valeurs négatives, indiquant des conditions légèrement réductrices, sont mesurées dans les deux forages de la zone de Tozévé ainsi que dans le forage 5 d'Ahoyo, pourtant très superficiel. Les deux forages de la zone d'Agbobadamè révèlent des potentiels redox positifs (75mV pour le forage 8 et 150mV pour le forage 9). Le forage profond d'Ahoyo et celui de Kpodji affichent, quant à eux, des valeurs intermédiaires, de l'ordre d'une centaine de mV. La Figure 45 présente la distribution spatiale des mesures de potentiel redox.

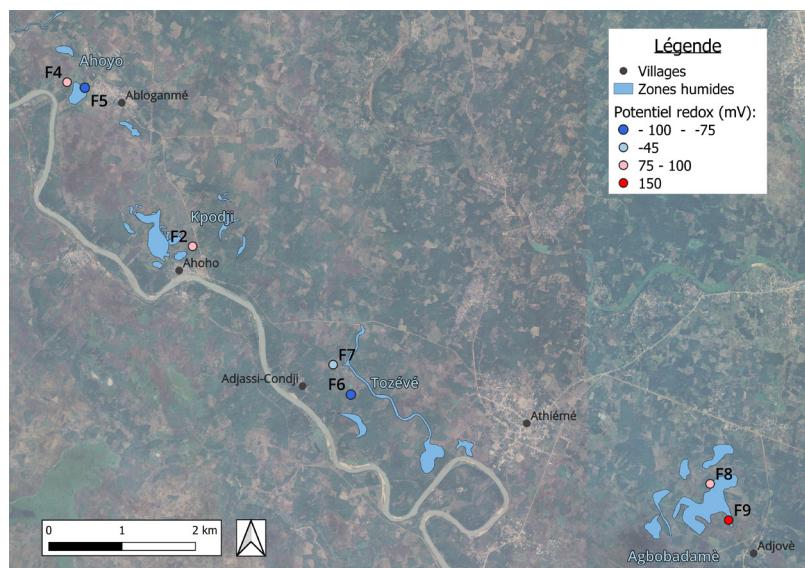


Figure 45 : Distribution spatiale des mesures de potentiel redox

Analyse chimique de l'eau

Concernant la variation du pH, l'ensemble des forages a présenté des valeurs relativement stables au cours du pompage, à l'exception de celui de la zone humide Kpodji (F2) dont le pH a évolué de 6,5 à 7,7.

De plus, seules les eaux des forages de la zone d'Agbabadamè indiquent un pH similaire, autour de 6,7. Les autres zones humides montrent des différences plus marquées entre les forages d'une même zone.

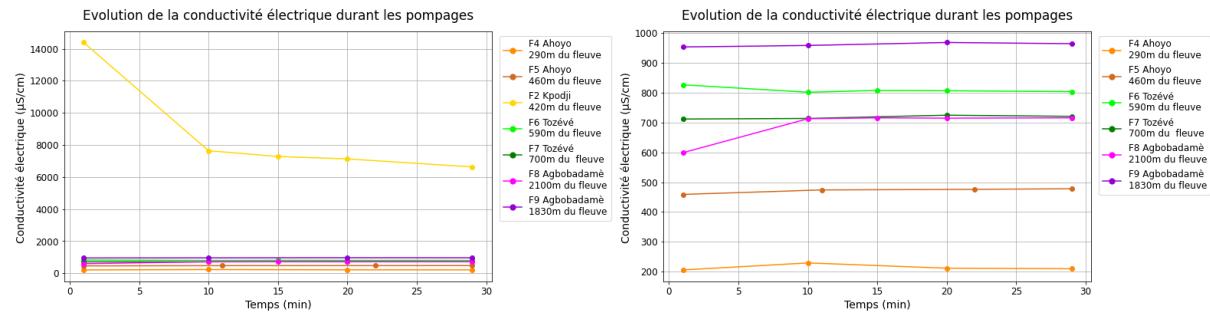


Figure 46 : Evolution de la conductivité électrique durant les essais de courte durée : pour tous les forages (à gauche) et en excluant F2 (à droite)

L'étude des conductivités électriques permet de mettre en évidence des variations marquées entre les différentes zones (Figure 46).

Les valeurs les plus faibles sont mesurées dans les forages de la zone d'Ahoyo, avec toutefois une conductivité plus élevée pour le forage plus superficiel. Ensuite, les forages des zones de Tozévé et Agbabadamè présentent des valeurs comprises entre 700 et 1000 $\mu\text{S/cm}$. Enfin, le forage F2, de la zone de Kpodji, se distingue par une conductivité très importante.

Seul le forage 8 d'Agbabadamè présente une évolution temporelle marquée de sa conductivité. Durant les 10 premières minutes de pompage, celle-ci est passée de 600 à 700 $\mu\text{S/cm}$, avant de se stabiliser. L'origine de cette variation est inconnue. Aucune autre variation significative n'a été observée dans les autres forages. Une intrusion d'eau du fleuve, moins minéralisée, ou de la zone humide ne semble donc pas s'être produite. Toutefois, compte tenu des distances avec le fleuve et des débits modérés, de l'ordre de 10 à 20 m^3/h , une telle observation était peu probable sur une durée de pompage si courte.

5.2. Campagne d'échantillonnage

Durant le stage avec *Join For Water*, des échantillons d'eau ont été récoltés lors des essais de pompage de courte et de longue durée. L'objectif de cette campagne d'échantillonnage est de caractériser la minéralisation des eaux et de comparer les différents échantillons entre eux afin de déterminer s'ils présentent une composition similaire ou non. De plus, la qualité de l'eau peut être analysée afin de déterminer si elle est utilisable pour l'irrigation.

Afin d'obtenir un échantillon représentatif des conditions souterraines, celui-ci a été récolté une fois le puits totalement purgé¹. Les échantillons ont été collectés dans des bouteilles de 33 centilitres et analysés lors du retour du stage à l'Université de Liège par le Laboratoire de chimie en phase aqueuse de l'Unité d'Hydrogéologie et de Géologie de l'Environnement.

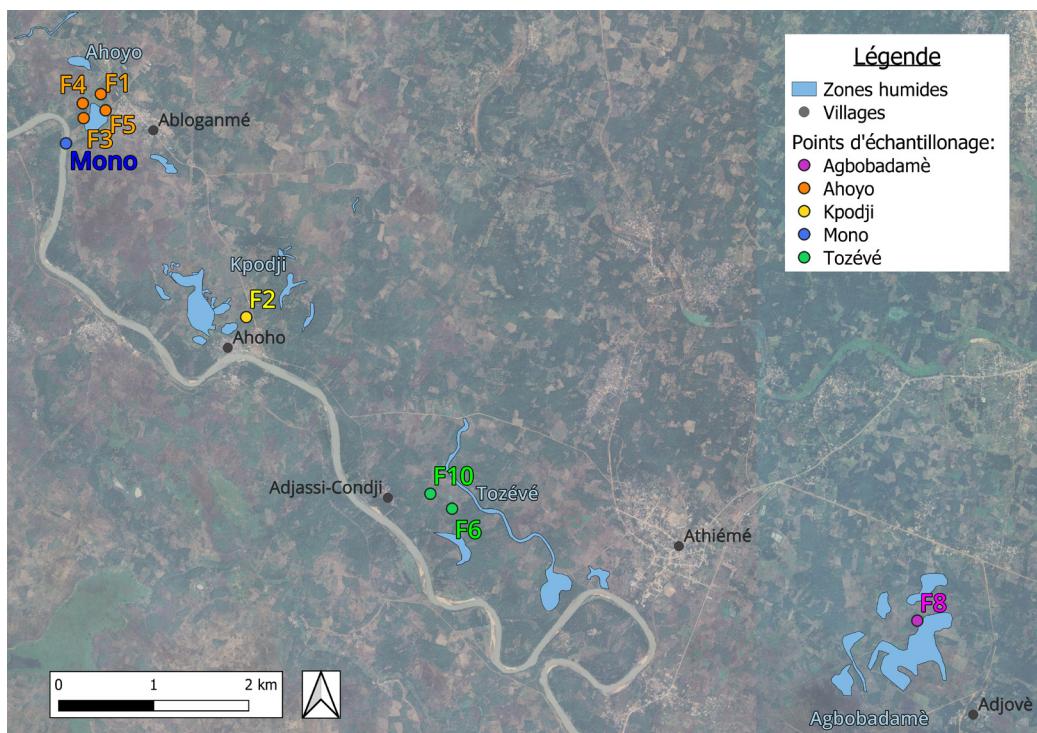
¹ Pompage de deux à trois fois le volume d'eau présent initialement dans le puits

Analyse chimique de l'eau

Au total, 9 échantillons d'eau ont été prélevés dans les forages des différentes zones humides (Tableau 10 et Figure 47). Durant le premier essai de longue durée dans le forage 3, un échantillon a été prélevé au début et à la fin de cet essai. Dans la suite de ce travail, ceux-ci seront respectivement nommés F3-T0 et F3-T1. L'objectif de cette démarche et de déterminer si une variation de la composition des eaux est observée à la suite de cet essai de longue durée, suggérant une arrivée des eaux du fleuve ou d'une eau possédant un faciès distinct. Un échantillon a également été prélevé dans le fleuve Mono pour comparaison.

Tableau 10 : Récapitulatif des échantillons prélevés

Localisation	Nombre d'échantillons prélevés
Zone humide d'Ahoyo	5
Zone humide de Kpodji	1
Zone humide de Tozévé	2
Zone humide d'Agbabadamè	1
Fleuve Mono	1



5.3. Description et qualité du jeu de données

Les échantillons analysés ont permis d'obtenir un ensemble de paramètres physico-chimiques.

Les résultats de l'analyse du laboratoire, disponibles en Annexe 9.9 , comprennent :

- La conductivité et la résistivité électrique, la température, le pH et le pH de saturation (pHs), l'indice de Langelier, le caractère de l'eau, les duretés (totale, permanente et temporaire) et les alcalinités (TA et TAC).
- La concentration en CO₂ libre.
- Les concentrations ioniques (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Li⁺, Sr²⁺ et NH₄⁺ pour les cations et Cl⁻, F⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, OH⁻ et Br⁻ pour les anions).

Analyse chimique de l'eau

Afin d'évaluer la fiabilité des résultats d'analyses, la balance ionique (ou *Charge Balance Error*, CBE) a été calculée pour chaque échantillon. Cette vérification repose sur la comparaison entre la somme des concentrations en cations et celle des anions, toutes deux exprimées en milliéquivalents par litre (meq/L). La formule utilisée est la suivante :

$$CEB(\%) = \frac{\sum([cations] - [anions])}{\sum([cations] + [anions])} \times 100(\%)$$

Un écart de plus de quelques pourcents entre les charges cationiques et anioniques peut indiquer un problème dans l'analyse chimique ou la présence d'espèces ioniques non mesurées mais significatives (Fetter, 2001). En pratique, un CBE inférieur à $\pm 5\%$ est généralement considéré comme acceptable pour des eaux souterraines (Deutsch & Siegel, 1997).

Tableau 11 : Valeurs des concentrations totales en anions, cations et des balances ioniques pour chaque échantillon

Localisation	Nom	Cations (total)	Anions (total)	Balance ionique (CEB)
		[meq/L]	[meq/L]	[%]
Ahoyo	F1	2.72	2.75	-0.44
	F3-T0	3.95	3.68	3.58
	F3-T1	4.09	3.78	3.88
	F4	2.23	2.23	0.07
	F5	3.72	3.86	-1.84
Kpodji	F2	77.81	74.97	1.86
Tozévé	F6	7.49	8.25	-4.86
	F10	9.17	9.00	0.95
Agbabadamè	F8	7.07	7.10	-0.25
Fleuve	Mono	1.17	1.20	-1.34

Les valeurs de balance ionique présentées dans le Tableau 11 restent dans les limites acceptables ($< 5\%$), confirmant la fiabilité des données utilisées.

De plus, durant les essais de courte durée, les paramètres physico-chimiques ont été mesurés (section 5.1). Il est donc possible de comparer les résultats obtenus au laboratoire des mesures prises sur le terrain pour les échantillons concernés par ces deux mesures (Tableau 12).

Tableau 12 : Comparaison entre les conductivités et les pH mesurés sur le terrain et en labo

Forage	Conductivité terrain	Conductivité labo	pH terrain	pH labo
F4	220	233	6.95 – 6.99	6.68
F5	474	358	6.39 – 6.5	6.37
F2	7280	7880	7.16	6.98
F6	808	807	6.2	6.55
F8	716	745	6.82	6.99

Les valeurs de conductivité et de pH obtenues en laboratoire présentent une bonne concordance avec les mesures de terrain. De légères différences sont toutefois observées, attribuables à des conditions de conservation et de transport non optimales des échantillons.

Analyse chimique de l'eau

5.4. Analyse statistique

Cette section a pour objectif d'explorer le jeu de données à travers une analyse statistique descriptive (minimum, maximum, médiane, moyenne et déviation standard). Elle vise à mieux comprendre la répartition des valeurs, identifier d'éventuelles valeurs extrêmes (*outliers*) et à mettre en évidence les principales tendances des paramètres mesurés.

Les boites à moustaches sont disponibles en Annexe 9.10 et les paramètres statistiques des échantillons d'eau souterraine sont repris dans le Tableau 13. Les concentrations et paramètres physico-chimiques mesurés dans l'échantillon du Mono sont également disponibles afin de pouvoir procéder à une comparaison entre les eaux souterraines et celles du fleuve. Certaines concentrations, nommées n.d., sont inférieures à la limite de détection de l'appareil utilisé.

Tableau 13 : Analyse statistique de la composition des échantillons d'eau souterraine analysés et résultats de l'analyse de l'échantillon provenant du fleuve Mono

	Unité	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Déviation standard	Eaux du Mono
Conductivité à 25°C	µS/cm	233.6	7880.4	381.8	1323.78	2469.95	113.7
Résistivité	Ω.cm	126.90	4280.82	2619.17	2193.10	1307.82	8795.07
pH labo		6.37	7.51	6.98	6.87	0.38	6.46
pHs		6.39	8.18	7.46	7.47	0.57	8.61
Dureté totale	°f	6.37	223.77	15.02	37.88	70.12	4.28
Dureté permanente	°f	0	200.17	0	22.42	66.66	0
Dureté temporaire	°f	6.37	32.46	14.10	15.46	8.19	4.27
TA	°f	0	0.06	0.01	0.01	0.02	0
TAC	°f	7.0	35.0	16.9	19.2	9.9	5.3
Ca ²⁺	mg/L	19.34	537.01	38.18	95.13	167.01	6.69
OH ⁻	mg/L	3.99 E-04	5.50 E-03	1.62 E-03	1.79 E-03	1.61 E-03	4.90 E-04
CO ₃ ²⁻	mg/L	0.02	0.76	0.12	0.16	0.23	0.01
HCO ₃ ⁻	mg/L	85.36	425.44	206.15	231.75	120.50	64.65
CO ₂ libre	mg/L	8.28	79.84	16.05	26.84	25.90	15.69
K ⁺	mg/L	0.73	3.53	0.79	1.43	1.12	2.30
Li ⁺	mg/L	n.d.	0.05	0.04	0.04	0.02	n.d.
Mg ²⁺	mg/L	3.75	218.35	10.16	34.41	69.37	4.52
Na ⁺	mg/L	21.14	759.67	26.19	121.80	241.19	5.95
NH ₄ ⁺	mg/L	n.d.	30.01	2.89	9.20	9.80	n.d.
Br ⁻	mg/L	0.06	10.41	0.12	1.43	3.39	n.d.
Cl ⁻	mg/L	12.77	2401.47	30.49	301.03	788.19	4.44
F ⁻	mg/L	0.06	0.32	0.19	0.18	0.09	0.08
NO ₂ ⁻	mg/L	n.d.	3.77	1.60	2.28	1.31	n.d.
NO ₃ ⁻	mg/L	n.d.	1.16	0.29	0.45	0.40	n.d.
SO ₄ ²⁻	mg/L	5.04	117.38	15.19	24.78	35.51	0.721

Une très grande variabilité des paramètres mesurés est constatée, indiquant une hétérogénéité significative de la composition des échantillons d'eau analysés.

L'échantillon de la zone humide de Kpodji (F2) présente une très forte conductivité, indiquant une minéralisation importante. Pour de nombreux éléments analysés (calcium, magnésium, sodium, brome, chlorures, nitrates et sulfates), cet échantillon affiche les valeurs maximales.

Les échantillons de la zone humide de Tozévé (F6 et F10) montrent des concentrations en potassium et en bicarbonates plus élevées que dans les autres zones, les bicarbonates contribuant ainsi à une dureté temporaire plus importante.

Analyse chimique de l'eau

Une disparité des résultats est constatée au sein de la zone humide d'Ahoyo. Le forage n°5, plus superficiel, présente des concentrations plus élevées en magnésium et nitrates, ainsi qu'une concentration plus faible en fluorures, par rapport aux autres forages de la zone.

Un phénomène similaire est observé à Tozévé où le forage n°6, plus superficiel, affiche des concentrations plus élevées en ammonium et en nitrates, mais des teneurs plus faibles en sulfates, en ions calcium et carbonates que le forage n°10.

Enfin, l'échantillon prélevé dans le fleuve Mono est moins minéralisé que les échantillons d'eau souterraine. Celui-ci présente des concentrations inférieures en ions calcium, carbonate, bicarbonate, sodium, chlorures et sulfates.

5.5. Représentation graphique de l'hydrochimie générale

5.5.1. Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper se compose de deux diagrammes ternaires distincts, l'un pour les cations et l'autre pour les anions, dont les résultats sont projetés dans un losange central.

Ce type de graphique permet de visualiser rapidement la proportion des différents éléments majeurs et de comparer différents types d'eau entre eux.

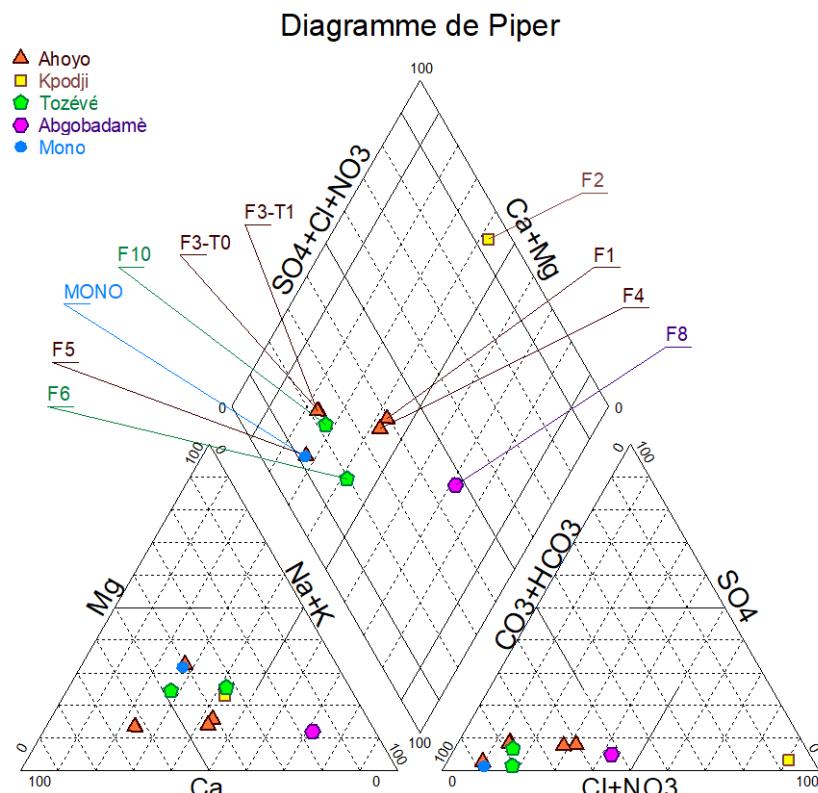


Figure 48 : Diagramme de Piper des échantillons prélevés dans les différents forages et le Mono

Sur le diagramme de Piper, présenté dans la Figure 49, trois grands groupes hydrochimiques se distinguent :

- Un ensemble de forages à faciès bicarbonaté calcique et magnésien provenant des forages des zones humides d'Ahoyo et de Tozévé, ainsi que l'échantillon provenant du fleuve.

Analyse chimique de l'eau

- Le forage 8 de la zone humide d'Agbobadamè, à faciès bicarbonaté sodique et potassique. Il se distingue par une concentration en sodium plus élevée que dans les autres zones.
- Le forage 2 de Kpodji, de type chloruré et sulfaté calcique et magnésien. Il présente un faciès très différent des autres en raison de sa forte teneur en chlorures.

Au sein de la zone humide d'Ahoyo, trois faciès hydrochimiques principaux sont observés :

- F1 et F4 présentent une hydrochimie très semblable.
- F3-T0 et T3-T1 sont très similaires et forment un faciès distinct. Ils se caractérisent par des proportions plus élevées en calcium, carbonates et bicarbonates et plus faibles en potassium, sodium et chlorures par rapport à F1 et F4.
- F5, peu profond, est similaire au fleuve Mono, avec une proportion en magnésium plus élevée que dans les autres forages de la zone.

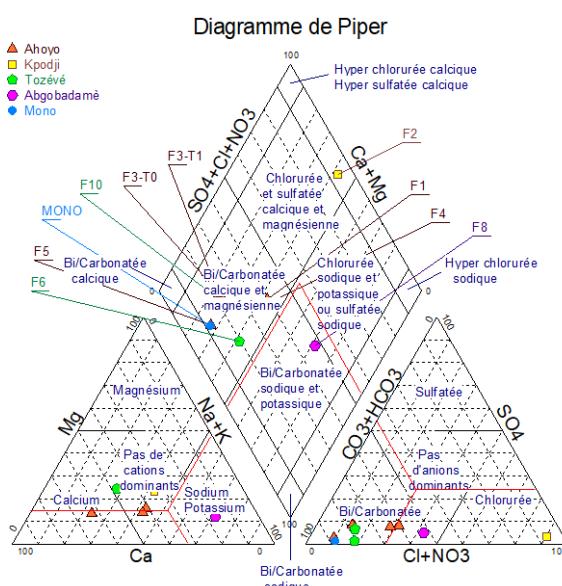


Figure 49 : Diagramme de Piper des échantillons prélevés dans les différents forages et le Mono - groupes hydrochimiques

5.5.2. Diagramme de Stiff

Le diagramme de Stiff permet de représenter les concentrations (en méq/L) en anions (à droite) et cations (à gauche) de l'échantillon et de représenter cela à l'aide d'un polygone. La forme générale du polygone permet ainsi une comparaison rapide des concentrations ioniques des ions majeurs entre les échantillons et du degré de minéralisation des échantillons.

Les constatations tirées du diagramme de Stiff (Figure 50) confirment celles du diagramme de Piper pour la zone humide d'Ahoyo, où les forages sont représentés en orange. Les forages F1 et F4 présentent des formes de polygone très similaires. Le forage F3, après le pompage de longue durée, ne montre pas de modification notable de son faciès. Quant au forage F5, il présente une forme similaire à celle du fleuve Mono, avec cependant des concentrations ioniques nettement plus élevées.

Une minéralisation plus marquée est observée dans les forages de la zone humide de Tozévé, représentée en vert. Le forage F10, qui présentait un faciès proche du forage F3 d'Ahoyo sur le diagramme de Piper, se distingue ici par des concentrations nettement plus importantes. Les forages F6 et F10 de Tozévé affichent des concentrations globalement proches, à l'exception

Analyse chimique de l'eau

du calcium, très peu présent dans F6 mais abondant dans F10, et du magnésium également plus présent dans F10.

Le forage F8 présente une hydrochimie distincte, caractérisée par des teneurs en sodium et en chlorures plus élevées que dans les autres échantillons.

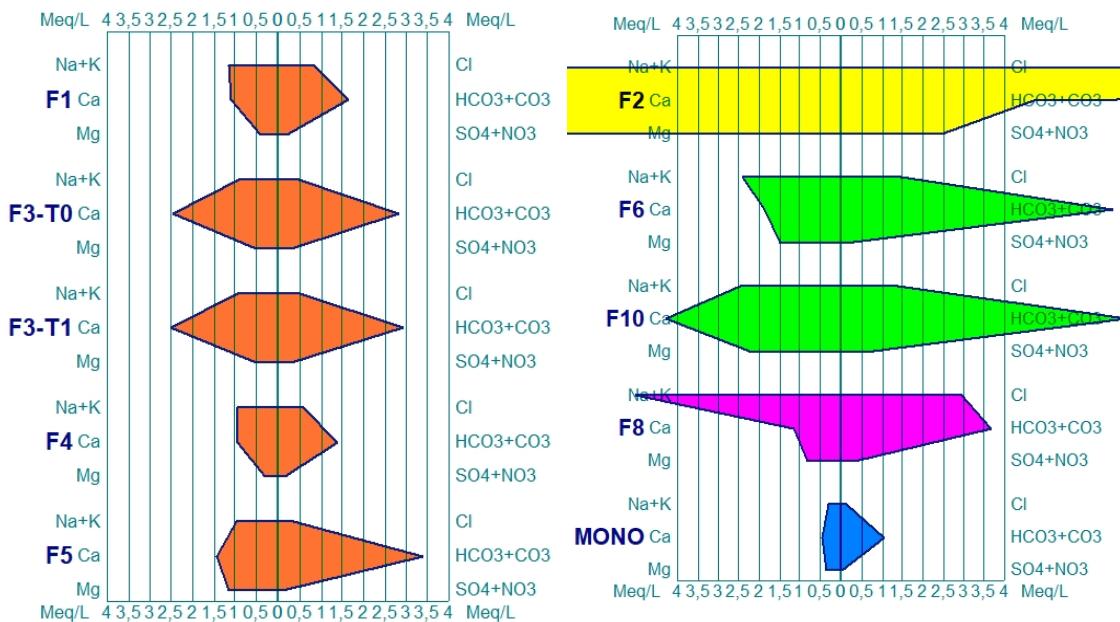


Figure 50 : Diagramme de Stiff des échantillons prélevés dans les différents forages et le Mono où les forages représentés en orange proviennent de la zone humide d'Ahoyo, en jaune de Kpodji, en vert de Tozévé et en mauve d'Agbobadamè

L'échantillon F2 de Tozévé affiche des concentrations si élevées, notamment en chlorures, qu'il n'est pas lisible sur le même graphique que les autres échantillons (Figure 51).



5.5.3. Diagramme de Schöeller

Le diagramme de Schöeller est un graphique semi-logarithmique dans lequel sont représentées les concentrations des principaux ions, permettant de comparer rapidement les résultats de plusieurs échantillons.

Le diagramme de Schöeller (Figure 52) permet de mettre en évidence une très faible minéralisation de l'échantillon de Mono, avec les concentrations plus faibles des éléments représentés dans ce diagramme.

Le forage de la zone humide de Kpodj présente quant à lui des concentrations nettement supérieures aux autres échantillons, excepté pour les carbonates et bicarbonates.

Enfin, la faible minéralisation des échantillons provenant de la zone humide d'Ahoyo est également visible. Ceux-ci présentent généralement des concentrations plus faibles.

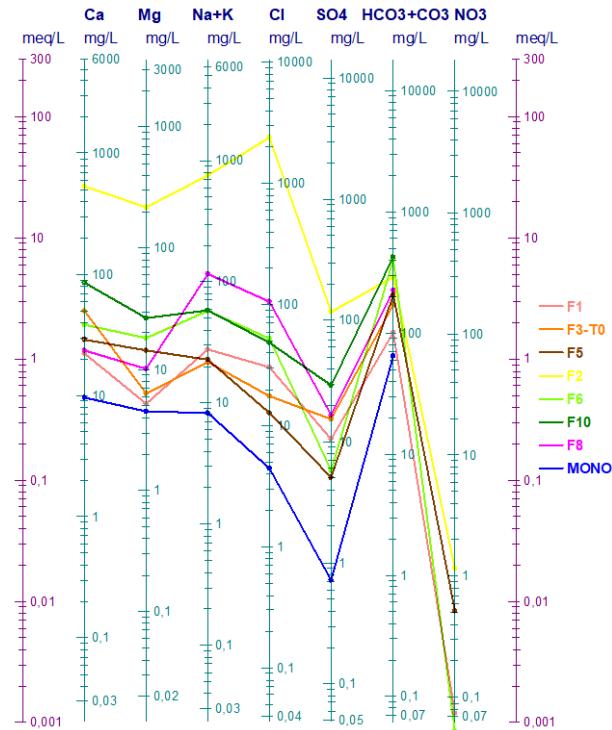


Figure 52 : Diagramme de Schöeller des échantillons prélevés dans les différents forages et le Mono où les forages représentés en orange proviennent de la zone humide d'Ahoyo, en jaune de Kpodji, en vert de Tozévé et en mauve d'Agbobadamè

5.5.4. Conclusion générale des diagrammes

Finalement, l'analyse statistique et les diagrammes hydrochimiques permettent de dégager plusieurs tendances générales.

Dans la zone humide d'Ahoyo, trois faciès hydrochimiques distincts sont observés :

- Le forage 5, plus superficiel, présente une composition similaire à celle du fleuve Mono, mais avec des concentrations globalement plus élevées. Par rapport aux autres forages de la zone d'Ahoyo, il se distingue par des teneurs en magnésium et nitrates plus importantes.
- Les forages 1 et 4, distants de 220 mètres, présentent une hydrochimie comparable, avec des concentrations en éléments majeurs similaires (voir Annexe 9.11)
- Le forage 3, au sein duquel un échantillon avait été prélevé avant et un autre après l'essai de pompage de longue durée, n'a présenté aucune variation de composition (voir Annexe 9.11).

Il se distingue des forages 1 et 4 par des teneurs en calcium plus élevées et en chlorures plus faibles, tandis que les concentrations en magnésium, sodium, potassium et sulfates restent similaires.

Le forage F2 de la zone humide de Kpodji présente un faciès hydrochimique nettement distinct, caractérisé par une forte minéralisation et des concentrations très importantes en calcium (537 mg/L), magnésium (218 mg/L), sulfates (117 mg/L) et chlorures (2400 mg/L). Des traces de nitrates y sont également détectées. En revanche, les teneurs en carbonates et bicarbonates restent comparables à celles mesurées dans les forages des autres zones humides. Compte tenu de l'éloignement de la côte et de l'absence de telles anomalies dans les autres échantillons, une intrusion marine semble peu probable. Il s'agit probablement d'une pollution localisée, dont

Analyse chimique de l'eau

l'origine ne peut être déterminée avec les données disponibles. Une nouvelle campagne d'analyses est recommandée afin de confirmer cette hypothèse.

Les forages de la zone humide de Tozévé se caractérisent par une minéralisation plus importante que celle d'Ahoyo, en particulier par des concentrations plus importantes en carbonates et bicarbonates. Les analyses révèlent des différences entre deux forages de profondeur différente : l'eau du forage 10 est plus riche en calcium et sulfates que celle du forage 6, tandis que les concentrations en magnésium, sodium, chlorures, carbonates et bicarbonates restent relativement proches. Des traces de nitrates et d'ammonium sont uniquement détectées dans le forage 6.

Enfin, dans la zone humide d'Agbabadamè, les eaux du forage se distinguent de celles des zones d'Ahoyo et Tozévé par des concentrations plus élevées en chlorures et sodium.

5.6. Analyses multivariées

5.6.1. Matrice de corrélations

Afin d'analyser les facteurs influençant la distribution des éléments chimiques au sein des forages, des matrices de corrélation ont été établies. Celles-ci visent à identifier des relations significatives entre les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et certaines caractéristiques des forages, présentées dans le Tableau 14, susceptibles d'influencer cette distribution. La profondeur des forages, la distance avec le fleuve et les épaisseurs des différentes couches lithologiques seront considérées.

Tableau 14 : Caractéristiques des forages

Forage	Zone humide	Profondeur	Distance Mono	Couche de sable	Couche d'argile	Couche sablo-argileuse	Couche argilo-limoneuse
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
F1	Ahoyo	28	490	4	14	9.8	0
F3	Ahoyo	24	200	11	3	4	2.5
F4	Ahoyo	24	290	11.5	0	8	3.5
F5	Ahoyo	6	450	3	0	2.5	0
F2	Kpodji	18.5	420	4.5	13.5	0	0
F6	Tozévé	15.5	590	5.5	2	1.5	6
F10	Tozévé	38.5	525	8	3	18	8.5
F8	Agbabadamè	18.5	2100	5	5.5	6	2

Les coefficients de corrélation (r) calculés ont été testés à l'aide d'une statistique t afin d'évaluer leur significativité. Les p -valeurs obtenues ont permis d'identifier les corrélations significatives ($p < 0,05$). Celles-ci ont ensuite été mises en évidence et classées selon l'intensité du coefficient. La matrice des coefficients de corrélation est disponible dans la Figure 53. Cette analyse a été réalisée en n'incluant pas les résultats d'analyse du forage F2, celui-ci étant probablement pollué et ne reflétant pas l'environnement naturel (voir discussion section 5.5.4).

Analyse chimique de l'eau

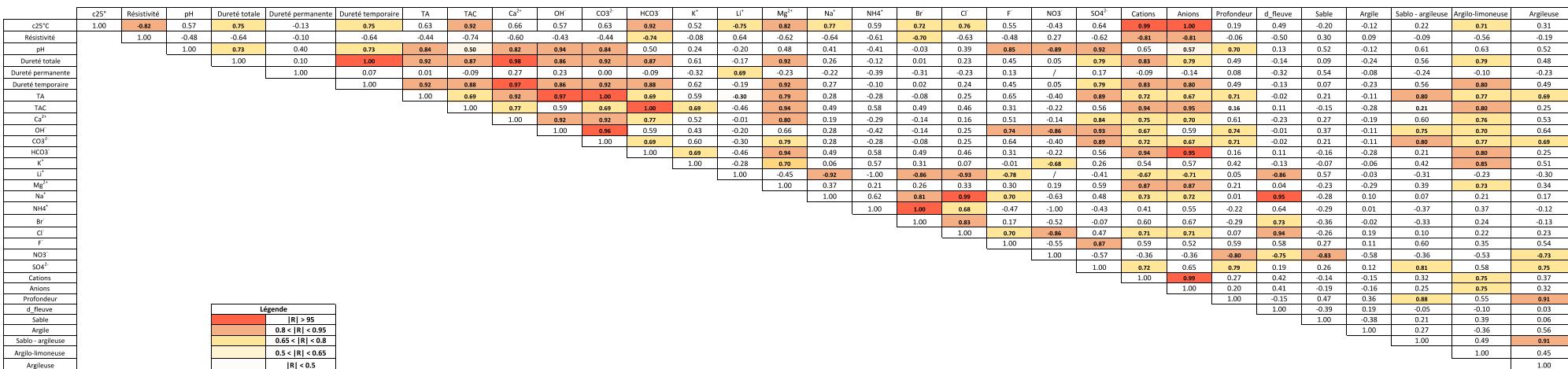


Figure 53 : Matrice des coefficients de corrélation

Analyse chimique de l'eau

5.6.1.1. Corrélation entre les éléments chimiques

L'analyse des coefficients de corrélation permettent de mettre en évidence plusieurs groupements d'éléments chimiques corrélés.

Les concentrations en ions OH⁻ et CO₃²⁻ présentent une corrélation très forte ($r = 0.96$) et sont également fortement liées aux concentrations en Ca²⁺ ($r = 0.92$) et SO₄²⁻ ($r \cong 0.90$). De plus, les concentrations en OH⁻ et F⁻ sont liées avec $r = 0.7$.

Une corrélation importante est observée entre les concentrations en HCO₃⁻ et le Mg²⁺ ($r = 0.95$). Ces deux éléments présentent également des corrélations notables avec les concentrations en CO₃²⁻ ($r \cong 0.75$), K⁺ ($r = 0.70$) et Ca²⁺ ($r \cong 0.70$).

Les concentrations en Na⁺ et Cl⁻ sont presque parfaitement corrélées ($r = 0.99$) et présentent également une corrélation élevée avec les concentrations en Br⁻ ($r \cong 0.82$) et F⁻ ($r = 0.7$). L'ensemble de ces concentrations présente une corrélation négative marquée avec le lithium ($|r| > 0.78$).

Finalement, les concentrations en nitrates présentent des corrélations négatives avec plusieurs éléments : OH⁻ ($r = -0.86$), Cl⁻ ($r = -0.86$) et K⁺ ($r = -0.7$).

5.6.1.2. Corrélation avec les caractéristiques des forages

L'analyse des corrélations avec la profondeur du forage révèle une corrélation positive avec les concentrations en SO₄²⁻ ($r = 0.79$), OH⁻ ($r = 0.74$) et CO₃²⁻ ($r = 0.71$) et, par conséquent, le pH. Ils montrent également une corrélation négative importante avec les concentrations en nitrates ($r = -0.8$). Ainsi, une plus grande profondeur de forage semble associée à un pH plus basique et à une moindre influence des contaminations anthropiques.

La distance entre les forages et le fleuve présente une forte corrélation positive avec les concentrations en Na⁺ ($r = 0.95$), Cl⁻ ($r = 0.94$) et Br⁻ ($r = 0.73$). Elle présente également une corrélation négative avec les concentrations en Li⁺ ($r = -0.86$) et nitrates ($r = -0.75$).

L'impact des lithologies traversées a également été exploré. L'épaisseur de la couche sableuse est corrélée négativement avec la concentration en nitrates ($r = -0.83$). L'épaisseur de la couche argilo-limoneuse montre des corrélations positives avec les concentrations en plusieurs éléments : K⁺ ($r = 0.85$), HCO₃²⁻ ($r = 0.80$), CO₃²⁻ ($r = 0.77$), Ca²⁺ ($r = 0.76$), Mg²⁺ ($r = 0.73$) et OH⁻ ($r = 0.70$). Enfin, l'épaisseur de la couche argileuse est corrélée positivement avec les concentrations en SO₄²⁻ ($r = 0.75$) et CO₃²⁻ ($r = 0.69$) et négativement avec les nitrates ($r = -0.73$).

Analyse chimique de l'eau

5.6.2. Matrices auto-organisantes (SOMs)

Des matrices auto-organisantes (Self Organizing Map – SOMs) ont également été réalisées. Les SOMs sont un type de réseau de neurones artificiels non supervisés qui projettent des données multidimensionnelles complexes sur une carte bidimensionnelle tout en préservant la topologie des relations entre les données (Kohonen, 1995 ; Bamford *et al.*, 2025).

Cette méthode permet de regrouper des données similaires en clusters, facilitant l'identification de groupes au faciès hydrochimique semblables dans un contexte hydrogéologique (Peeters & Dassargues, 2006).

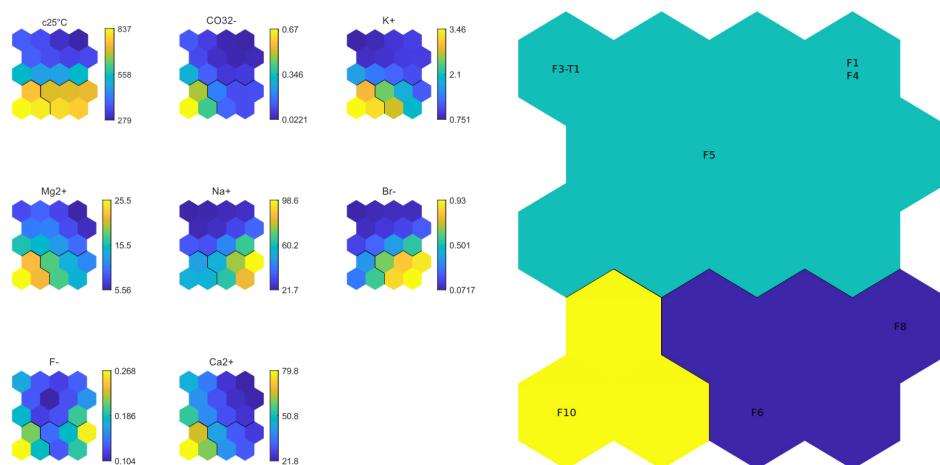
Afin de visualiser le résultat des SOM, deux types de grilles sont utilisées : la matrice U et la matrice des composants.

La matrice U, également appelée matrice des distances, permet de représenter les distances euclidiennes entre unités voisines. Plus la distance calculée est grande, plus les nœuds voisins ont des faciès différents. Ainsi, des valeurs élevées indiquent les frontières entre les clusters tandis que des valeurs plus faibles montrent les clusters eux-mêmes.

La matrice des composants représente la distribution d'une variable d'entrée sur l'ensemble de la carte. Chaque carte correspond à une variable du jeu de données et affiche la valeur de cette variable. Il est ainsi possible de déterminer visuellement les variables ayant des distributions similaires (Vesento, 1999 ; Peeters & Dassargues, 2006).

Les résultats ont été obtenus à l'aide de l'algorithme des SOMs développé sur MATLAB. De la même manière que pour les matrices de corrélation, les analyses provenant du forage F2 ont été retirées du jeu de données. Un nombre de trois clusters a été fixé et les variables en entrée ont été déterminées sur base des résultats de la matrice de corrélation. L'inclusion de deux variables fortement corrélées pourrait biaiser la détermination des différents clusters. Les paramètres retenus sont la conductivité électrique et les concentrations en ions suivants : carbonates, potassium, magnésium, sodium, bromure, fluorure et calcium.

La matrice U obtenue est disponible en Annexe 9.12. La Figure 54 présente la matrice des composants et la répartition des différents échantillons au sein des clusters obtenus.



Les groupes définis par les SOMs sur base des paramètres hydrochimiques utilisés sont présentés dans Tableau 15.

Analyse chimique de l'eau

Tableau 15 : Comparaison des paramètres hydrochimiques utilisés pour les SOMs entre les clusters définis

Nom	Conductivité µS/cm	[CO ₃ ²⁻] mg/L	[K ⁺] mg/L	[Mg ²⁺] mg/L	[Na ⁺] mg/L	[Br ⁻] mg/L	[F] mg/L	[Ca ²⁺] mg/L
F1	289.7	0.016	1.27	5.25	26.19	0.10	0.13	22.33
F3-T1	381.8	0.150	0.73	6.64	21.42	0.06	0.19	50.80
F4	233.6	0.023	0.78	3.75	21.43	0.07	0.15	19.34
F5	358.1	0.027	0.78	14.31	22.17	0.12	0.06	28.91
F10	847.8	0.760	3.53	26.71	54.74	0.20	0.30	86.10
F8	745.7	0.121	0.79	10.16	115.53	0.95	0.32	23.73
F6	807.6	0.079	3.22	18.12	53.87	0.95	0.07	38.18

L'ensemble des concentrations mesurées peuvent être étudiées grâce à ces groupements (Tableau 16). Pour cela, les éléments fortement corrélés (pH/OH⁻/CO₃²⁻ ; HCO₃²⁻ / Mg²⁺ ; Na⁺/Cl⁻) ne seront représentés qu'une fois. Les résultats des comparaisons entre leurs concentrations, présentées en Annexe 9.12, montrent en effet un comportement tout à faire similaire.

Tableau 16 : Comparaison des paramètres hydrochimiques analysés entre les clusters définis

Nom	Conductivité µS/cm	[SO ₄ ²⁻] mg/L	pH	[Ca ²⁺] mg/L	[Mg ²⁺] mg/L	[K ⁺] mg/L	[Cl ⁻] mg/L	[F] mg/L	[Br ⁻] mg/L
F1	289.7	10.50	6.46	22.33	5.25	1.27	30.49	0.13	0.10
F3-T1	381.8	15.19	7.18	50.80	6.64	0.73	18.46	0.19	0.06
F4	233.6	7.91	6.68	19.34	3.75	0.78	22.11	0.15	0.07
F5	358.1	5.04	6.37	28.91	14.31	0.78	12.77	0.06	0.12
F10	847.8	29.34	7.51	86.10	26.71	3.53	48.70	0.30	0.20
F8	745.7	16.49	6.99	23.73	10.16	0.79	105.37	0.32	0.95
F6	807.6	5.75	6.55	38.18	18.12	3.22	52.39	0.07	0.95

Le premier groupement, composé des forages provenant de la zone humide d'Ahoyo, présente les conductivités et les concentrations en Cl⁻ et Br⁻ les plus faibles. En comparaison à l'ensemble du jeu de données, les concentrations en Mg²⁺, K⁺ et F⁻ sont relativement faibles. Le pH et les concentrations en SO₄²⁻ et Ca²⁺ sont relativement variables.

Le forage F10, situé sur la zone humide de Tozévé, forme un cluster à lui seul. Il se caractérise par la conductivité et le pH les plus élevés, ainsi que les concentrations maximales en Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et des teneurs très élevées en F⁻. Celui-ci contient une concentration en Br⁻ relativement faible en comparaison aux concentrations mesurées au sein des forages 8 et 6.

Le dernier groupement est formé par les forages 6 et 8, provenant respectivement des zones humides de Tozévé et d'Agbabadamé. Il présente les concentrations en Br⁻ et Cl⁻ les plus élevées ainsi qu'une conductivité relativement élevée. Le pH et les concentrations en Ca²⁺ et Mg²⁺ sont moyennes et les concentrations en SO₄²⁻, K⁺ et F⁻ assez variables.

Ces tendances par groupe sont résumées dans le Tableau 17. Les symboles utilisés sont les suivants :

- ++ : concentrations les plus élevées du jeu de données
- + : concentrations élevées dans le jeu de données
- o : concentration moyennes par rapport au jeu de données
- - : concentrations basses dans le jeu de données
- -- : concentrations les moins élevées du jeu de données
- x : concentrations variées (des plus élevés aux plus bas)

Analyse chimique de l'eau

Tableau 17 : Caractéristiques par paramètres de chaque groupe délimité par la méthode SOMs

Groupe	Conductivité	[SO ₄ ²⁻]	pH	[Ca ²⁺]	[Mg ²⁺]	[K ⁺]	[Cl ⁻]	[F ⁻]	[Br ⁻]
1	--	x	x	x	-	-	--	-	--
2	++	++	++	++	++	++	o	+	-
3	+	x	o	o	o	x	++	x	++

5.7. Distribution spatiale des paramètres physico-chimiques et des concentrations

Dans cette sous-section, la distribution spatiale de la conductivité électrique, du pH, ainsi que des principales concentrations ioniques mesurées dans les échantillons est analysée.

5.7.1. Conductivité et pH

Afin de fournir une analyse complète de la zone, les données issues des mesures de terrain seront complétées, pour les trois forages ayant uniquement fait l'objet d'analyses en laboratoire, par les résultats de ces dernières. Les forages concernés sont les forages F1 et F3 situés à Ahoyo, le forage F10 à Tozévé, ainsi qu'un échantillon prélevé dans le fleuve Mono. Les mesures de terrain sont plus fiables, n'ayant pas été impactées par les mauvaises conditions de stockage et de transport des échantillons.

L'analyse de la distribution spatiale des conductivités électriques, représentée dans la Figure 55, met en évidence des contrastes marqués entre les différentes zones humides. Les valeurs les plus faibles, n'excédant pas 474 µS/cm, proviennent des échantillons prélevés dans le fleuve et la zone humide d'Ahoyo, située à l'extrême nord de la zone d'étude. Les conductivités des eaux de Tozévé et Agbabadamè sont comprises entre 714 et 959 µS/cm. Une faible variabilité au sein de la zone d'Agbabadamè est également remarquée. La conductivité la plus élevée, atteignant 7280 µS/cm, est enregistrée dans la zone humide de Kpodji (forage 2).

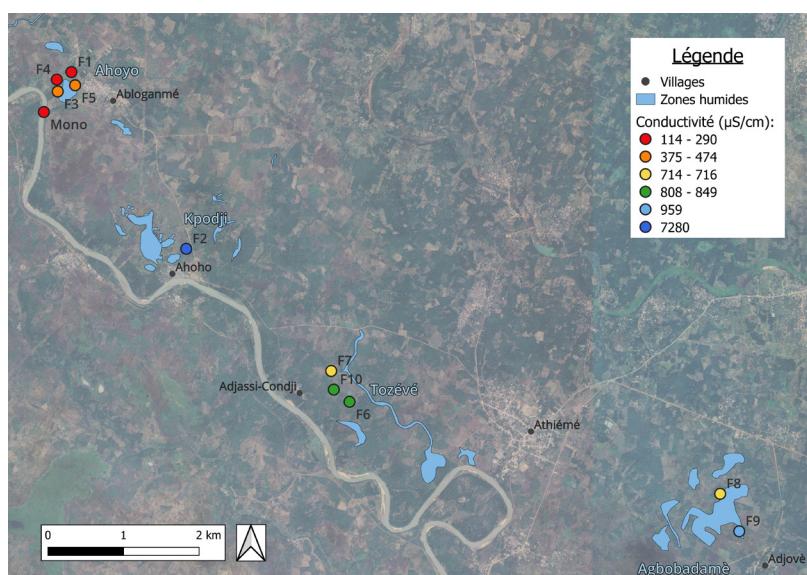
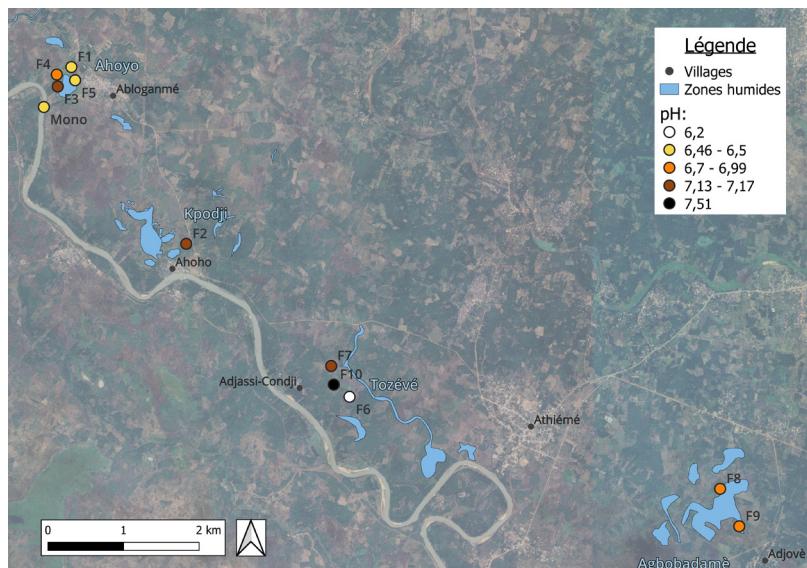


Figure 55: Distribution spatiale de la conductivité

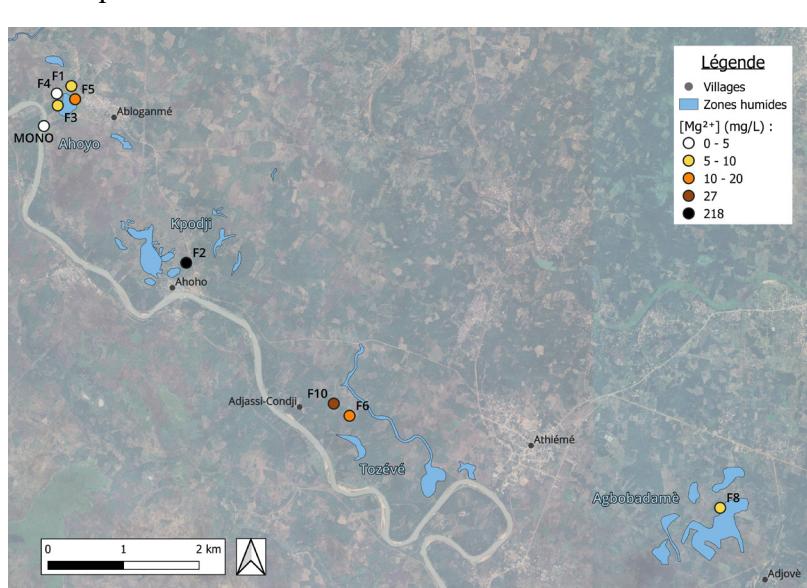
Analyse chimique de l'eau

Les valeurs de pH varient entre 6,2 et 7,51 (Figure 56). Les forages provenant de la zone de Tozévé montrent des valeurs de pH relativement dispersées : 6,2 (F6), 7,13 (F7) et 7,51 (F10). Une légère dispersion est également mesurée à Ahoyo où les pH sont compris entre 6,46 et 7,17. À Agbabadamè, les deux forages présentent des pH proches l'un de l'autre et correspondent à des valeurs intermédiaires par rapport à l'ensemble du jeu de données. Un pH légèrement basique est mesuré à Kpodji.



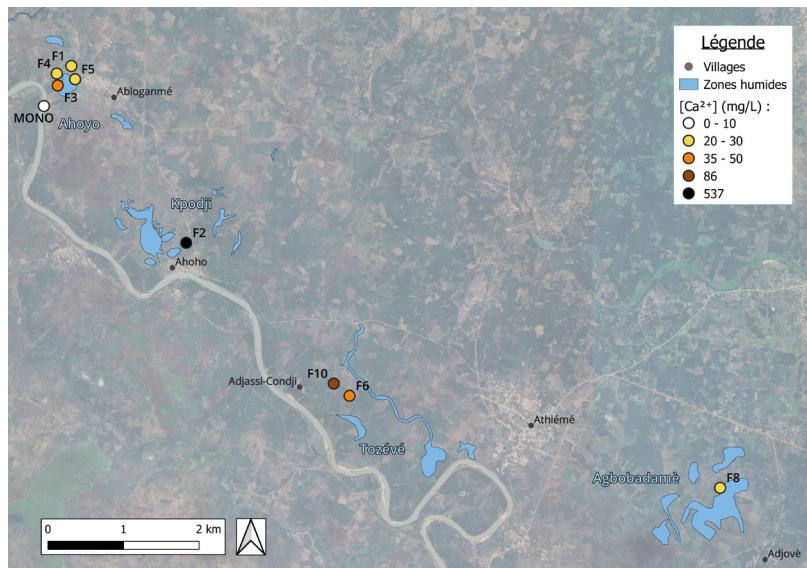
5.7.2. Concentrations ioniques

La distribution spatiale du magnésium sur la Figure 57, similaire à celle des bicarbonates, met en évidence des concentrations plus faibles au sein de la zone humide d'Ahoyo (4 à 14mg/L) et d'Agbabadamè (10mg/L). Le forage de la zone de Kpodji indique une concentration nettement plus élevée que celles observées dans les autres zones.

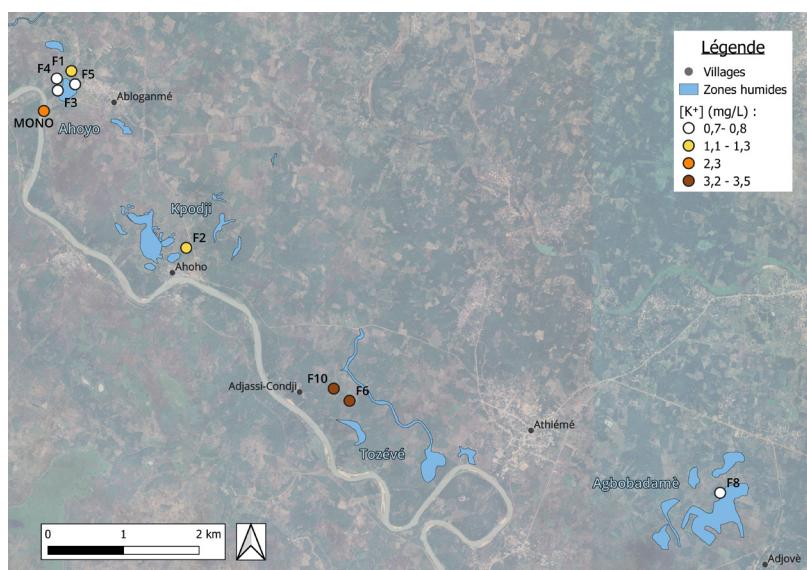


Analyse chimique de l'eau

La distribution spatiale du calcium est présentée dans la Figure 58. Cet élément est corrélé au magnésium ($r = 0.7$) et suit donc une répartition similaire à l'exception du forage 3 d'Ahoyo, où la concentration est nettement plus élevée que dans les autres forages de cette zone. De plus, les sulfates (Annexe 9.13) présentent une distribution spatiale identique à celle du calcium, ces éléments étant fortement corrélés ($r = 0.85$).



Les concentrations en potassium les plus faibles proviennent des zones d'Ahoyo et d'Agbogbadamé, tandis que les plus élevées se situent à Tozévé (Figure 59). Le forage 2, présentant pour une majorité des éléments des concentrations particulièrement élevées, affiche une teneur en potassium relativement faible. Par ailleurs, les eaux provenant du fleuve montrent une concentration en potassium supérieure à celle retrouvée dans les eaux des zones d'Ahoyo, Kpodji et Agbogbadamé.



Analyse chimique de l'eau

Les chlorures présentent, sur la Figure 60, une répartition très proche à celle du sodium, disponible en Annexe 9.13. Les concentrations les plus faibles proviennent de la zone d'Ahoyo. Celles de Tozévé sont relativement homogènes entre elles et sont inférieures à celles mesurées dans l'échantillon d'Agbabadamè. Finalement, une concentration extrêmement élevée est observée à Kpodji, nettement supérieure à l'ensemble des autres valeurs mesurées.

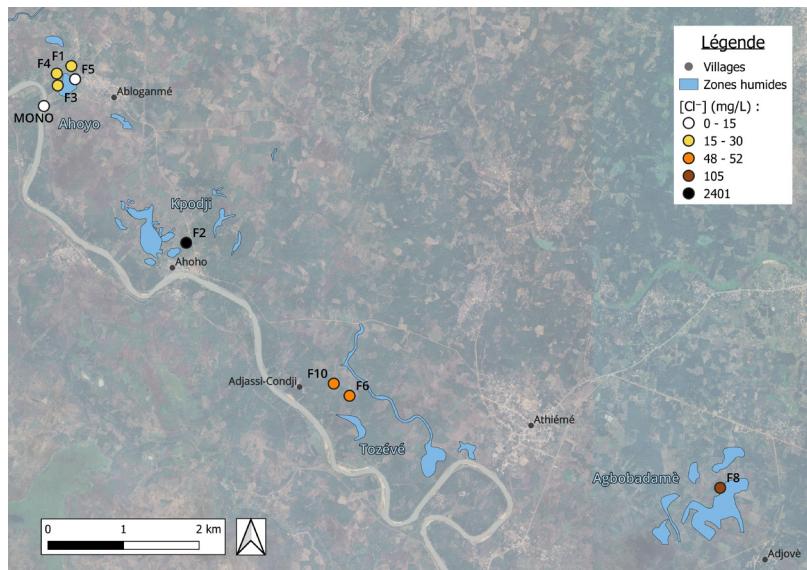


Figure 60 : Distribution spatiale des concentrations en chlorures

Des traces de nitrates n'ont été détectées que dans quatre échantillons, comme visible dans la Figure 61. Des très faibles concentrations ont été mesurées dans l'un des deux forages de Tozévé et un forage profond d'Ahoyo. Des teneurs plus élevées ont été relevées dans le forage superficiel de ce dernier site. Enfin, les concentrations les plus importantes ont été détectées dans le forage provenant de l'échantillon de Kpodji.

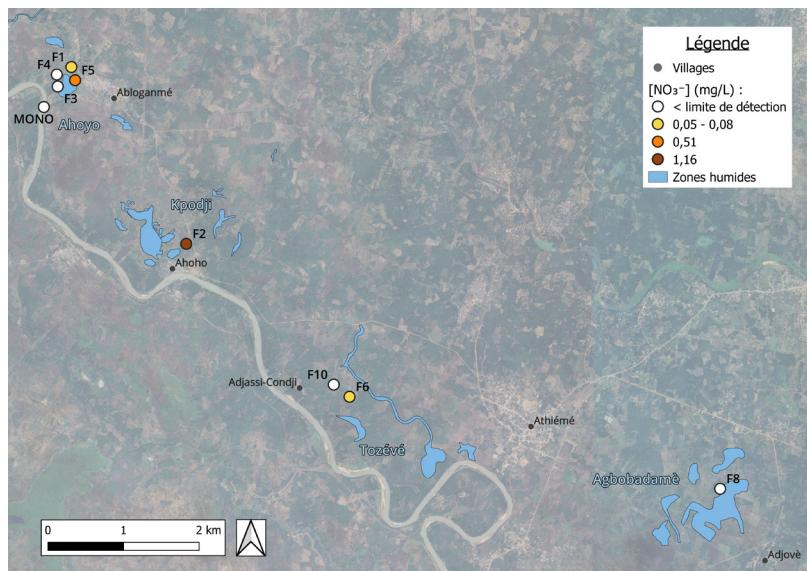


Figure 61 : Distribution spatiale des concentrations en nitrates

5.8. Aptitude à l'irrigation

Grâce aux analyses chimiques des eaux souterraines, il est possible d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. En effet, certaines caractéristiques hydrochimiques, telles que la salinité ou les concentrations en certains ions, peuvent avoir des effets néfastes sur les cultures. Une utilisation prolongée d'eaux inadaptées peut ainsi compromettre, à terme, la durabilité des systèmes d'exploitation agricoles (Gouaidia *et al.*, 2012).

5.8.1. Indices utilisés

Afin d'évaluer cette aptitude, plusieurs indices peuvent être calculés et être interprétés à l'aide de seuils définissant différents niveaux d'aptitude à l'irrigation.

Le **Sodium Absorption Ratio (SAR)** est un indice, exprimé en méq/L, qui permet d'estimer le *risque d'alcalinisation* des sols lié à l'utilisation d'eaux d'irrigation riches en sodium. Un SAR élevé favorise la dispersion des particules argileuses, ce qui peut dégrader la structure du sol, diminuer ses capacités à l'infiltration et l'aération (Jasmin & Mallikarjuna, 2015). Il est défini par la formule (Richards, 1954) :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Tableau 18 : Evaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le SAR (Richards, 1954)

Classe	SAR (méq/L)	Aptitude pour l'irrigation
S1	< 10	Faible danger d'alcalinisation
S2	10 – 18	Danger d'alcalinisation assez appréciable
S3	18 – 26	Danger d'alcalinisation élevé
S4	> 26	Danger d'alcalinisation très élevé

Le *risque de salinité* est lié à l'accumulation de sels dans la zone racinaire, ce qui limite l'absorption de l'eau par les plantes et réduit leur croissance (Jasmin & Mallikarjuna, 2015). Ce risque est évalué à partir de la **conductivité électrique** qui reflète la concentration en ions dissous dans l'eau (Richards, 1954).

Tableau 19 : Evaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le risque de salinité (Richards, 1954)

Classe	CE (µS /cm)	Aptitude pour l'irrigation
C1	< 250	Faible risque de salinité
C2	250 - 750	Risque de salinité moyen
C3	750 - 2250	Risque de salinité élevé
C4	2250 - 5000	Risque de salinité très élevé

Le **pourcentage de sodium** (%Na) est un autre indicateur du *risque d'alcalinisation*. Il se calcule selon la formule suivante, où les concentrations sont exprimées en méq/L (Wilcox, 1955) :

$$Na \% = \frac{[Na^+] + [K^+]}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+]} \times 100$$

Analyse chimique de l'eau

Tableau 20 : Evaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le pourcentage de sodium (Wilcox, 1955)

Na %	Aptitude pour l'irrigation
< 20	Eau excellente
20 - 40	Eau bonne
40 - 80	Eau admissible
> 80	Eau médiocre

Le **Residual Sodium Carbonate** (RSC) est un indice exprimé en méq/L qui permet également d'évaluer le *risque de salinisation et de sodisation* des sols. Lorsque les eaux contiennent une forte concentration en carbonates et bicarbonates, ces ions tendent à précipiter le calcium et le magnésium sous forme de carbonates. Il en résulte une augmentation relative de la proportion de sodium, ce qui diminue la perméabilité du sol (Richards, 1954 ; Gouaidia *et al.*, 2012). Il est calculé selon l'expression suivante (Eaton, 1950) :

$$RSC = ([CO_3^-] + [HCO_3^-]) - ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])$$

Tableau 21 : Evaluation de l'aptitude à l'irrigation selon le RSC (Eaton, 1950)

RSC (méq/L)	Aptitude pour l'irrigation
< 1.25	Eau bonne
1.25 – 2.5	Eau admissible
> 2.5	Eau médiocre

5.8.2. Résultats

L'ensemble des résultats des indices obtenus se trouvent dans l'Annexe 9.14.

Afin de classer l'aptitude à l'irrigation des eaux échantillonnées, une représentation graphique à l'aide des diagrammes de Riverside et de Wilcox est réalisée ci-dessous.

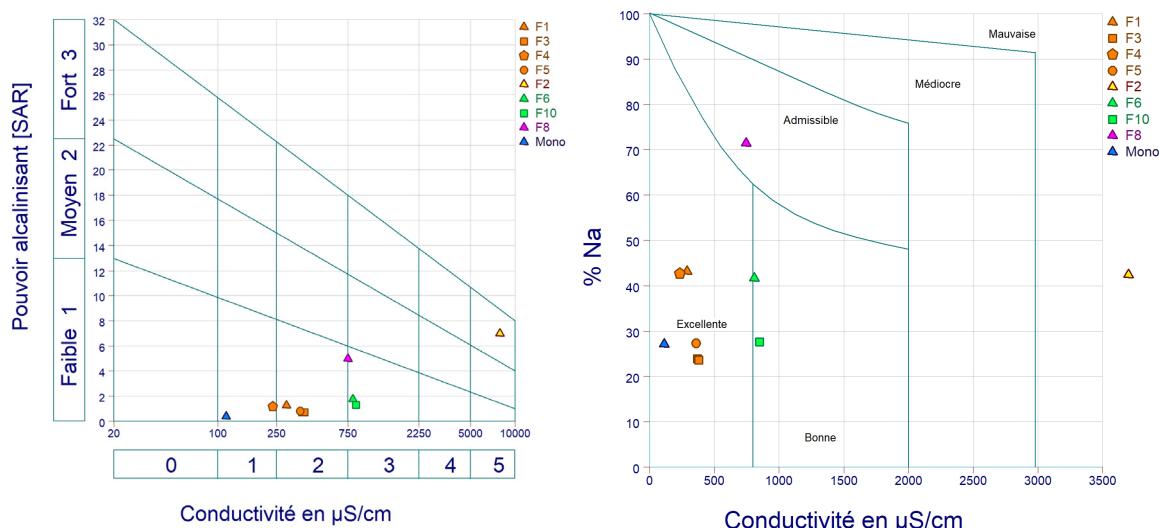


Figure 62 : Diagramme de Riverside (à gauche) et Wilcox (à droite) où les forages représentés en orange proviennent de la zone humide d'Ahoyo, en jaune de Kpodji, en vert de Tozévé et en mauve d'Agbabadamé

Analyse chimique de l'eau

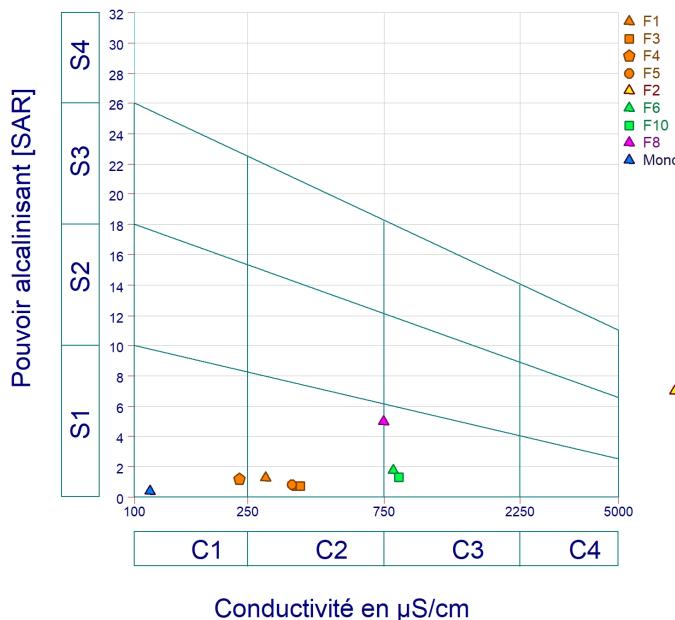


Figure 63 : Diagramme de Wilcox log où les forages représentés en orange proviennent de la zone humide d'Ahoyo, en jaune de Kpodji, en vert de Tozévé et en mauve d'Agbabadamè

Le diagramme de Wilcox log, présenté dans la Figure 63, combine les approches des diagrammes de Riverside et Wilcox (Figure 62). Sur base des résultats obtenus, les échantillons ont été classés en fonction de leur qualité pour l'irrigation selon la classification de Wilcox (Annexe 9.15). Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 22.

Tableau 22 : Classification de la qualité des eaux pour l'irrigation des échantillons selon Wilcox

Echantillon	Classe	Qualité	Etat d'utilisation
Mono F4 - Ahoyo	C1-S1	Excellent	Eau d' excellente qualité pour l'irrigation et ne présente aucun risque pour les cultures et les sols
F1 - Ahoyo F3 - Ahoyo F5 - Ahoyo	C2-S1 C2-S2	Bonne	Eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels
F8 - Agbabadamè F6 - Tozévé F10 - Tozévé	C3-S1 C3-S2 C2-S3	Admissible	Eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité dont la salinité doit être contrôlée
F2 - Kpodji	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Mauvaise	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions (sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel)

Les eaux de meilleures qualités, classées comme excellentes et bonnes selon la classification de Wilcox, se trouvent toutes au sein de la zone humide d'Ahoyo. Cette analyse est confirmée par le diagramme de Wilcox (Figure 62). Les valeurs de RSC calculées sont également toutes inférieures à 1.25, classant l'eau comme bonne selon Eaton. Celles-ci ne présentent donc aucun risque d'alcalisation. De plus, les eaux prélevées dans le fleuve Mono sont également d'excellente qualité pour l'irrigation.

Les eaux souterraines provenant des zones d'Agbabadamè et de Tozévé sont classées comme admissibles selon Wilcox en raison de leur conductivité légèrement plus élevée.

Les eaux du forage 8 (Agbabadamè) sont marquées par un SAR et un %Na plus élevés en raison de leur forte teneur en sodium. Celles-ci ont un RSC d'une valeur de 1.66, classant l'eau comme admissible selon Eaton.

Analyse chimique de l'eau

Les eaux de la zone de Tozévé se différencient entre elles en raison de la teneur en calcium plus élevée dans le forage 10, diminuant ainsi les valeurs des indices SAR et %Na calculés et par conséquent le risque l'alcalinisation.

Finalement, les eaux de la zone de Kpodji présentent une mauvaise qualité et ne sont pas recommandées pour l'irrigation. Seul l'indice RSC, dont la valeur négative indique théoriquement une bonne qualité selon Eaton, diverge de cette conclusion. Cette valeur s'explique toutefois par la faible teneur en carbonates et bicarbonates par rapport au calcium et au magnésium, et ne reflète donc pas le risque réel.

La qualité des eaux d'irrigation peut également être évaluée à l'aide des recommandations proposées par la FAO² (Ayers & Westcot, 1994). Ces lignes directrices, présentées dans l'Annexe 9.16, sont issues des *Water Quality Guidelines* du *Committee of Consultants* de l'Université de Californie (1974), élaborées en collaboration avec le personnel du *United States Salinity Laboratory*.

Cette approche repose sur l'identification de quatre grandes catégories de problèmes susceptibles d'affecter la production agricole : la salinité, les problèmes d'infiltration³, la toxicité spécifique de certains ions ; et divers autres effets secondaires.

Cette évaluation consiste à interpréter les résultats de certaines analyses physico-chimiques en les comparant aux seuils proposés, afin de classer chaque paramètre dans l'une des trois catégories : aucune restriction, restriction modérée ou restriction sévère.

En règle générale, l'utilisation d'une eau dont les paramètres demeurent sous les seuils de la catégorie « aucune restriction » ne présente pas de risque notable pour les sols ou les cultures. Dans le cas de restrictions légères à modérées, des précautions sont nécessaires, notamment dans le choix des cultures et la gestion de l'irrigation, afin de limiter les pertes de rendement. En revanche, des restrictions sévères impliquent un risque élevé de dégradation des sols et de baisse de productivité, excepté dans des conditions très particulières (sols bien drainés, cultures très tolérantes, bonnes pratiques de lessivage).

Les résultats, disponibles dans le Tableau 23, confirment les résultats obtenus précédemment :

- Zone humide d'*Ahoyo* : les eaux ne nécessitent aucune restriction pour la majorité des facteurs évalués. Seul le taux d'infiltration présente une restriction légère à modérée en raison de la faible salinité, limitant ce dernier.
- Zone humide d'*Agbabadamè* : les eaux ne montrent pas de risque de toxicité lié aux chlorures ou au bore. Toutefois, une vigilance est requise en raison d'une salinité modérée, d'une teneur notable en sodium et d'un taux d'infiltration réduit, attribuable à un SAR légèrement élevé.
- Zone humide de *Kpodji* : une restriction sévère est observée en raison d'une forte salinité. Une restriction légère à modérée est associée à la toxicité du sodium et des chlorures. Il est cependant important de noter que selon les directives de la FAO (Annexe 9.16), dans le cadre d'irrigation par aspersion (méthode principalement utilisée

² Food and Agriculture Organization of the United Nations

³ Le taux d'infiltration tend à augmenter avec la salinité de l'eau et à diminuer avec un SAR élevé

Analyse chimique de l'eau

dans cette région), la classification de la toxicité des sodiums et des chlorures ne permet de conclure qu'à une absence ou à une restriction légère. Aucun seuil n'est spécifié pour identifier une restriction sévère dans ce contexte. Néanmoins, étant donné les concentrations particulièrement élevées de ces éléments, leurs effets toxiques potentiels ne peuvent être négligés. Le taux d'infiltration (théoriquement favorable du fait de la salinité très élevée), la teneur en bore et le pH ne présentent pas de problème majeur.

- Zone humide de *Tozévé* : les eaux ne présentent pas de restrictions concernant l'infiltration, le pH ou la toxicité ionique. Cependant, la salinité élevée entraîne une restriction légère à modérée.
- Fleuve *Mono* : les eaux ne présentent aucune restriction liée à la salinité ni à la toxicité ionique. En revanche, un faible taux d'infiltration, attribuable à la faible salinité, conduit à une restriction sévère.

Tableau 23 : Classification de la qualité des eaux pour l'irrigation des échantillons selon la FAO

Localisation	Problème potentiel	Aucune restriction	Restriction légère à modérée	Restriction sévère
Ahoyo	Salinité	F1 – F3 – F4 – F5		
	Infiltration		F1 – F3 – F4 – F5	
	Toxicité : sodium	F1 – F3 – F4 – F5		/
	Toxicité : chlorures	F1 – F3 – F4 – F5		/
	Toxicité : bore	F1 – F3 – F4 – F5		
	Effets divers : pH	F3 – F4 – F5	F1	
Agbabadamè	Salinité		F8	
	Infiltration		F8	
	Toxicité : sodium		F8	/
	Toxicité : chlorures	F8		/
	Toxicité : bore	F8		
	Effets divers : pH	F8		
Kpodji	Salinité			F2
	Infiltration	F2		
	Toxicité : sodium		F2	/
	Toxicité : chlorures		F2	/
	Toxicité : bore	F2		
	Effets divers : pH	F2		
Tozévé	Salinité		F6 – F10	
	Infiltration	F6 – F10		
	Toxicité : sodium	F6 – F10		/
	Toxicité : chlorures	F6 – F10		/
	Toxicité : bore	F6 – F10		
	Effets divers : pH	F6 – F10		
Mono	Salinité	Mono		
	Infiltration			Mono
	Toxicité : sodium	Mono		/
	Toxicité : chlorures	Mono		/
	Toxicité : bore	Mono		
	Effets divers : pH		Mono	

6. Discussion générale

Ce chapitre a pour objectif de discuter de l'ensemble des résultats obtenus permettant de répondre à la problématique de durabilité de l'exploitation des eaux souterraines dans la plaine alluviale du Mono.

Tout d'abord, les études menées dans le chapitre 3.1 ont révélés une forte hétérogénéité des lithologies dans la plaine alluviale du Mono, en lien avec la nature même des dépôts alluviaux.

La forte hétérogénéité des lithologies et, par conséquent, de l'aquifère en lui-même, complique la planification de futurs ouvrages. En l'absence de connaissances lithologiques suffisantes, il est difficile d'anticiper la présence d'une couche aquifère exploitable. Cette incertitude a déjà conduit à des échecs : certains forages ont été réalisés sans succès, faute d'atteindre une couche sableuse suffisamment productive, et ont finalement été abandonnés sans être équipés.

Cette hétérogénéité implique l'existence de plusieurs couches sableuses exploitables, sans nécessairement qu'il y ait de connexion hydraulique entre elles. Par exemple, le second essai de pompage de longue durée, réalisé dans la zone humide d'Ahoyo, a mis en évidence une probable absence de connexion entre la couche exploitée par un forage privé superficiel et celle exploitée par un forage plus profond situé à moins de 150 mètres de là. À l'inverse, dans cette même zone, une couche sableuse située à environ trente mètres de profondeur est exploitée par deux forages dont l'interconnexion a pu être démontrée lors du premier essai de pompage de longue durée. Un rabattement de 30 centimètres a été enregistré dans le puits situé à 250 mètres du puits de pompage.

Les résultats de l'interprétation du premier essai de longue durée ont permis d'estimer le rayon d'influence du pompage à 730 mètres, indiquant que l'effet d'un forage peut se faire ressentir à une distance significative. Ainsi, la multiplication de forages à proximité d'une même zone humide pourrait entraîner des interférences notables. Ce risque est d'autant plus important que les forages sont principalement sollicités durant une période bien précise de l'année, caractérisée par une forte demande en irrigation et une absence de précipitations. Tous les producteurs mobilisent donc la ressource en même temps, concentrant les pompages sur une courte période. Dans ce contexte, continuer à augmenter le nombre de forages exploitant la même nappe pourrait compromettre sa durabilité.

Les analyses des essais de courte durée indiquent une conductivité hydraulique plus importante dans la couche sableuse superficielle. Toutefois, celle-ci présente un temps de retour au niveau initial plus long à la suite d'une sollicitation, suggérant une recharge plus lente. Une intensification de l'exploitation de ces forages superficiels donc pourrait compromettre leur durabilité.

L'analyse des relevés piézométriques mensuels depuis un peu plus de quatre ans montre qu'aucun des forages étudiés ne présente, pour l'instant, de baisse notable de niveau liée aux pompages réalisés. Ce constat reste toutefois à nuancer, la période d'observation étant relativement courte. Il est donc essentiel de maintenir ce suivi dans le temps afin de détecter rapidement l'éventuelle apparition d'une tendance à la baisse, indicatrice d'une surexploitation de la ressource.

Discussion générale

L'étude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans la zone humide suggère une déconnexion entre celles-ci, malgré des variations de niveaux qui, sur une année, semblent se produire de manière simultanée. En effet, la zone humide apparaît comme perchée avec un niveau d'eau non gouverné par celui de la nappe. Dans ces conditions, une exploitation des eaux souterraines ne représenterait pas, à priori, une menace directe pour la préservation de la ressource en eau de la zone humide.

La stabilité des paramètres physico-chimiques observée lors des essais de pompage de courte durée semble indiquer l'absence d'une intrusion d'eaux issues du fleuve ou présentant un faciès hydrochimique distinct. Cependant, cette conclusion doit être prise avec précaution, compte tenu de la durée limitée des essais. Des investigations complémentaires, menées sur des pompages de plus longue durée, seraient nécessaires pour confirmer cette hypothèse. Néanmoins, les données disponibles laissent penser que la qualité de l'eau reste globalement stable sur une période représentative des usages en irrigation.

L'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation a été évaluée à l'aide de deux approches : la classification de Wilcox et les recommandations de la FAO. Les deux méthodes aboutissent à des conclusions similaires, soulignant la mauvaise qualité de l'eau provenant du forage à proximité de la zone humide de Kpodji. Elle se caractérise par une forte minéralisation et une teneur en chlorures particulièrement élevée, ce qui suggère une possible pollution ponctuelle. Il est donc recommandé de réaliser une nouvelle analyse, après un pompage de plus longue durée, afin de déterminer si ce faciès chimique est représentatif de la nappe à une échelle plus large dans cette zone.

Les analyses des distributions spatiales des conductivités et des concentrations en chlorures suggèrent une augmentation de celles-ci du Nord vers le Sud, en ne considérant pas l'outlier. Une hypothèse serait donc que celle-ci résulte d'intrusions salées passées. Cependant, ces investigations supplémentaires sont nécessaires afin de confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Au vu des éléments présentés, il est possible de conclure que l'exploitation de la nappe dans la plaine alluviale du fleuve Mono est envisageable pour répondre aux besoins d'irrigation des cultures. En effet, les débits disponibles semblent suffisants pour cet usage. Bien que cette exploitation soit récente, aucune baisse significative du niveau piézométrique liée aux pompages n'a encore été observée. Cependant, un suivi régulier demeure nécessaire pour détecter rapidement toute tendance à la diminution des niveaux à l'avenir. Par ailleurs, la qualité des eaux paraît adaptée à l'irrigation, à l'exception d'un point probablement marqué par une pollution ponctuelle qui nécessite une investigation plus approfondie. Pour prévenir d'éventuels problèmes liés à des contaminations locales, il est recommandé de procéder à une analyse chimique de l'eau avant toute mise en exploitation d'un nouveau puits. Sur le terrain, une analyse chimique complète peut s'avérer difficile. Une mesure de la conductivité électrique, reflétant la salinité, constituerait déjà un bon indicateur de la qualité de l'eau. Enfin, l'établissement d'un bilan hydrique sur chaque zone, évaluant quantitativement les entrées et sorties du système, aiderait à améliorer la compréhension du fonctionnement de l'aquifère et à gérer durablement les ressources en eaux souterraines.

7. Conclusion

En raison des impacts croissants du réchauffement climatique sur les saisons de pluies, les producteurs de la plaine alluviale du fleuve Mono ont de plus en plus recours à l'irrigation afin de garantir de bons rendements agricoles. Une solution efficace consiste à utiliser les eaux souterraines, disponibles en continu et moins dépendantes des conditions climatiques immédiates. Face à l'intensification de l'utilisation de cette ressource, il est donc primordial d'en améliorer les connaissances afin de garantir une exploitation durable.

Ce TFE avait pour objectif de présenter une caractérisation des eaux souterraines de la région et d'évaluer la durabilité de leur exploitation. Pour ce faire, une présentation détaillée des sites étudiés a été réalisée, suivie d'une analyse du suivi piézométrique mené par *Join For Water* et d'une étude des liens des niveaux piézométriques avec les niveaux d'eau de surface et les paramètres météorologiques. Ensuite, les caractéristiques de l'aquifère et des eaux souterraines ont été évaluées à partir de l'interprétation d'essais de pompages et d'analyses physico-chimiques de 10 échantillons d'eau. Enfin, une discussion générale des résultats obtenus a tenté de répondre à la problématique de durabilité de l'exploitation des eaux souterraines dans la plaine alluviale du Mono.

L'étude des sites analysés révèle une forte hétérogénéité locale des lithologies, liée au contexte géologique caractéristique des plaines alluviales. Celles-ci présentent d'épaisses couches argilo-limoneuses surplombant une couche sableuse productive. Les interactions entre les eaux souterraines, les zones humides et le fleuve Mono ont été explorées au sein des secteurs d'Ahoyo et d'Agbabadamè. Toutefois, les données disponibles ne permettent pas de les caractériser de manière fiable. Il apparaît cependant que la zone humide d'Ahoyo semble perchée, avec un niveau d'eau indépendant de celui de la nappe. Un suivi piézométrique débuté en 2021 a mis en évidence une baisse des niveaux de janvier à avril, correspondant à la saison sèche et à la période d'irrigation. Par après, les niveaux avaient tendance à retrouver leur état initial. Leur rétablissement est favorisé par la recharge due aux précipitations dont l'effet est légèrement différé dans le temps, probablement en raison de l'épaisseur des couches peu perméables traversées avant d'atteindre la nappe. Enfin, les niveaux d'un forage superficiel à proximité de la zone humide d'Ahoyo présentent, durant l'année pour laquelle les données étaient disponibles, une importante corrélation avec l'évolution des niveaux d'eau de surface.

Les essais de pompage de courte durée ont montré une grande variabilité des rabattements induits et des temps de retour au niveau initial, témoignant de l'hétérogénéité de l'aquifère. Les essais de longue durée ont quant à eux permis de quantifier les paramètres hydrauliques de l'aquifère, avec des valeurs de conductivité hydraulique cohérentes entre elles et un coefficient d'emmagasinement typique d'une nappe captive. Par ailleurs, ces essais n'ont pas permis de confirmer l'existence d'une connexion hydraulique entre les couches sableuses profondes et superficielles.

La stabilité des paramètres physico-chimiques mesurée au cours des pompages de courte durée suggère l'absence d'une intrusion d'eau du fleuve ou d'eau possédant un faciès hydrochimique distinct.

Conclusion

Les analyses chimiques ont révélé une diversité marquée dans la composition chimique des échantillons analysés. Un outlier, caractérisé par des concentrations très élevées en chlorures, a été identifié et exclu des analyses multivariées. L'hypothèse d'une pollution locale a été avancée afin d'expliquer cette anomalie. L'étude des coefficients de corrélation suggère une augmentation du pH et une diminution des contaminations anthropiques avec la profondeur des forages. L'utilisation de matrices auto-organisantes (SOM) a permis de regrouper les échantillons en trois catégories présentant des faciès hydrochimiques similaires. Cette classification a mis en lumière une homogénéité des eaux au sein de la zone humide d'Ahoyo, contrairement à la variabilité observée au sein de la zone humide de Tozévé.

L'aptitude à l'irrigation des eaux a été évaluée à l'aide des diagrammes de Wilcox et Riverside, ainsi que des recommandations de la FAO. Les résultats indiquent une qualité excellente pour les eaux du fleuve et de la zone humide d'Ahoyo, une qualité admissible pour les zones d'Agbobadamè et Tozévé et une mauvaise qualité des eaux dans la zone de Kpodji, rendant celles-ci non recommandées pour l'irrigation.

Enfin, une discussion générale a permis de mettre en perspective l'ensemble des résultats obtenus afin d'évaluer la durabilité de l'exploitation des eaux souterraines. Il en ressort que celle-ci est envisageable, sous certaines conditions. Les principales limites identifiées ainsi que les recommandations pour une gestion future durable sont détaillées dans cette dernière section.

Ce travail comprenait cependant certaines limites.

Tout d'abord, une étude précise des différentes zones humides n'a pas été possible en raison de l'incertitude associée aux données disponibles. Les données topographiques entre les sites étudiés et le fleuve n'avaient qu'une précision de 30 mètres et les mesures des niveaux d'eau du fleuve proviennent d'une station hydrométrique parfois distante des zones étudiées. Afin de pouvoir décrire de manière plus fiable les éventuels échanges entre les eaux souterraines et le fleuve, des données topographiques plus précises sont donc nécessaires.

Le faible nombre de forages disposant de données lithologiques n'a pas permis de caractériser correctement la continuité de l'aquifère. La forte hétérogénéité des lithologies et l'espacement important entre les forages rendent toute conclusion difficile. Une meilleure connaissance lithologique, via une densification du réseau de puits à proximité des zones humides, améliorerait cette compréhension.

Concernant les analyses chimiques, il serait pertinent de procéder à une nouvelle campagne d'échantillonnage dans la zone humide de Kpodji, idéalement à la suite d'un pompage de plus longue durée. Cela permettrait de vérifier si les fortes concentrations en chlorures observées lors de la première analyse relèvent d'un épisode de pollution ponctuelle ou d'un faciès représentatif des eaux de la zone. L'exploitation d'une eau avec un faciès similaire à celui échantillonné est inadaptée pour l'irrigation des cultures. Cette analyse est donc nécessaire afin d'envisager la poursuite de l'exploitation.

8. Bibliographie

Achidi, J.B., Houngbedji, N., Sintondji, L.O. & Vilmus, T., 2010. *Mise en place d'un dispositif de protection des zones de captage d'eau potable.* https://www.pseau.org/outils/ouvrages/mineau_bj_guide_protection_perimetre_captage.pdf. Consulté le 18/03/2025.

Ago, E. E., Petit, F., & Ozer, P., 2005. Analyse des inondations en aval du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono (Togo et au Bénin). *Geo-Eco-Trop : Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, 29, 1 – 14. https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_291_01.pdf. Consulté le 02/06/2025.

Agossou, A., Yang, J.S., Lee, J.B., 2022. Evaluation of Potential Seawater Intrusion in the Coastal Aquifers System of Benin and Effect of Countermeasures Considering Future Sea Level Rise. *Water*, 14, 4001. <https://doi.org/10.3390/w14244001>

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements. In *FAO Irrigation and drainage Paper 56*. Rome. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>. Consulté le 02/06/2025.

Amoussou, E., 2010. *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de doctorat en Géographie – Spécialité : Géographie physique appliquée, Paris, Université de Bourgogne, 315 p. <https://theses.hal.science/tel-00493898v2>. Consulté le 07/04/2025.

Ayers, S.D. & Westcot, C.W., 1994. Water Quality for Agriculture. In *FAO Irrigation and Drainage Paper 29*. Rome. <https://www.fao.org/4/t0234e/t0234e00.htm>. Consulté le 22/05/2025.

Bamford, S. E., Gardner, W., Ballabio, D., Oslinker, B., Winkler, D. A., Muir, B. W., & Pigram, P. J., 2025. A comprehensive tutorial on the SOM-RPM toolbox for MATLAB. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 261, 105383. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2025.105383>

Bourguet, L., Paulve, E., Legier, A., Tribouillard, N. & Achidi, J.B, 2012. *Carte Hydrogéologique Du Bassin sédimentaire côtier du Bénin à l'échelle 1 : 200000*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Dassargues, A., 2018. *Hydrogeology: groundwater science and engineering*. Taylor & Francis CRC Press. 458p.

Deutsch, W. J., & Siegel, R., 1997. *Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination*. CRC press.

Dossou, P. M., Zevounou, C., Alassane, A., Kaki, C., Boukari, M., & Mama, D. 2021. Physico-Chemical Characteristics of Gushing Water Aquifers in the Coastal Sedimentary Basin of Benin (West Africa). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9, 149 – 163. <https://doi.org/10.4236/gep.2021.97010>

Bibliographie

Dossou, P. M., Zevounou, C., Alassane, A., Kaki, C., Boukari, M., & Mama, D., 2022. Facteurs de contrôle de l'hydrothermalisme sélectif des aquifères jaillissants du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin, Afrique de l'Ouest. *Afrique SCIENCE*, 21(3), 100 – 113. <https://www.afriquescience.net/admin/postpdfs/c47abcd7125d80c7d06d1e5cb044b2ec1719901567.pdf>. Consulté le 12/03/2025.

Eaton, F.M., 1950. Significance of Carbonates in Irrigation Waters. *Soil Science*, 69, 123 – 134. <https://doi.org/10.1097/00010694-195002000-00004>

Emmanuel, L., Hounguè, N., Biaou, C., & Badou, D., 2019. Statistical analysis of recent and future rainfall and temperature variability in the mono river watershed (Benin, Togo). *Climate*, 7 (1), 8. <https://doi.org/10.3390/cli7010008>

Ezin, V., Kochoni, E. G., & Ahanchede, A., 2018. Agriculture and food security under threat of change climate in Benin. *African Journal of Agricultural Research*, 13(27), 1389 – 1399. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8748>

FAO, 2016. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation est l'agriculture, Rome. 191p. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i6030e>. Consulté le 04/06/2025.

Fetter, C. W., 2001. *Applied hydrogeology*. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 598 p.

Forkasiewicz, J., 1972. *Interprétation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères*. Rapport du B.R.G.M, 2ème édition. Département géologie de l'aménagement hydrogéologie. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/72-SGN-273-AME.pdf>. Consulté le 25/05/2025.

Gbaguidi, F., 2014. Situation de l'irrigation au Benin. In Namara R.E. & Sally H. *Irrigation in West Africa: Current Status and a View to the Future*. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka, 63 – 89. <https://doi.org/10.5337/2014.218>

Géohydraulique, 1985. *Notice explicative de la carte hydrogéologique à l'échelle 1/200 000 du Bassin Sédimentaire Côtier du Benin*. Report, 23p, Direction Générale de l'Hydraulique, Cotonou, Benin.

Glodji, L. A., Alassane, A., Dossou, P. M., Zogo, A., Ahossi, A., & Gbewezoun, V., 2019. Influence de la Réactivation de la Faille de Kandi sur l'artésianisme dans le Bassin Versant du Fleuve Mono au Sud-ouest du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin (Afrique de l'Ouest). *European Scientific Journal ESJ*, 15, 24. <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n24p346>

Gouaidia, L., Guefaifia, O., Boudoukha, A., LaidHemila, M. & Martin, C., 2012. Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). *Physio-Géo*, 6, 141 – 160. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.2632>.

Bibliographie

Gruber, I., Kloos, J., & Schopp, M., 2009. Seasonal water demand in Benin's agriculture. *Journal of Environmental Management*, 90 (1), 196 – 205. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.08.011>

Houessou, A. & Lang, J., 1978. Contribution à l'étude du « Continental terminal » dans le Bénin méridional. *Sciences géologiques, bulletins et mémoires*, 31(4), 137 – 149. https://www.persee.fr/doc/sgeol_0302-2692_1978_num_31_4_1543. Consulté le 02/06/2025.

IRB Institut de Recherche Breda, 1989. *Notice explicative de la carte géologique a 1/200000, Feuille Pira-Save, Abomey-Zagnanado et Lokossa-Porto Novo, mémoire n°3, 1ere édition*, 77 p.

Jasmin, I. & Mallikarjuna, P., 2015. Evaluation of Groundwater Suitability for Irrigation in the Araniar River Basin, South India - A Case Study Using Gis Approach. *Irrigation and Drainage*, 64 (5), 600 – 608. <https://doi.org/10.1002/ird.1930>

Kohonen, T., 1995. Self-Organizing Maps. *Springer Series in Information Sciences*, 30.

Le Barbé, L., Alé, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y. & Gualde, R. 1993. *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*. ORSTOM éditions. Paris, 540 p. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers08-01/39537.pdf. Consulté le 30/04/2025.

MAEP (Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche), 2021. *Rapport de performance du secteur agricole – Gestion 2021*. <https://agriculture.gouv.bj/#>. Consulté le 04/06/2025.

Nakou, R. T., Codo, F. P., Worou, N. C., Sintondji, L O., Alassane, A. & Yalo, N., 2022. Caractérisation des événements pluviométriques extrêmes dans la basse vallée du fleuve Mono au Bénin, *Africa Science*, 21 (5), 177 – 192. <https://www.afriquescience.net/admin/postpdfs/6bdff72bf4a7097d55d69145bd90adef1719973971.pdf>. Consulté le 03/04/2025.

Nakou, T., Senou, L., Elegbede, B., & Codo, F., 2023. Climate variability and its impact on water resources in the lower mono river valley in Benin from 1960 to 2018. *LARHYSS Journal*, 56, 215 – 234. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/13783>. Consulté le 02/04/2025.

Nasa Prediction of Worldwide Energy Resources, 2025. *NASA Power DAV*. <https://power.larc.nasa.gov/> (Consulté le 01/06/2025).

Peeters, L. & Dassargues, A., 2006. Comparison of Kohonen's Self-Organizing Map algorithm and principal component analysis in the exploratory data analysis of a groundwater quality dataset. In *GeoENV2006*.

Richards, L.A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. *US Department of Agriculture Handbook 60*. Washington, 160 pp.

Schlüter, T., 2006. *Geological atlas of Africa*, Vol. 307. Springer. Berlin, 272p. <https://doi.org/10.1007/3-540-29145-8>

Bibliographie

The World Bank Group, 2021. *Climatology Benin*. Climate Change Knowledge Portal. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/benin/climate-data-historical>. Consulté le 05/03/2025.

Thornthwaite, C.W. & J.R. Mather, 1955. The water balance. *Publications in Climatology VIII (1)*. 1 – 104.

Vesanto, J., Himberg, J., Alhoniemi, E., Pearhankangas, J., 1999. Self-organizing map in MATLAB: the SOM Toolbox. *Proceedings of the MATLAB DSP Conference*, 35 –40, Espoo, Finlande.

Volkoff, 1976. *Carte Pédologique de Reconnaissance à 1 : 200,000. Porto-Novo. République Populaire du Bénin.* 1:200000. Cotonou, ORSTOM.

Wilcox, L.V., 1955. Classification and use of irrigation water. *USDA Circular 969*. Washington, 19 p.

9. Annexes

9.1. Carte pédologique de reconnaissance

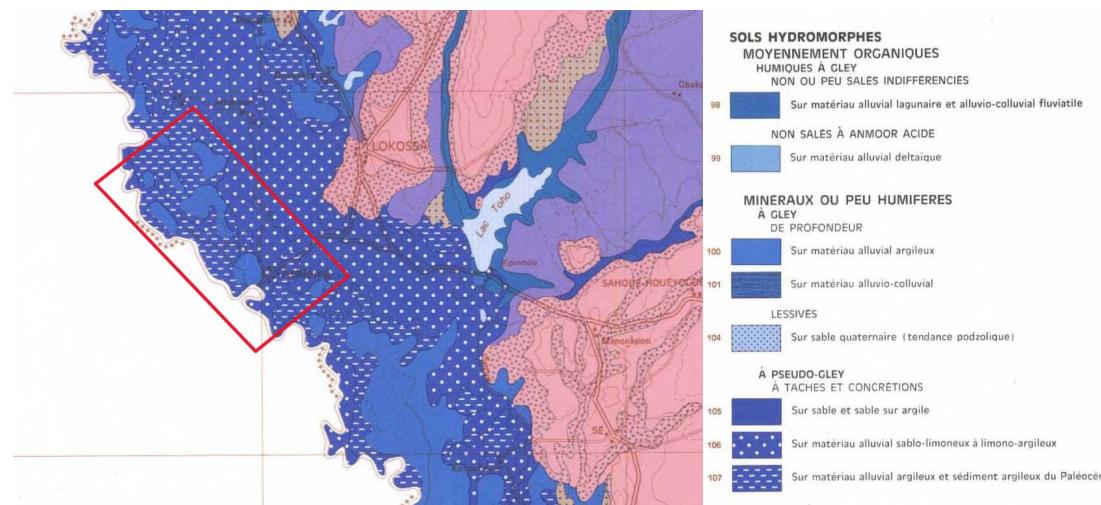


Figure 64 : Carte pédologique de reconnaissance avec la zone étudiée encadrée en rouge (d'après Volkoff, 1976)

9.2. Coupes hydrogéologiques

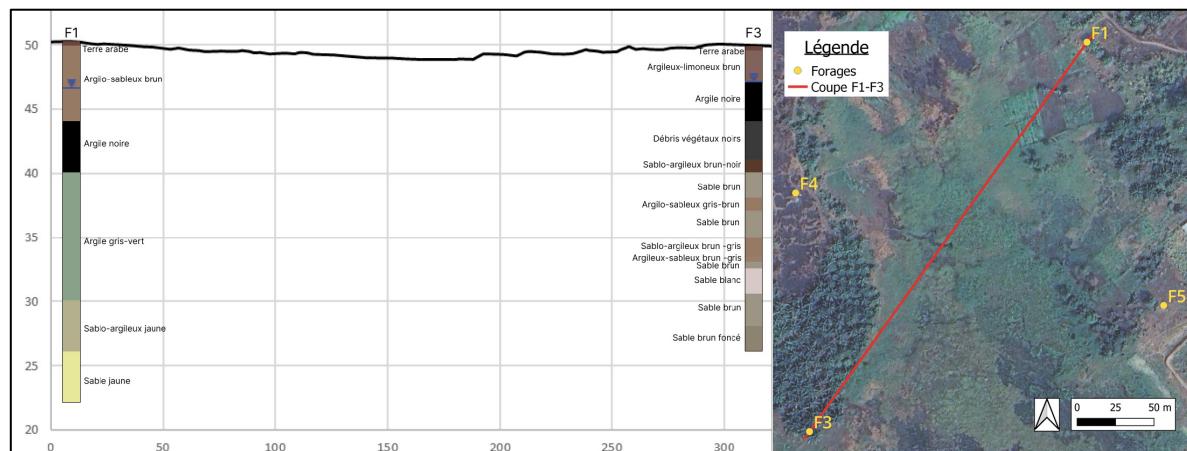


Figure 65 : Coupe hydrogéologique F1-F3

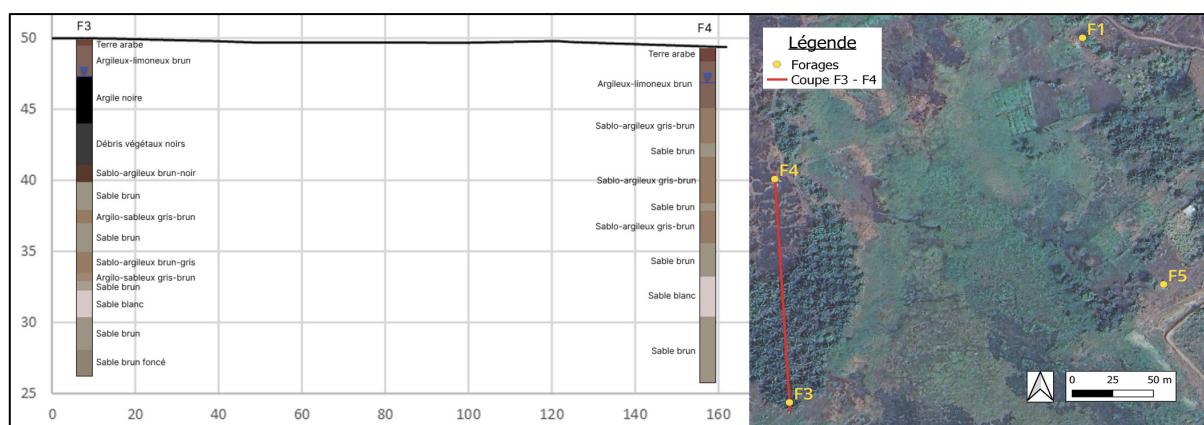


Figure 66 : Coupe hydrogéologique F3-F4

Annexes

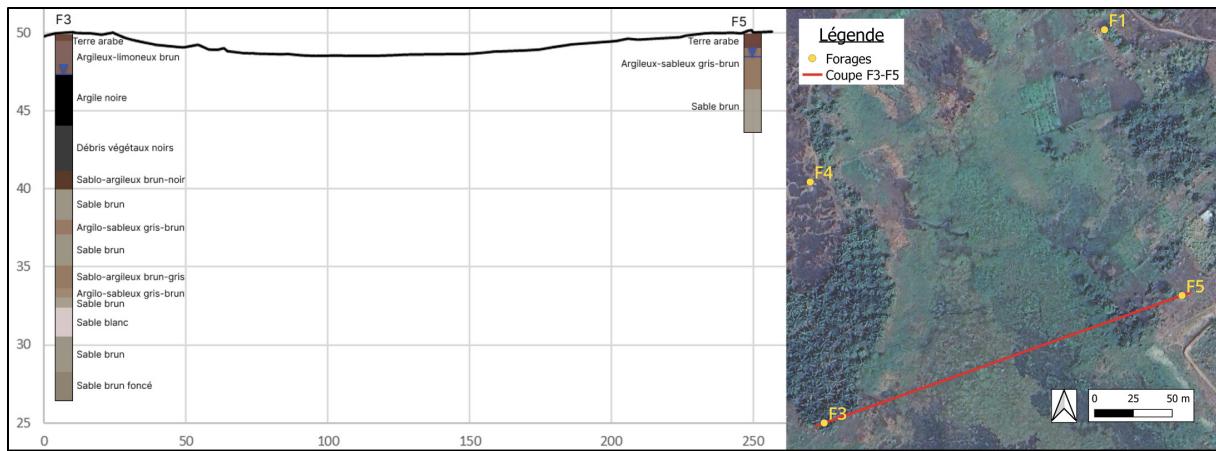


Figure 67 : Coupe hydrogéologique F3-F5

9.3. Monitoring des niveaux piézométrique

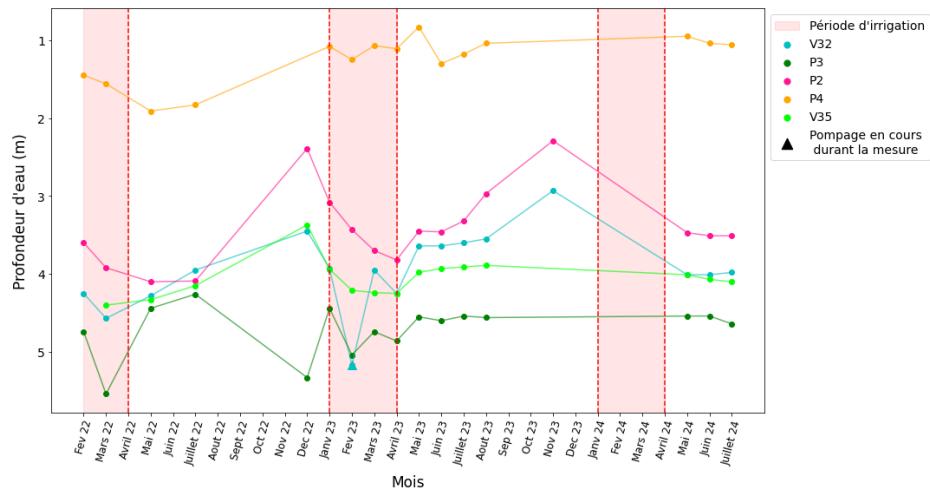


Figure 68 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis février 2022 dans les forages privés (3)

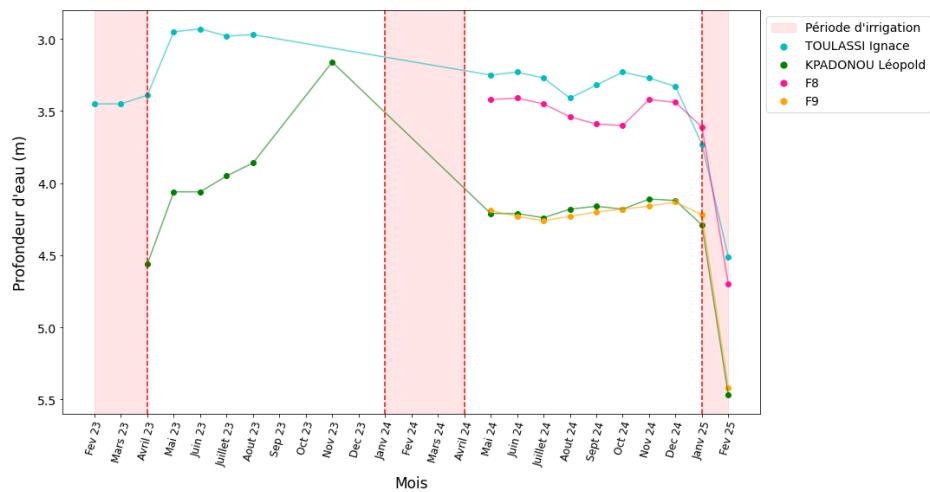


Figure 69 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis février 2023 dans les forages privés et les forages de JFW (4)

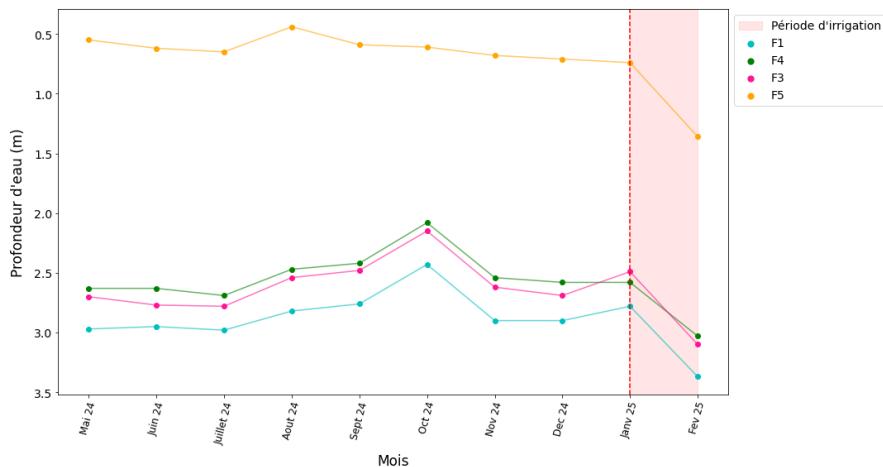


Figure 70 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis mai 2024 dans les forages de JFW (5)

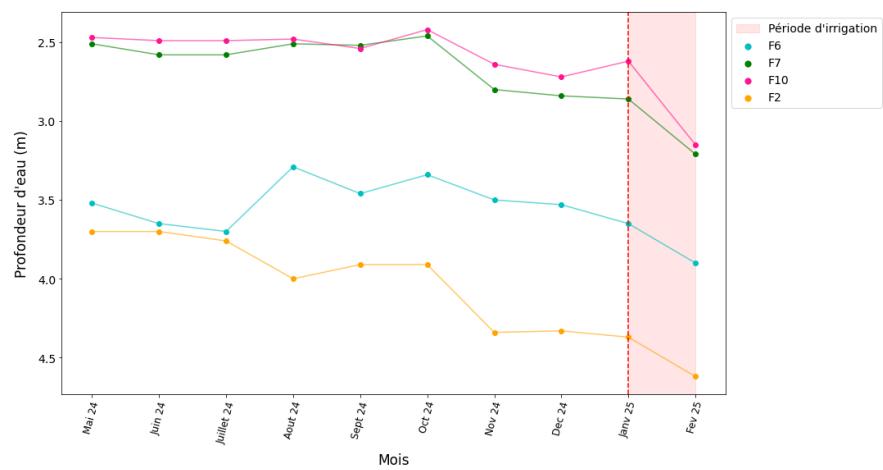


Figure 71 : Evolution mensuelle des profondeurs d'eau depuis mai 2024 dans les forages de JFW (6)

9.4. Lien entre les niveaux piézométriques et les niveaux d'eau dans le Mono

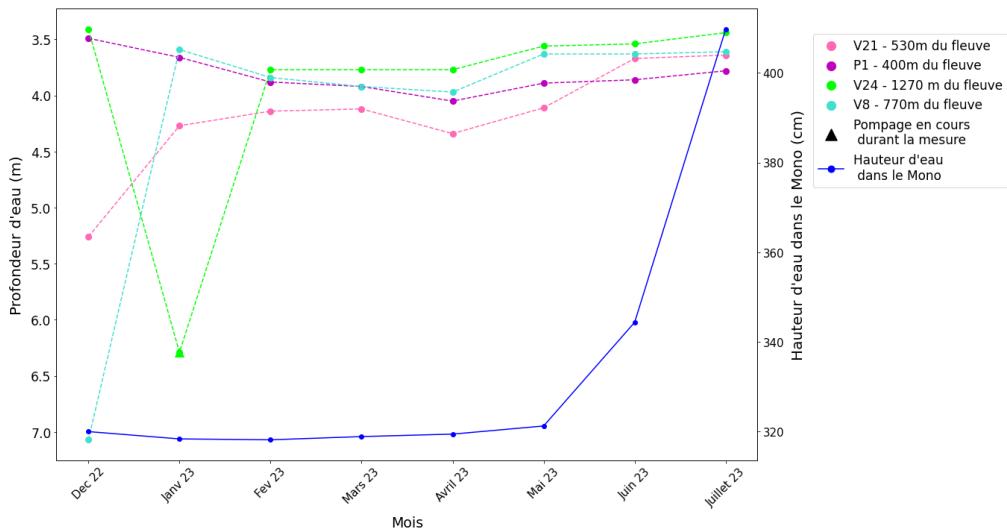


Figure 72 : Lien niveau d'eau dans le fleuve – profondeur d'eau dans les forages (2)

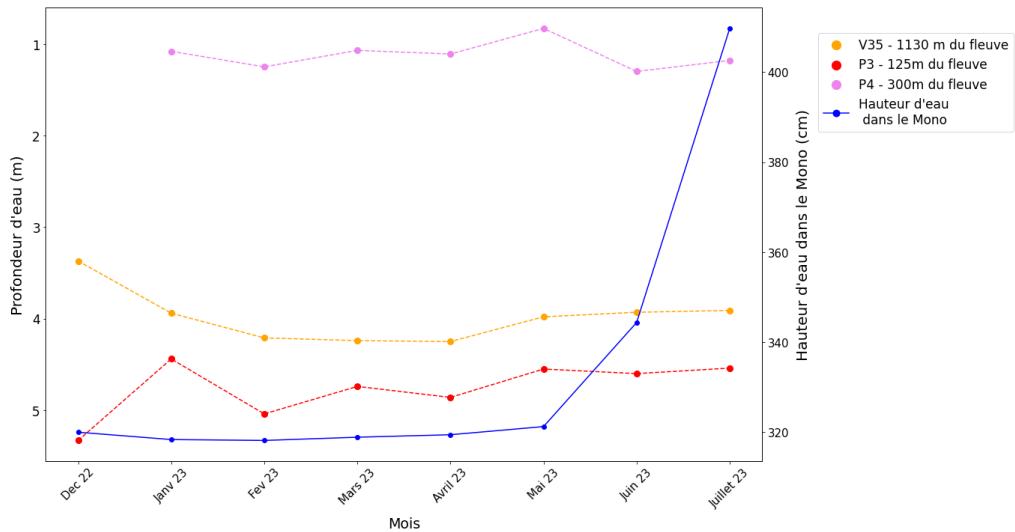


Figure 73 : Lien hauteur d'eau dans le fleuve – profondeur d'eau dans les forages (3)

9.5. Lien entre les niveaux piézométriques et les eaux utiles

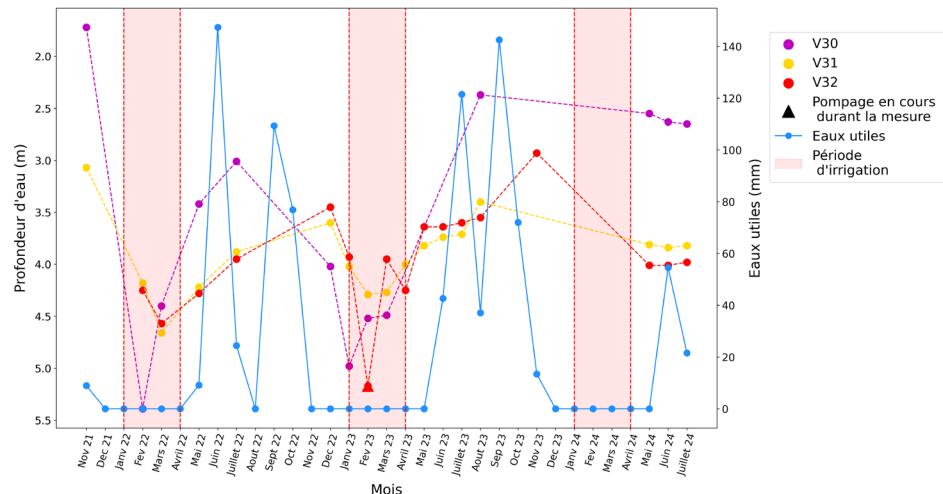


Figure 74 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages de profondeur intermédiaire (2)

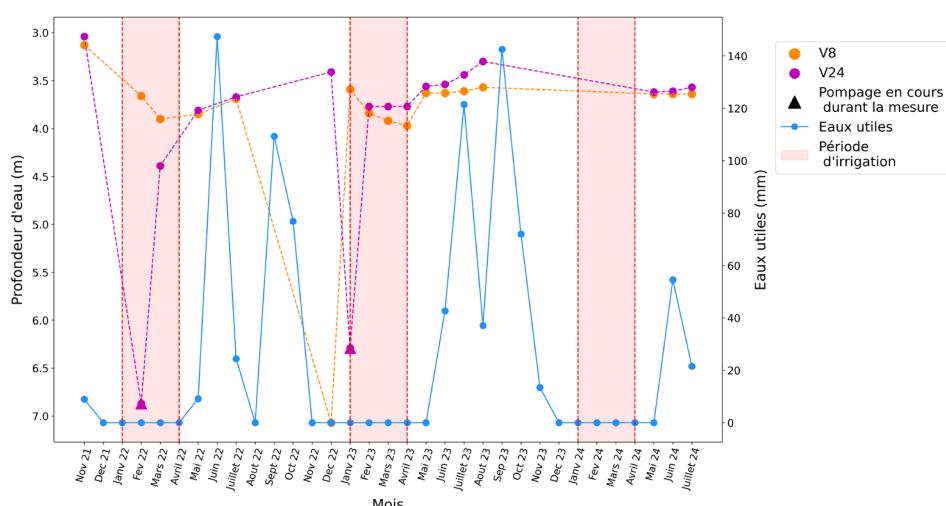


Figure 75 : Lien eaux utiles - profondeur d'eau dans les forages de profondeur intermédiaire (3)

9.6. Evolution des profondeurs d'eau durant les essais de courte durée

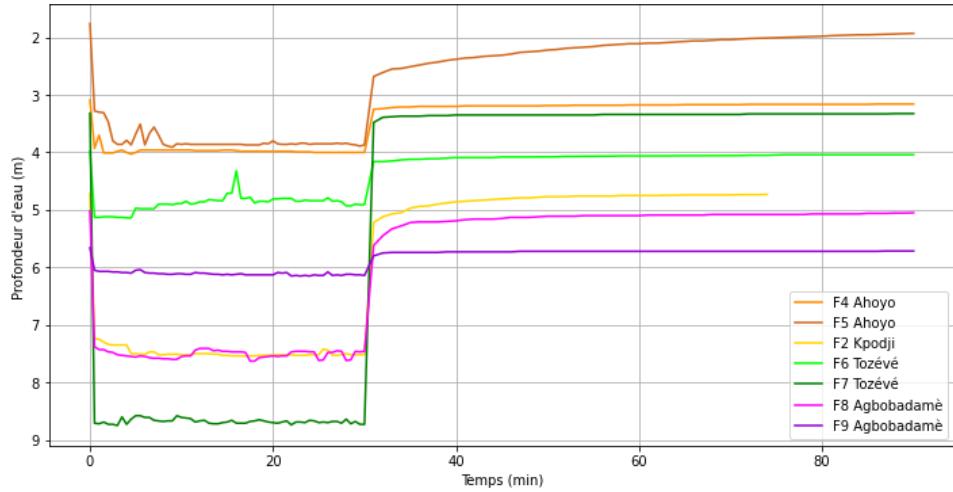


Figure 76 : Evolution des profondeurs d'eau durant les essais de courte durée

9.7. Résultats des essais de longue durée

Premier essai :

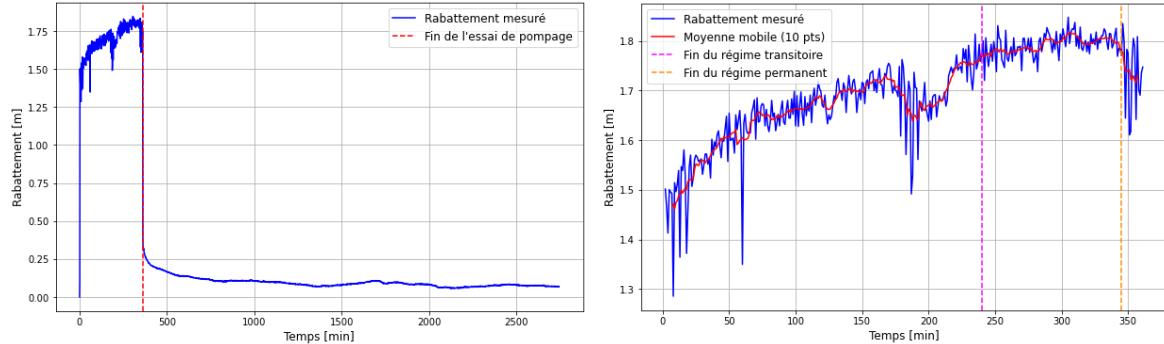


Figure 77 : ELD1 - Evolution du rabattement dans le puits de pompage F3 durant toute la période de mesures (gauche) et le pompage (droite)

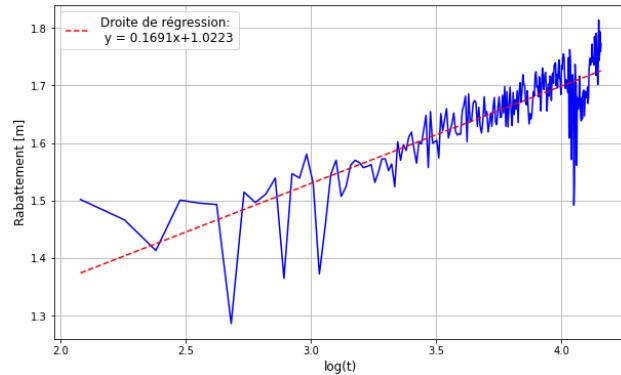


Figure 78 : ELD1 - Evolution du rabattement en fonction du $\log(t)$ durant le régime transitoire dans le puits de pompage F3

Annexes

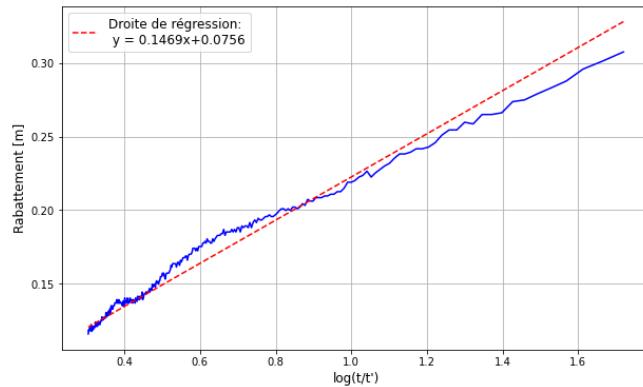


Figure 79 : ELD1 - Evolution du rabattement en fonction de $\log(t/t')$ dans le puits de pompage F3 durant la remontée

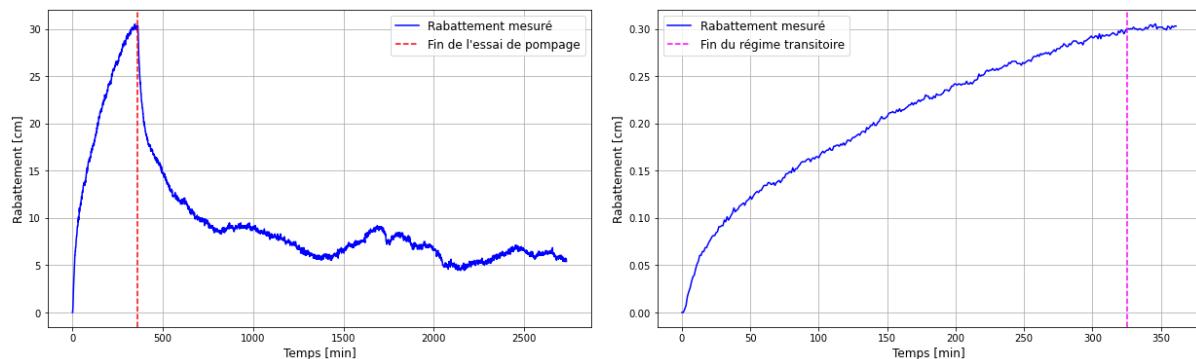


Figure 80 : ELD1 - Evolution du rabattement dans le puits d'observation F4 durant toute la période de mesures (gauche) et le pompage (droite)

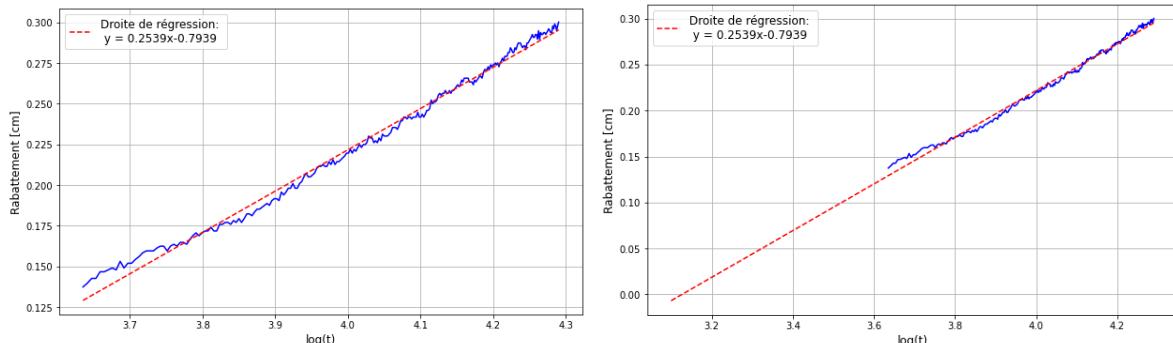


Figure 81 : ELD1 - Evolution du rabattement en fonction du $\log(t)$ durant le régime transitoire dans le puits d'observation F4

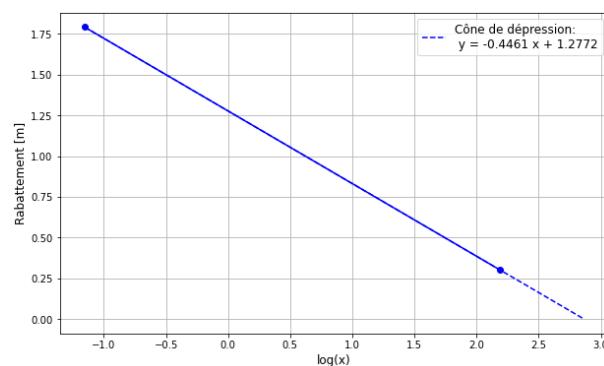


Figure 82 : Cône de dépression du premier ELD

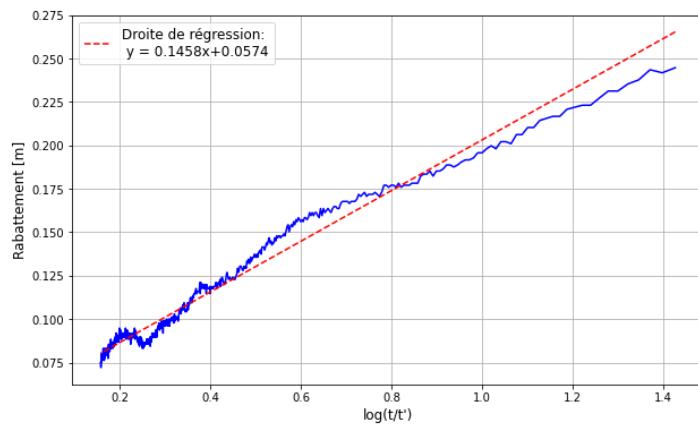


Figure 83 : ELD1 - Evolution du rabattement en fonction de $\log(t/t')$ dans le puits d'observation F4 durant la remontée

Second essai :

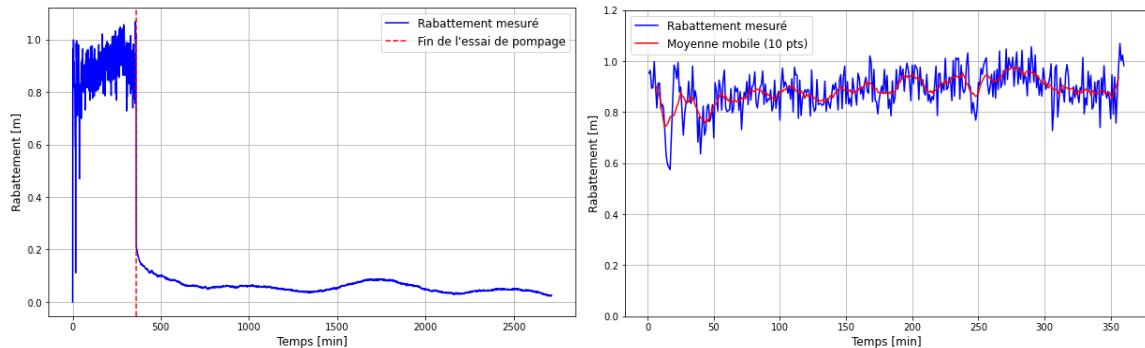


Figure 84 : ELD2 - Evolution du rabattement dans le puits de pompage F1 durant toute la période de mesures (gauche) et le pompage (droite)

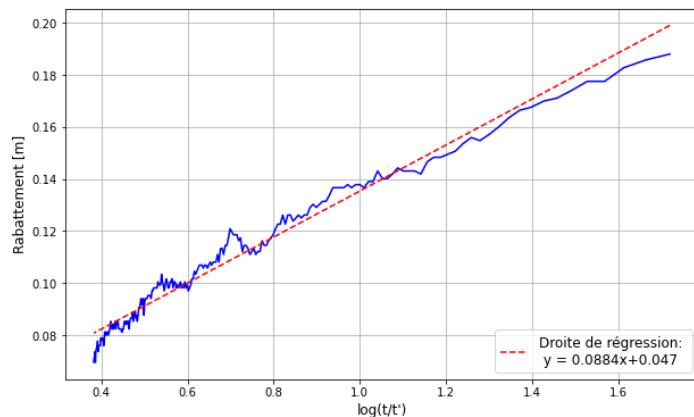


Figure 85 : ELD2 - Evolution du rabattement en fonction de $\log(t/t')$ dans le puits de pompage F1 durant la remontée

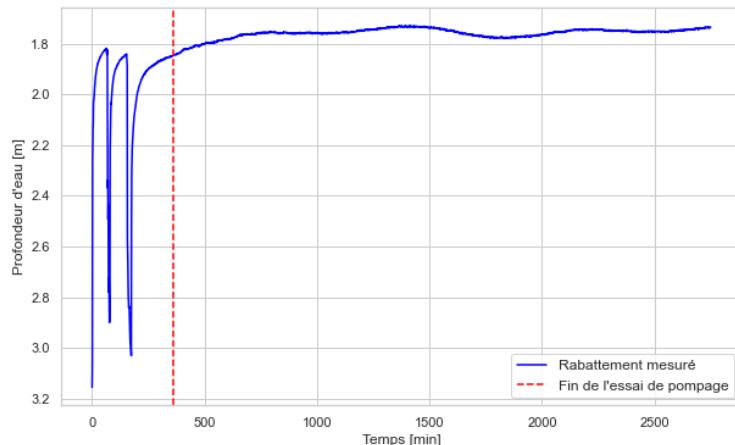


Figure 86 : ELD2 - Evolution du rabattement dans le puits d'observation F5 durant toute la période de mesures

9.8. Evolution des paramètres physico-chimiques

Evolution de la concentration en oxygène dissous durant les pompages

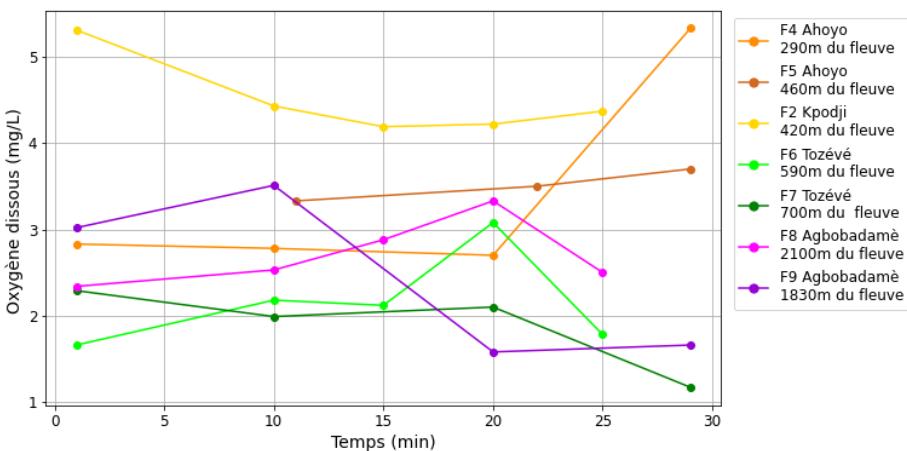


Figure 87 : Evolution de la concentration en oxygène dissous durant les pompages de courte durée

Evolution du pH durant les pompages

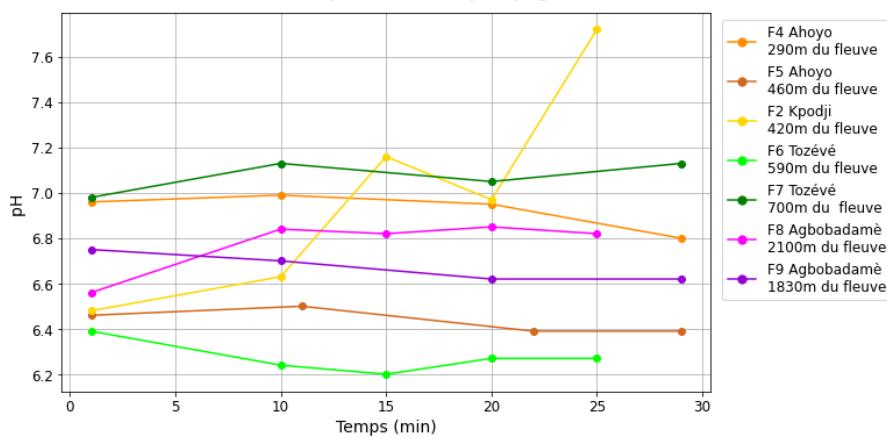


Figure 88 : Evolution du pH durant les pompages de courte durée

Annexes

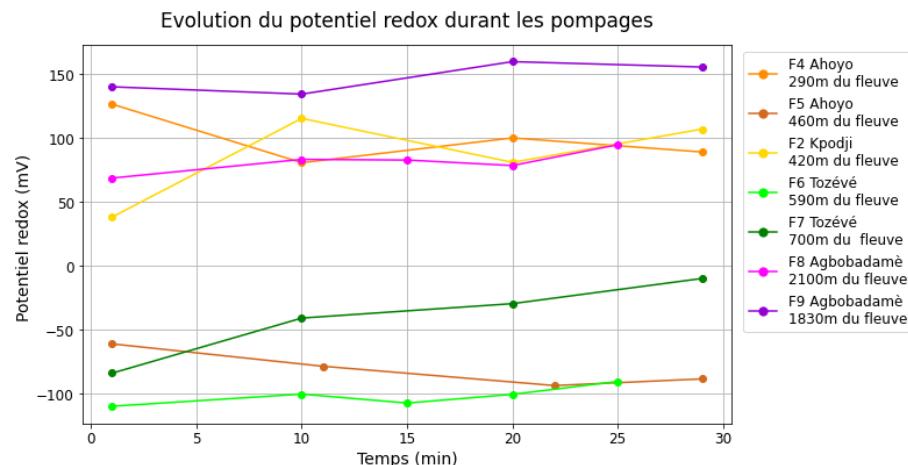


Figure 89 : Evolution du potentiel redox durant les pompages de courte durée

Tableau 24 : Caractéristiques des forages dont les paramètres physico-chimiques ont été étudiés

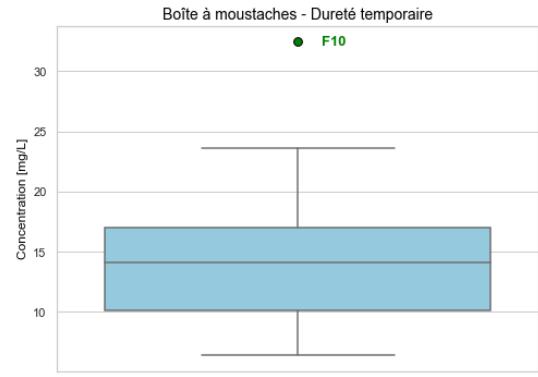
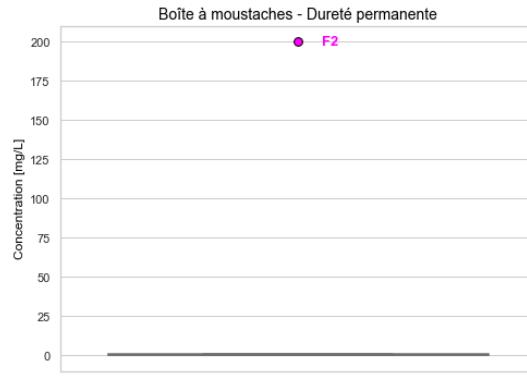
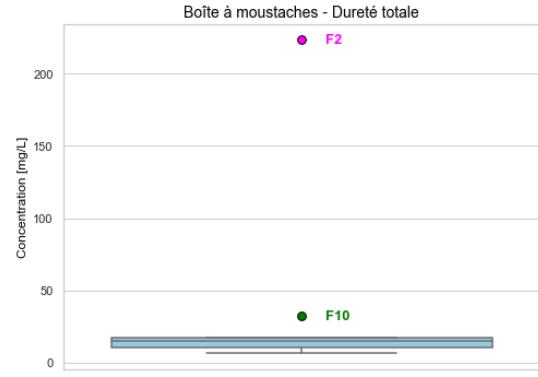
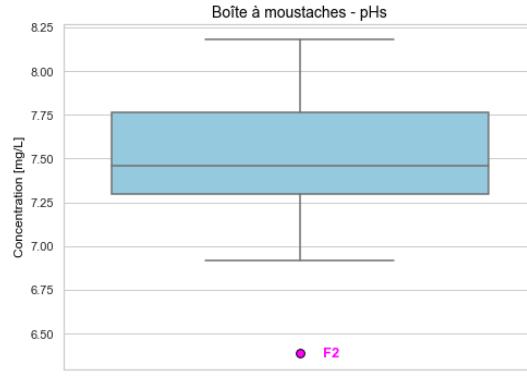
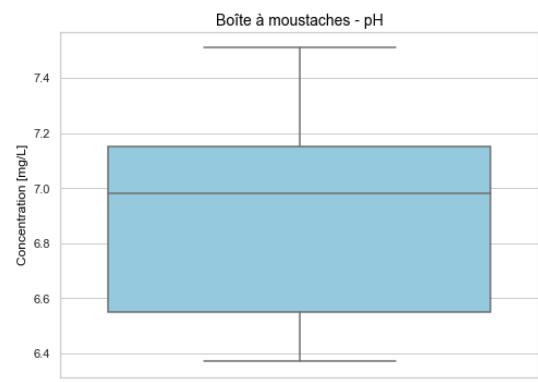
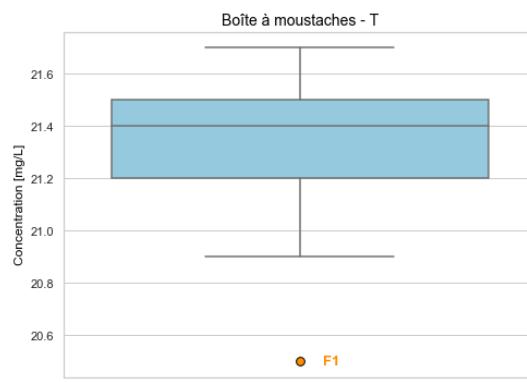
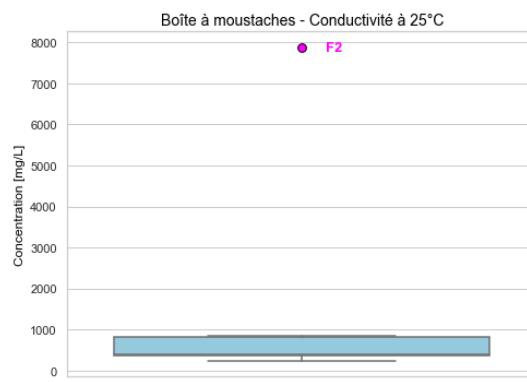
Forage	Zone humide	Profondeur	Distance Mono	Couche de sable	Couche d'argile	Couche sablo-argileuse	Couche argilo-limoneuse
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
F4	Ahoyo	24	290	11.5	0	8	3.5
F5	Ahoyo	6	450	3	0	2.5	0
F2	Kpodji	18.5	420	4.5	13.5	0	0
F6	Tozévé	15.5	590	5.5	2	1.5	6
F7	Tozévé	29	700	18	5	2	1
F8	Agbabadamè	18.5	2100	5	5.5	6	2
F9	Agbabadamè	31	1830	9.5	4	15.5	0.5

9.9. Résultats des analyses des échantillons d'eau

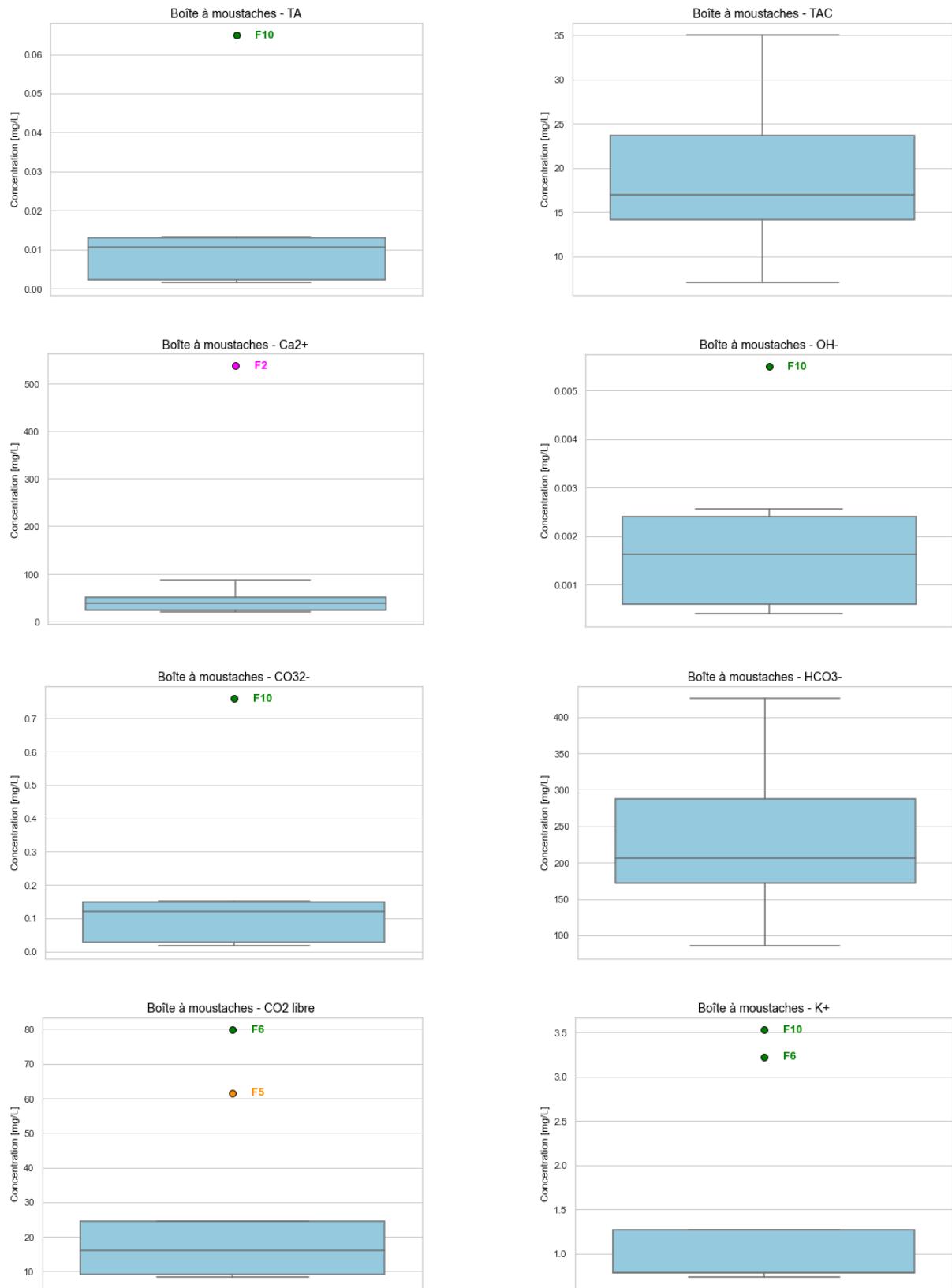
Tableau 25 : Résultats des analyses des échantillons d'eau

		F1	F2	F3-T0	F3-T1	F4	F5	F6	F8	F10	MONO
Conductivité à 25°C	µS/cm	289.7	7880.4	369.3	381.8	233.6	358.1	807.6	745.7	847.8	113.7
Résistivité	Ω.cm	3451.8	126.9	2707.8	2619.2	4280.8	2792.5	1238.2	1341.0	1179.5	8795.1
Température	°C	20.5	20.9	21.3	21.2	21.4	21.4	21.5	21.6	21.7	21.7
pH		6.46	6.98	7.15	7.18	6.68	6.37	6.55	6.99	7.51	6.46
pH saturation		8.14	6.39	7.46	7.43	8.18	7.62	7.30	7.77	6.92	8.61
Indice Langelier		-1.68	0.59	-0.31	-0.25	-1.50	-1.25	-0.75	-0.78	0.59	-2.15
Dureté total	°f	7.7	223.8	15.0	15.4	6.4	13.1	17.0	10.1	32.5	4.3
Dureté permanente	°f	0.0	200.2	0.9	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dureté temporaire	°f	7.7	23.6	14.1	14.7	6.4	13.1	17.0	10.1	32.5	4.3
TA	°f	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
TAC	°f	8.3	23.6	14.1	14.7	7.0	16.9	33.2	18.4	35.0	5.3
Ca²⁺	mg/L	22.33	537.01	49.75	50.80	19.34	28.91	38.18	23.73	86.10	9.69
OH⁻	mg/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
CO₃²⁻	mg/L	0.02	0.15	0.13	0.15	0.02	0.03	0.08	0.12	0.76	0.01
HCO³⁻	mg/L	101.25	287.61	171.74	179.03	85.36	206.15	404.89	224.23	425.44	64.66
CO₂ libre	mg/L	24.56	21.07	8.51	8.28	12.48	61.53	79.84	16.05	9.20	15.69
K⁺	mg/L	1.27	1.08	0.73	0.73	0.78	0.78	3.22	0.79	3.53	2.31
Li⁺	mg/L	0.04	n.d.	0.05	0.05	0.04	n.d.	n.d.	0.02	0.03	n.d.
Mg²⁺	mg/L	5.25	218.35	6.36	6.64	3.75	14.31	18.12	10.16	26.71	4.52
Na⁺	mg/L	26.19	759.67	21.14	21.42	21.43	22.17	53.87	115.53	54.74	5.95
NH₄⁺	mg/L	n.d.	n.d.	n.d.	1.02	n.d.	2.07	30.01	n.d.	3.72	n.d.
Sr₂₊	mg/L	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Br⁻	mg/L	0.10	10.41	0.06	0.06	0.07	0.12	0.95	0.95	0.20	n.d.
Cl⁻	mg/L	30.49	2401.47	17.55	18.46	22.11	12.77	52.39	105.37	48.70	4.44
F⁻	mg/L	0.13	0.25	0.19	0.19	0.15	0.06	0.07	0.32	0.30	0.08
NO₂⁻	mg/L	n.d.	n.d.	1.60	n.d.	1.46	n.d.	n.d.	3.77	n.d.	n.d.
NO₃⁻	mg/L	0.07	1.16	n.d.	n.d.	n.d.	0.52	0.05	n.d.	n.d.	n.d.
PO₄³⁻	mg/L	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SO₄²⁻	mg/L	10.50	117.38	15.38	15.19	7.91	5.04	5.75	16.49	29.34	0.72

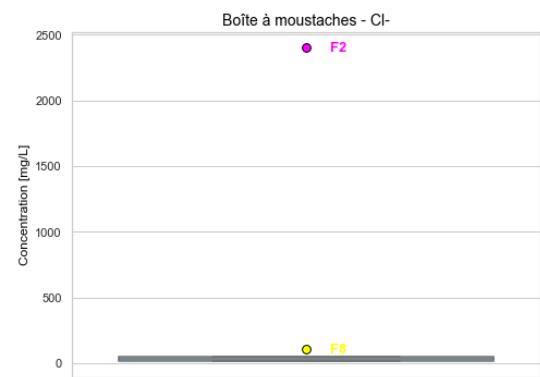
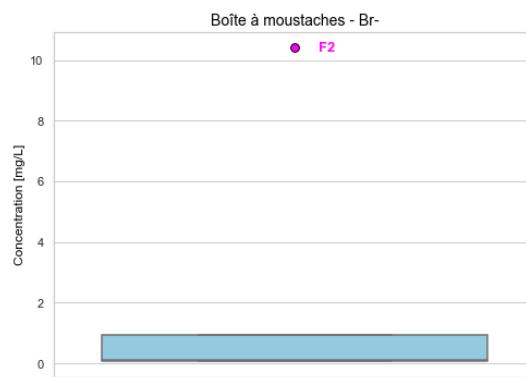
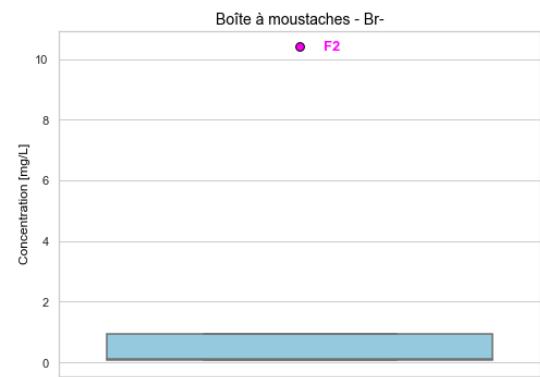
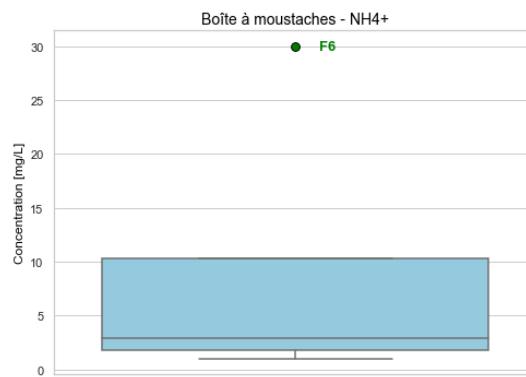
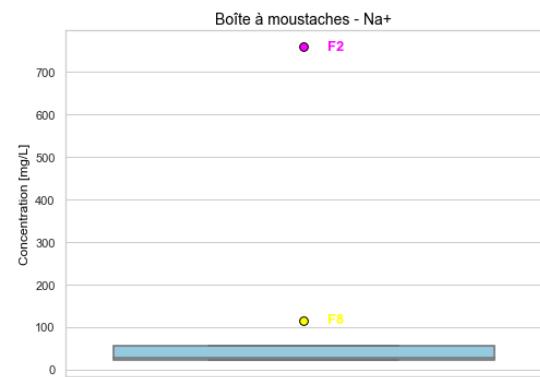
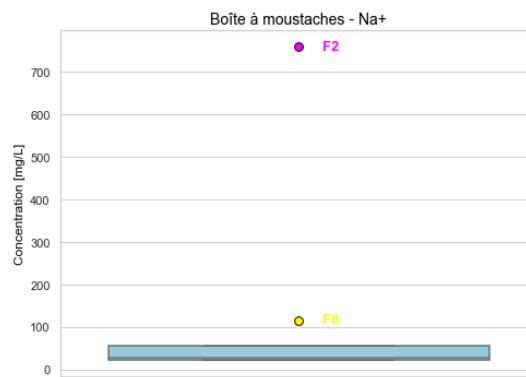
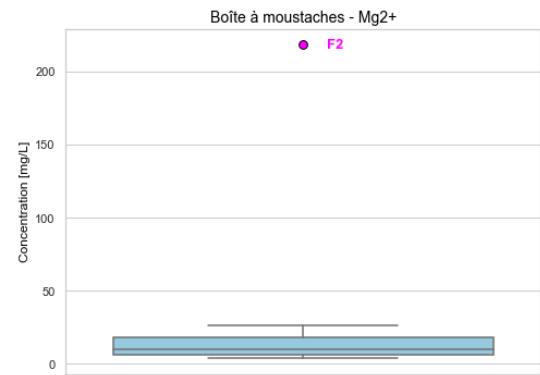
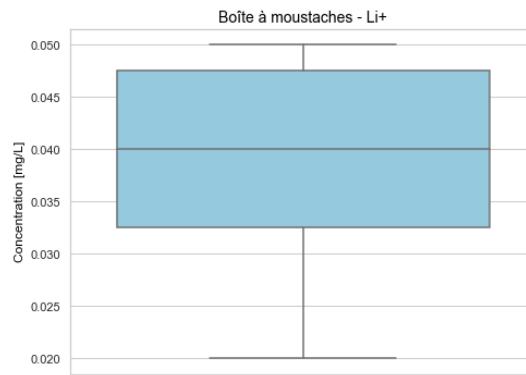
9.10. Analyse statistique : boîtes à moustaches



Annexes



Annexes



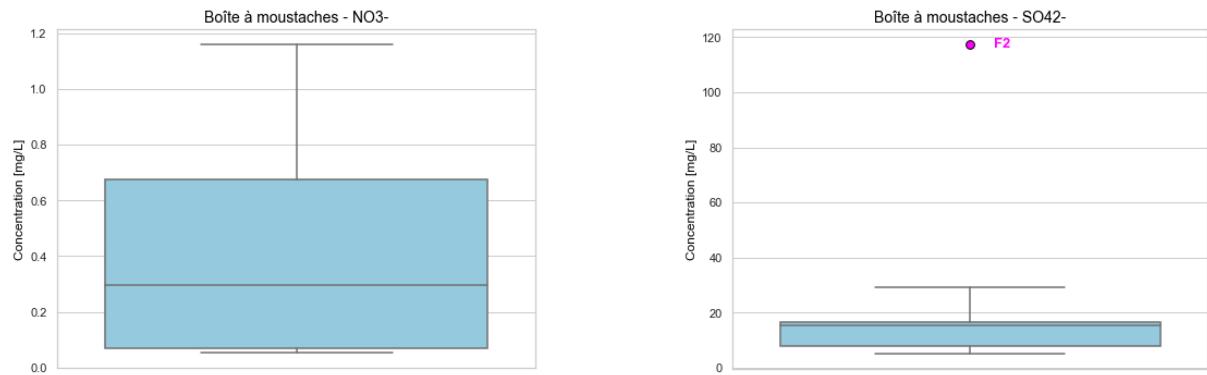


Figure 90 : Boîtes à moustaches des analyses des échantillons d'eau

9.11. Diagrammes de Schoëller

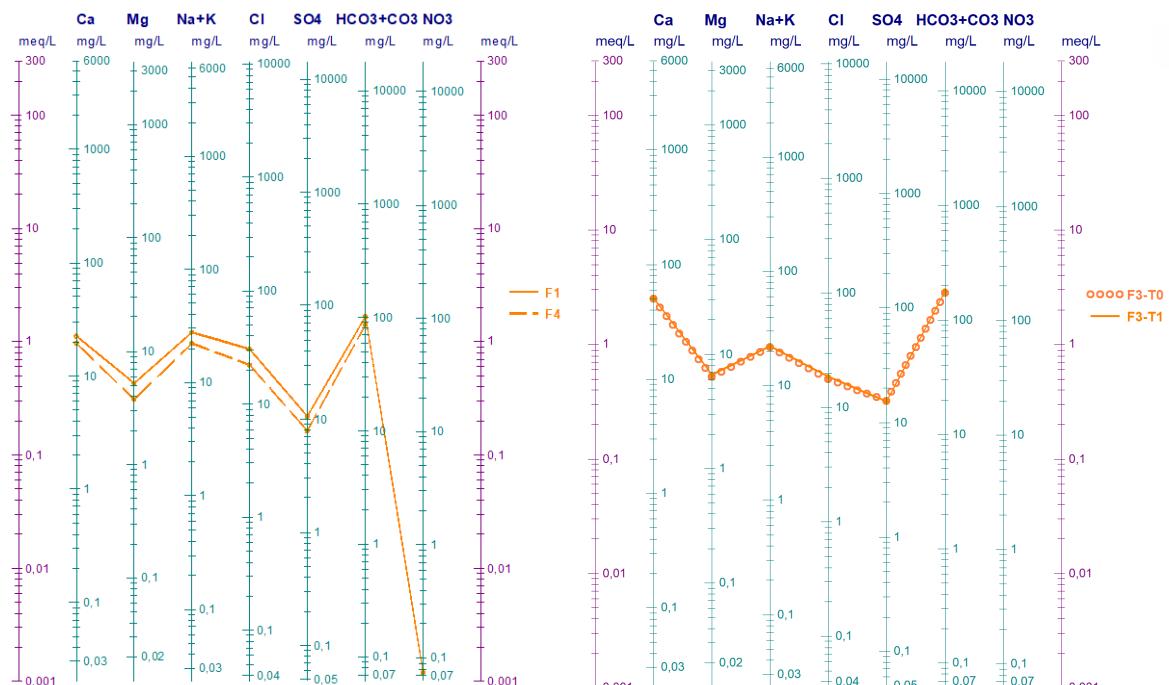


Figure 91 : Diagrammes de Schoëller des échantillons F1 et F4 & F3-T0 et F3-T1

9.12. Résultats des SOMs

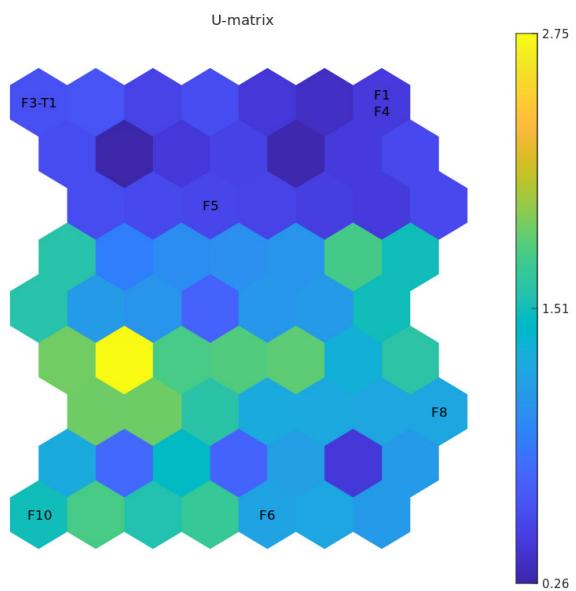


Figure 92 : Matrice U obtenue par la méthode des SOMs

Tableau 26 : Analyse des éléments corrélés avec la méthode des SOMs

Nom	pH	$[\text{OH}^-]$ mg/L	$[\text{CO}_3^{2-}]$ mg/L	$[\text{HCO}_3^-]$ mg/L	$[\text{Mg}^{2+}]$ mg/L	$[\text{Na}^+]$ mg/L	$[\text{Cl}^-]$ mg/L
F1	6.46	4.90E-04	0.016	101.25	5.25	26.19	30.49
F3-T1	7.18	2.57E-03	0.150	179.03	6.64	21.42	18.46
F4	6.68	8.14E-04	0.023	85.36	3.75	21.43	22.11
F5	6.37	3.99E-04	0.027	206.15	14.31	22.17	12.77
F10	7.51	5.50E-03	0.760	425.44	26.71	54.74	48.70
F8	6.99	1.66E-03	0.121	224.23	10.16	115.53	105.37
F6	6.55	6.03E-04	0.079	404.89	18.12	53.87	52.39

9.13. Distribution spatiale des concentrations ioniques

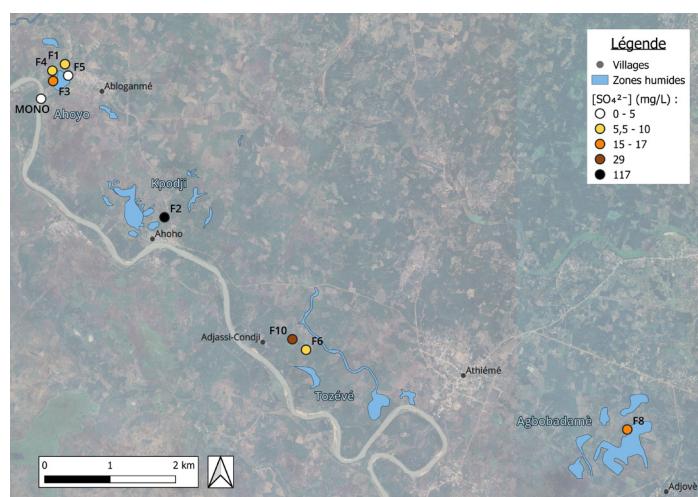


Figure 93 : Distribution spatiale des concentrations en sulfates

Annexes

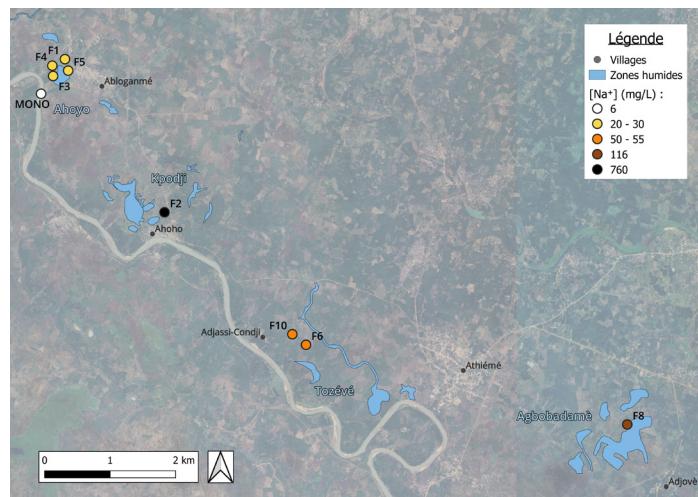


Figure 94 : Distribution spatiale des concentrations en ions sodium

9.14. Indices d'aptitude à l'irrigation

Tableau 27 : Indices d'aptitude à l'irrigation des échantillons

Echantillon	SAR	Conductivité	%Na	RSC
	meq/L	µS/cm	%	meq/L
F1	1.30	289.7	43.17	0.12
F3-T0	0.75	369.3	23.86	-0.18
F3-T1	0.75	381.8	23.57	-0.15
F4	1.17	233.6	42.79	0.13
F5	0.84	358.1	27.22	0.76
F8	5.00	745.7	71.39	1.66
F2	6.98	7880.4	42.49	-40.03
F6	1.80	807.6	41.65	3.25
F10	1.32	847.8	27.57	0.51
Mono	0.40	113.7	27.35	0.21

9.15. Classification de Wilcox

Tableau 28 : Classification de Wilcox sur l'aptitude à l'irrigation des eaux

Classe	Qualité	Etat d'utilisation
C1-S1	Excellente	Eau d'excellente qualité pour l'irrigation et ne présente aucun risque pour les cultures et les sols
C2-S1 C2-S2	Bonne	Eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels
C3-S1 C3-S2 C2-S3	Admissible	Eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité dont la salinité doit être contrôlée
C4-S1 C4-S2 C3-S3	Médiocre	Eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés
C3-S4 C4-S3 C4-S4	Mauvaise	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions (sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel)

9.16. Directives de la FAO pour l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation

Tableau 29 : Directives de la FAO sur la qualité des eaux d'irrigation (d'après Ayers & Westcot, 1994)

Problème potentiel	Paramètre	Unité	Aucune restriction	Restriction légère à modérée	Restriction sévère
Salinité	Conductivité électrique	dS/m à 25 °C	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3
Effet sur l'infiltration (effet combiné de SAR et EC)	SAR = 0 - 3	EC	> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
	SAR = 3 - 6		> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
	SAR = 6 - 12		> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
	SAR = 12 - 20		> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
	SAR = 20 - 40		> 5	5 – 2.9	< 2.9
Toxicité : sodium	Irrigation de surface : SAR	meq/l	< 3	3 – 9	> 9
	Irrigation par aspersion : [Na]	meq/l	< 3	> 3	
Toxicité : chlorures	Irrigation de surface : [Cl-]	meq/l	< 4	4 – 10	> 10
	Irrigation par aspersion : [Cl]-	meq/l	< 3	> 3	
Toxicité : bore	[Br-]	mg/L	< 0.7	0.7 - 3	> 3
Effets divers : nitrogène	[NO3 – N]	mg/L	< 5	5 – 30	> 30
Effets divers : pH				6.5 – 8.4	