Afrique SCIENCE *27(1) (2025) 105 - 116*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Évaluation de la qualité des eaux souterraines de la région du Bélier et leur aptitude à l'irrigation des cultures

Brahima SEYHI*, Franck Maxime GNAMBA, Salomon Kouakou YAO et Abdramane KONE

Université Péléforo Gon Coulibaly de Korhogo, UFR des Sciences Biologiques, Département de Géosciences, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

(Reçu le 05 Septembre 2024 ; Accepté le 31 Octobre 2024)

* Correspondance, courriel : *brahima.seyhi@gmail.com*

Résumé

La présente étude a pour objectif d'évaluer l'aptitude à l'irrigation des eaux de forages localisés dans la région du Bélier (centre de la Côte d'Ivoire). Pour ce faire, les caractéristiques physico-chimiques d'échantillons d'eaux prélevés dans 30 forages de la région ont été déterminées et la qualité destinée à un usage agronomique des eaux a été évaluée par le calcul de plusieurs indicateurs de qualité (SAR, %Na, Iq, ESP, RSC, taux de chlore, etc.). Ces indicateurs de qualité agronomiques indiquent que la majorité des eaux échantillonnées ont une qualité excellente ou acceptable et présentent un faible risque de salinisation et d'alcalinisation des sols. Deux classes d'eaux d'irrigation ressortent : i) la classe C1S1 (53.3 % des eaux), caractéristique des eaux utilisables pour la plupart des espèces cultivables, et ii) la classe C2S1 (46.6 % des eaux), caractéristique des eaux adaptées aux plantes qui présentent une légère tolérance au sel.

Mots-clés : *eaux souterraines, indices de qualité des eaux, aptitude à l'irrigation, salinisation des sols, Région du Bélier, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Assessment of groundwater quality in Belier region and their aptitude for irrigation of cultures

This study aims to assess aptitude for irrigation of groundwater in the region of Belier in Côte d'Ivoire. Physicochemical characteristics of water samples collected from 30 water wells were determined and several water quality parameters essentials for irrigation were calculated (SAR, %Na, Iq, ESP, RSC, chlorine rate, etc.). These parameters indicated that groundwater in Belier region had excellent or acceptable quality and showed low risk for soil salinization and alkalinization. Two water classes were found: i) class C1S1 (53.3 % of water samples), characteristic of waters used for irrigation of most cultivable plants, and ii) class C2S1 (46.6 % of water samples), characteristic of waters used for irrigation of plants with slight salt tolerance.

Keywords : *groundwater, water quality indices, aptitude for irrigation, soil salinization, Belier region, Côte d'Ivoire.*

1. Introduction

L'eau intervient dans la quasi-totalité des activités humaines, notamment les activités domestiques, agricoles, commerciales, industrielles, etc. Le secteur agricole, d'une manière générale, est l'un des plus grands mobilisateurs et consommateurs d'eau à travers le monde, avec des besoins qui représentent entre 70 - 95 % de la quantité totale d'eau mobilisée [1 - 4]. L'eau y est principalement destinée à l'irrigation et aux usages, tels que l'abreuvement du bétail, l'entretien des bâtiments et autres. L'irrigation joue un rôle crucial en agriculture. En effet, elle contribue à garantir la sécurité alimentaire, à réduire la vulnérabilité à la sécheresse et au changement climatique, à compléter les apports pluviométriques, à compenser les périodes de sécheresse, à augmenter la superficie des surfaces cultivées, à améliorer les rendements, la disponibilité et stabilité des approvisionnements alimentaires, etc [3, 5 - 7]. Le pourcentage de champs irrigués était de 20 % en Afrique en 1998 et peut atteindre 59 % dans certaines régions du monde [3]. Les eaux souterraines constituent une ressource d'eau importante pour l'irrigation et une protection de premier ordre contre les aléas du climat et la faible fiabilité de nombreux systèmes de distribution d'eau dans les champs irrigués. L'utilisation de ces eaux en irrigation, favorise considérablement l'égalité de la distribution, et pour de nombreux agriculteurs, l'exploitation de cette ressource représente un système d'approvisionnement disponible, permettant d'échapper à la gestion traditionnelle des périmètres irrigués et d'éviter certains des problèmes de gestion que posent les grands aménagements d'irrigation de surface. Cependant, l'irrigation mal conduite, peut présenter des effets négatifs à court et à long termes. En effet, elle peut modifier le fonctionnement des sols (salinisation) et conduire à une baisse de leur fertilité, affecter le rendement des cultures [8, 9]. Des cas de salinisation de sols irrigués ont été rapportés à travers le monde [8 - 11], notamment en Afrique dans certains périmètres irrigués d'Égypte, de Namibie, du Maroc, d'Éthiopie ou du Sénégal [8].

La salinisation est le processus par lequel la solution du sol se minéralise sous l'influence d'un mécanisme physique (évaporation, drainage interne insuffisant, altération de minéraux et accumulation) [12]. Au-delà d'un certain seuil de minéralisation, le sol se salinise et les végétaux subissent une sècheresse physiologique due à une pression osmotique trop forte et à une toxicité en certains éléments. La littérature rapporte qu'environs 10 ha de terres arables sont perdues chaque minute dans le monde, dont 3 ha par salinisation des sols [13, 14]. La qualité des eaux d'irrigation est un facteur très essentiel à considérer. En effet, une eau d'irrigation avec une forte teneur en sodium (sel) et une faible teneur en calcium peut entrainer une saturation du complexe d'ions échangeables en sodium (complexe adsorbant du sol) et dégrader la structure des sols [15]. En outre, une eau d'irrigation peu salée avec une conductivité électrique inférieure à 200 $\mu S.cm^{-1}$, a une forte tendance à mobiliser rapidement le calcium du sol, pouvant entrainer une obturation des espaces poreux et réduire la perméabilité des sols [16]. Aussi, la qualité des eaux d'irrigation (eaux de surface, eaux souterraines) est menacée par l'application des fertilisants, herbicides et pesticides et le rejet sans traitement adéquat des eaux usées. L'impact socio-économique et environnemental de l'irrigation des champs représente donc une préoccupation mondiale partagée et la qualité de l'eau d'irrigation est considéré comme un paramètre important à considérer dans l'étude de l'impact direct sur les cultures et celle de l'impact indirect sur les sols [17]. En effet, Il est essentiel de connaitre la qualité des eaux destinée à l'irrigation et d'en évaluer leur aptitude pour l'irrigation des champs, afin de prévenir les risques de pollution, de dégradation des sols et de garantir la productivité des sols et le rendement des cultures. La présente étude s'inscrit dans cette dynamique, avec pour objectif d'évaluer l'aptitude à l'irrigation de plusieurs eaux de forages localisées dans la région du Bélier au Centre de la Côte d'Ivoire. Cette zone se caractérise par une économie largement dominée par les activités agro-pastorales et dispose d'une importante réserve d'eau souterraine, pouvant être mobilisée pour l'irrigation des champs.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

La région du Bélier est située au centre de la Côte d'Ivoire ***(Figure 1)***. Elle compte 4 départements et son chef-lieu est la ville de Toumodi. Le relief de la région est peu accidenté et constitué de plateaux (altitude : 200 à 300 m) et de collines granitiques. La végétation prend la forme de savane sur plus de la moitié du territoire de la région, tandis que le reste est occupé par la forêt, en particulier la forêt galerie le long des cours d'eau. La région du Bélier se trouve dans le bassin du Bandama et de son affluent, le N'Zi. Les rivières qui composent ce bassin, ont un régime irrégulier. Néanmoins, le lac Kossou et deux affluents du N'zi (Kan et Praha) se distinguent par leur étendue. La région est caractérisée par un climat tropical humide de transition entre le climat équatorial humide à quatre saisons, dont deux saisons de pluies (de mars à juin et de septembre à octobre) et deux saisons sèches (de juillet à août et de novembre à février), avec une présence d'harmattan [18]. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat est de type Aw (climat de savane avec hiver sec). La température moyenne dans la région du Bélier est de 30 °C, avec une précipitation moyenne annuelle de 1000 - 1400 mm [19]. Les sols sont de trois (03) types : i) les sols ferralitiques sur roche-mère granitique en zone de forêt, ii) les sols argileux ou sablo-humifères ou hydromorphes, près des cours d'eau, dans les bas-fonds et dans les zones près du fleuve Bandama, et iii) les sols composés de roches basiques et des cuirasses en zone de savane avec des ressources minières, notamment l'or et le diamant. L'économie de la région est dominée par les activités agro-pastorales, notamment les cultures de rente, les cultures vivrières et l'élevage.

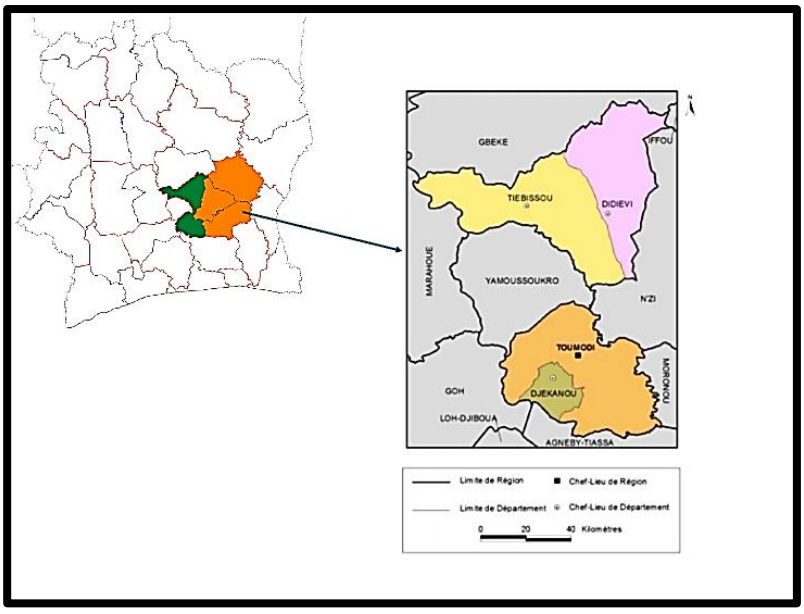

Figure 1 : *Situation géographique de la région du Bélier*

2-2. Échantillonnage et conditionnement des eaux

L'échantillonnage des eaux s'est fait dans 30 forages localisés à travers la région du bélier. Les échantillons d'eaux ont été numérotés de F1 à F30, conformément au forage dans lequel ils ont été prélevés. Environ 500 ml d'eau ont été échantillonnés par forage, dans un contenant plastique (bouteille) et conservés à 4 °C. Les analyses de caractérisation ont été faites sur site pour ce qui concerne le pH, la conductivité. Les autres paramètres, à savoir magnésium, calcium, sodium, potassium, chlorures, carbonates et dureté, ont réalisées au laboratoire.

2-3. Méthodes analytiques

2-3-1. Mesure des paramètres physiques

La température, le pH et la conductivité ont été mesurés immédiatement sur le lieu de prélèvement avec un multi paramètre de terrain de marque HANNA (H19828).

2-3-2. Analyse des cations majeurs

Le dosage des ions calcium et magnésium a été fait par la méthode de complexométrie (ISO 6059-1984). L'appareil utilisé est de marque HANA (H98164). Le dosage des ions calcium s'est fait à un pH entre 12 et 13. Le dosage des ions calcium et magnésium s'est fait par titrage avec une solution de sel disodique d'acide éthylène diamine tétracétique. Le noir érichrome T, qui donne une couleur rouge foncé ou violette en présence des ions calcium et magnésium, a été utilisé comme indicateur. Le dosage du sodium et du potassium a été fait à l'aide d'un photomètre d'émission de flamme de marque BWB-XP. La photométrie de flamme permet le dosage des cations alcalins (Li^+ ; Na^+ et K^+).

2-3-3. Analyse des carbonates

L'analyse des carbonates a été réalisée à partir de la mesure de l'alcalinité (TA et TAC) de l'eau par titrimétrie (MA. 315 – Alc-Aci 1.0) [20]. L'alcalinité composite ou titre alcalimétrique (TA) mesure la teneur de l'eau en hydroxydes libres et en carbonates. L'alcalinité total ou titre alcalimétrique complet (TAC) correspond à la teneur en hydroxydes libres, carbonates et hydrogénocarbonates. Les mesures ont été faites par neutralisation d'un volume d'eau avec l'acide chlorhydrique, en présence d'un indicateur coloré (Solution de vert de bromocrésol et de rouge de méthyle).

2-3-4. Détermination de la dureté de l'eau

La dureté ou titre hydrotimétrique d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. Dans la plupart des cas, la dureté est surtout due aux ions calcium et magnésium. Cette dureté est encore appelée dureté calcique et magnésienne ou consommation de savon. Elle s'exprime en milliéquivalents de concentration en CaCO3, et est aussi très souvent donnée en degrés français (°f). La dureté a été déterminée par titrimétrie à l'aide d'une solution d'acide éthylène diamine tétracétique (EDTA) de concentration molaire C = 0,01 mol/L et en présence d'un indicateur coloré adapté (une solution alcoolique de noir Érichrome T à 0,5% (MA. 200 – Mét. 1.2) [21].

2-3-5. Analyse des chlorures

Les chlorures ont été dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent ($AgNO_3$) à 0,1 N et en présence de chromate de potassium (K_2CrO_4) et d'acide nitrique pur (HNO3). La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent qui doit persister 1 à 3 minutes (MA. 300 - Ions 1.3) [22].

2-4. Détermination des indices de qualité agronomique

2-4-1. Taux d'adsorption du sodium

Le taux d'adsorption du sodium ou sodium absorption rate (SAR) est la quantité d'ions sodium en excès par rapport aux ions calcium et magnésium, qui peut être toléré en grande quantité dans l'eau d'irrigation [1]. Il exprime le risque d'alcalinité et est calculé à partir de ***l'Équation 1*** [23].

$$\boldsymbol{SAR} = \frac{\mathbf{Na^+}}{\sqrt{\frac{\mathbf{Ca^{2+}+Mg^{2+}}}{\mathbf{2}}}} \quad (1)$$

où, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} sont respectivement, les ions sodium, magnésium et calcium présents dans l'eau. Ils sont exprimés en méq/l.

2-4-2. Pourcentage en sodium

Le pourcentage en Sodium (%Na) est un paramètre important de classification des échantillons d'eaux destinés à l'irrigation. Il est calculé à partir de ***l'Équation 2*** [24].

$$\%\mathbf{Na} = \frac{\mathbf{Na+}}{\mathbf{Na^+ + K^+ + Mg^{2+} + Ca^{2+}}} * 100 \quad (2)$$

où, Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} sont respectivement, les ions sodium, potassium, magnésium et calcium présents dans l'eau. Ils sont exprimés en méq/l.

2-4-3. Ratio de Kelly

Le ratio de Kelly (RK) ou coefficient de Kelly représente le taux de sodium par rapport au magnésium et calcium. Il est utilisé pour classer la qualité de l'eau d'irrigation et se calcule à partir ***l'Équation 3*** [25].

$$\mathrm{RK} = \frac{\mathrm{Na^+}}{\mathrm{Ca^{2+}+Mg^{2+}}} \quad (3)$$

où, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} sont respectivement, les ions sodium, magnésium et calcium présents dans l'eau. Ils sont exprimés en méq/l.

2-4-4. Carbonate de sodium résiduel

Le carbonate de sodium résiduel ou residual sodium carbonate (RSC) est la teneur en CO_3^- et HCO_3^- restants lorsque tous les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été combinés à ces anions. Il est calculé à partir de ***l'Équation 4***.

$$\mathrm{RSC} = \mathrm{HCO_3^-} + CO_3^- - (\mathrm{Ca^{2+}} + \mathrm{Mg^{2+}}) \quad (4)$$

où, CO_3^-, HCO_3^- CO_3^-, Ca^{2+}, Mg^{2+} sont respectivement, les ions hydrogenocarbonate, carbonate, calcium et magnésium présents dans l'eau. Ils sont exprimés en méq/l.

2-5. Détermination des diagrammes caractéristiques

Deux diagrammes caractéristiques ont été utilisés pour identifier l'aptitude des eaux à l'irrigation :

- ❖ Diagramme 1 : Évolution du taux d'absorption du sodium (SAR) en fonction de la conductivité. Ce diagramme vise à renseigner sur la salinité et le risque d'alcalisation des sols ;
- ❖ Diagramme 2 : Évolution du pourcentage de sodium en fonction de la conductivité. Il renseigne sur le pourcentage échangeable de sodium des sols.

3. Résultats

3-1. Analyse des critères de qualité agricole des eaux de forage de la région du Bélier

Le ***Tableau 1*** présente les différents indicateurs de qualité agricole des eaux de forages de la région du bélier. L'interprétation de ces différents critères est essentielle pour juger de la qualité de ces eaux à l'irrigation. Ainsi, l'examen du tableau 1 montre que la conductivité des eaux varie entre 29,9 et 586,51 µS/cm, avec une moyenne de 168, 04 µS/cm. Par ailleurs, la majorité des eaux a une conductivité électrique inférieure à 200 µS/cm. Le taux d'adsorption du sodium (SAR) des eaux varie entre 0,08 et 11,93 méq/l, avec une moyenne de 2,50 méq/l. Environ 93,33% des eaux de forages ont un SAR inférieur à 10 méq/l (28 forages). Ces eaux peuvent donc être utilisées sans problème pour l'irrigation. Le pourcentage en sodium (%Na) des eaux varie entre 3,73 et 85,65 %, avec une moyenne de 44,13. Les valeurs du ratio de Kelly (RK) dans les eaux sont faibles et varient entre 0,03 et 5,03, avec une moyenne de 1,05. Les faibles valeurs de RK dans les eaux de la région du Bélier sont en adéquation avec les faibles valeurs de SAR obtenus et indiquent que le sodium n'est pas en excès dans les eaux. La dureté totale des eaux varie entre 2 et 37,5 °f avec une moyenne de l'ordre de 11,47 °f. Le calcium et le magnésium sont des nutriments essentiels pour les plantes avec une concentration régulière dans l'eau. Les chlorures (Cl^-) varient entre 0,04 et 1,6 méq/l, avec une moyenne de 0,37 méq/l. Les chlorures sont présents dans les eaux en faible quantité et conformes à la norme requise (inférieur à 4 méq/). Enfin L'indice de qualité (Iq) des eaux varie entre 0,03 et 0,84 méq/l, avec une moyenne de 0,45 méq/l. L'analyse statistique de tous les indicateurs de qualité montre que les sels minéraux sont présents dans les eaux de forages du Bélier à des concentrations bénéfiques pour la croissance des plantes pour un usage agricole.

Tableau 1 : *Indices et normes de qualité*

Paramètres	Min	Max	Moyenne	Écart type	Variabilité	Normes	Conformité
Conductivité (µS/cm)	29,9	586,51	168,04	145,72	86,71	< 400 400 – 750 750 – 1500 > 1500	Excellente Bonne Moyenne Hautement minéralisée
SAR (méq/l)	0,08	11,93	2,50	2,92	85,65	SAR < 10 10 <SAR< 18 18 <SAR< 26	Excellente Bonne Médiocre
%Na	3,73	85,65	44,13	21,80	202,38	< 20 20-40 40-60 > 60	Excellente Bonne Admissible Mauvaise
RK	0,03	5,03	1,05	1,23	116,85	< 1 1 ≤ RK≤ 2 > 2	Bonne Admissible Mauvaise
RSC (méq/l)	2,75	3,36	0,59	1,54	258,60	< 1,25 1,25-2,5 > 2,5	Sans danger Leger Ne convient pas
Dureté (°f)	2	37,5	11,47	9, 28	80,95	0-7 7-22 22-32 32-54 < 54	Douce Modérément douce Assez douce Dure Très dure
Cl^- (méq/l)	0,04	1,6	0,37	0,28	76,17	< 4 4-10 > 10	Bonne Admissible Mauvaise
Iq (méq/l)	0,03	0,84	0,45	0,24	54,60	Iq < 0,5 0,5 < Iq < 0,6 Iq > 0,6	Acceptable Douteuse Mauvaise

3-2. Détermination du niveau de qualité des eaux en fonction des paramètres agricoles

Le niveau de qualité des eaux de forage en fonction des différents indices de qualité agricole a été étudié, il est présenté au ***Tableau 2***. L'analyse du ***Tableau 2*** montre que la majorité des eaux ont une qualité dite « excellente » ou « bonne » pour l'irrigation, lorsqu'on considère la conformité sur la quasi-totalité des indices de qualité. Toutefois, certaines eaux ont une qualité dite « admissible » pour un usage, lorsqu'on considère la conformité sur le pourcentage de sodium (%Na) et sur le carbonate résiduel de sodium (RSC). Les eaux des forages F4, F5, F9, F12, F13 et F25 ont une qualité dite « mauvaise » pour un usage agricole, lorsqu'on considère la conformité sur les indices de qualité tels que Iq, %Na, RK et RSC. Les indicateurs de qualité déterminés au cours de la présente étude mettent en évidence trois (3) types d'eaux :

- ***eaux de forage utilisables sans contraintes :*** Huit (8) forages sont concernés : F1 ; F3 ; F7 ; F15 ; F19 ; F20 ; F29 ; F30. Ces forages ont des eaux ayant une qualité dite « excellente » pour l'irrigation. Ces eaux peuvent être utilisées pour la plupart des espèces cultivées ;
- ***eaux de forage utilisables avec précaution*** : Quatorze (14) forages sont concernés : F2 ; F8 ; F10 ; F14 ; F16 ; F17 ; F18 ; F21 ; F22 ; F23 ; F24 ; F26 ; F27 ; F28. Ces forages ont des eaux pouvant être utilisées pour l'irrigation, mais avec beaucoup de précautions ;
- ***eaux de forage inutilisables*** : Huit (8) forages sont concernés : F4 ; F5 ; F6 ; F9 ; F11 ; F12 ; F13 ; F25. Ces forages ont des eaux jugées « inaptes » à l'irrigation dans des conditions normales, car elles ont au moins un indice de qualité qui est hors norme.

Tableau 2 : *Niveau de qualité des eaux en fonction des paramètres de qualité agricole*

Qualité des eaux	Iq (méq/l)	SAR (méq/l)	% Na	RK	RSC (méq/l)	Dureté (°f)	CE (µS/cm)	Cl^- (méq/l)
Excellente	1, 3, 6, 7, 8, 11, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 26, 27, 28, 29, 30	2 à 11 , 13 à 30	1, 14, 20, 29, 30	1, 3, 6, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 26, 27, 28, 29, 30	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30	2, 3, 4, 8, 9, 10, 12, 13, 23, 24, 25, 26, 28	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 29, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29	1 à 30
Bonne	-	1, 12	3, 6, 7, 11, 15, 17, 19	-	-	1, 5, 7, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 27, 29, 30	14, 16, 30	-
Admissible	2, 10, 18, 24, 25	-	2, 8, 10, 16, 18, 22, 23, 24, 26, 27, 28	2, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25	4, 12, 13, 16, 17	14, 21	-	-
Mauvaise	4, 5, 9, 12, 13	-	4, 5, 9, 12, 13, 25	4, 5, 9, 12, 13	5, 9	6, 11	-	-

3-3. Évaluation du risque de salinisation et d'alcalinisation des eaux par des diagrammes caractéristiques

La ***Figure 2*** présente le diagramme de l'évolution du taux d'adsorption du sodium (SAR) en fonction de la conductivité. Ce diagramme renseigne sur les risques de salinisation et d'alcalinisation en cas d'utilisation des eaux en agriculture. Il met en évidence deux classes d'eaux, la classe C1S1 et la classe C2S1. La classe C1S1 est caractéristique des eaux ayant une faible conductivité et un faible pouvoir alcalisant, tandis que la catégorie C1S2 est typique des eaux ayant une conductivité moyenne et un faible pouvoir alcalisant. Dans le

détail, Les résultats indiquent qu'environ 50 % des forages (15 forages) ont des eaux appartenant à la classe C1S1 et 46,6 % des forages (14 forages) ont des eaux appartenant à la classe C2S1. Seul un forage à l'étude (F3) se trouve en dehors des champs de répartition car ayant une conductivité inférieure à 100 µS/cm.

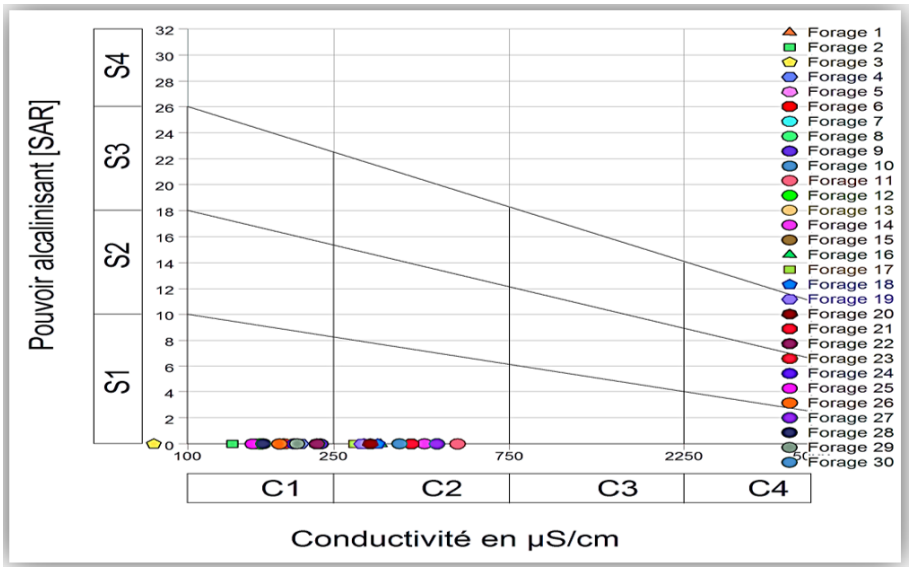

Figure 2 : *Diagramme de l'évolution du SAR en fonction de la conductivité électrique (CE)*

La ***Figure 3*** présente le diagramme de l'évolution du pourcentage en sodium (%Na) en fonction de la conductivité. Il ressort que les eaux de forage de la région du Bélier ont une qualité dite « excellente » pour l'irrigation et ne présentent pas de risques de salinisation ou d'alcalinisation des sols.

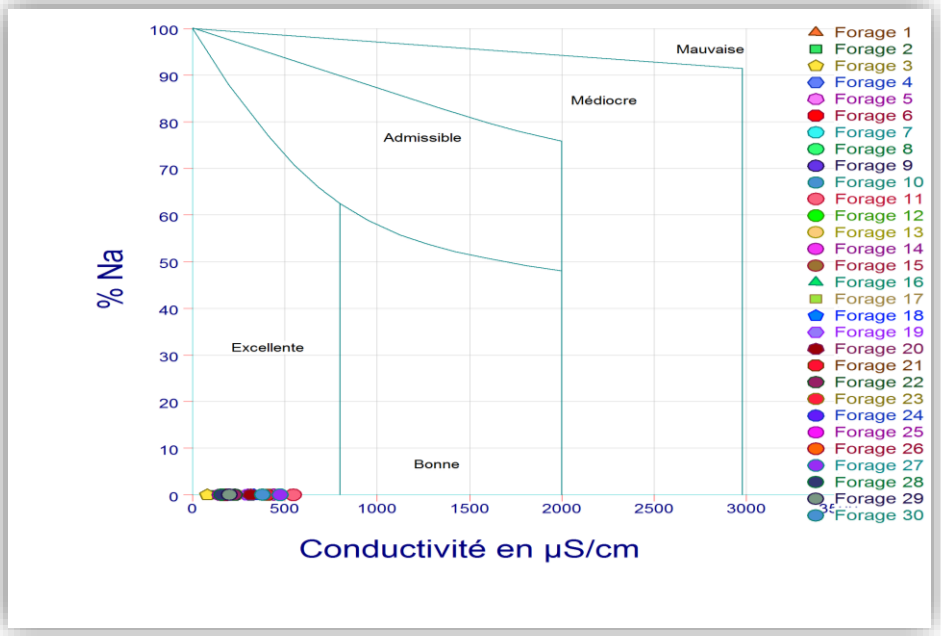

Figure 3 : *Diagramme d'évolution du %Na en fonction de la conductivité électrique (CE)*

4. Discussion

Toutes les eaux d'irrigation contiennent des minéraux dissous. Lorsque l'eau d'irrigation est appliquée, la plupart des sels minéraux restent dans le sol après utilisation de l'eau par les plantes. Ces sels minéraux sont en majorité bénéfiques pour la croissance des plantes, mais dans certaines conditions, ils peuvent être nuisibles. Il existe plusieurs critères pour évaluer la qualité d'une eau d'irrigation [26], et une interprétation précise des indicateurs sur la qualité de l'eau est essentielle pour les gestionnaires d'irrigation, car les pratiques de gestion affectent à la fois la santé du sol et des plantes. La plupart de ces critères ont été utilisés dans cette étude pour déterminer la qualité à un usage agricole des eaux de forage de la région du Bélier. Ainsi, les résultats montrent que la majorité des eaux a une conductivité électrique inférieure à 200 µS/cm. Cela indique que les eaux de forage de la région du Bélier ont une faible salinité et par conséquent, elles présentent un faible risque de salinisation des sols [11]. L'évaluation du taux d'adsorption du sodium (SAR) des eaux indique qu'il oscille entre 0,08 et 11,93 méq/l, et environ 93,33% des eaux de forages ont un SAR inférieur à 10 méq/l. Les eaux de la zone d'étude peuvent être utilisées sans problème pour l'irrigation, c'est-à-dire, sans risque de perte de la structure du sol et de sa capacité d'infiltration [27]. Le pourcentage en sodium (%Na) des eaux a été évalué et les résultats indiquent que le sodium se trouve à des proportions relativement faibles. En effet, l'emploi d'une eau riche en sodium se traduit généralement par une accumulation de sodium dans le sol. Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argiles et provoque la dispersion des particules au sol [15]. Les modifications qui peuvent apparaître dans le sol sont aussi fonction des fréquences d'irrigation [27]. Les valeurs de RK obtenues dans la présente étude sont en majorité faibles et similaires à celles rapportées sur les eaux souterraines du département d'Agboville [28]. Par conséquent, le risque de défolier les plantes sensibles par un système d'aspersion est très faible [1]. A contrario, l'utilisation des eaux avec un RK supérieur à 2 présente un risque de défoliation des plantes sensibles.

Les résultats sur la dureté totale montrent que les eaux de forage de la région du bélier sont en majorité douces. Le calcium et le magnésium sont des nutriments essentiels pour les plantes et une concentration adéquate de ceux-ci dans l'eau est bénéfique. Une dureté trop élevée peut être à la base d'une précipitation de sels de calcium et de magnésium dans les systèmes d'irrigation. Toutefois, contrairement au sodium, le calcium et le magnésium peuvent être tolérés même en quantité relativement élevée dans les eaux d'irrigation [29]. Les chlorures sont présents dans les eaux en faible quantité et conformes à la norme requise, c'est à dire inférieur à 4 méq/l. En effet, les eaux présentant des concentrations de chlorures inférieur à 4 méq/l ont des niveaux de toxicité nul, tandis que les eaux avec des taux de chlorures compris entre 4 méq/l et 10 méq/l ont des niveaux de toxicité modéré à sévère [30]. Ainsi, un taux de chlore supérieur à la norme peut induire des effets toxiques aux plantes. En effet, les ions chlorures peuvent être absorbés par les racines ou les feuilles. Lorsque l'absorption se fait par les feuilles, le taux d'accumulation est plus grand. L'absorption directe se produit habituellement dans des systèmes d'irrigation par arrosage dans des conditions de faible humidité et de hautes températures. La convenance de concentration de cet anion dépend du type de récolte, de l'état de croissance, de la concentration en ions, du climat et de l'état des sols [30]. L'indice de qualité (Iq) des eaux varie entre 0,03 et 0,84 méq/l. Les eaux avec un Iq supérieur à 0,6 sont impropres à l'irrigation. Leur utilisation pour l'irrigation des cultures peut entrainer une dégradation et une baisse de la fertilité des sols. L'évaluation des risques de salinisation et d'alcalinisation des sols par les eaux indique que les eaux appartenant aux classes C1S1 sont généralement acceptables pour l'irrigation de la plupart des espèces cultivées. Ces eaux peuvent donc être utilisées sans le risque de causer des effets de salinisation ou d'alcalinisation des sols. Par contre, les eaux de la classe C2S1 conviennent aux plantes présentant une légère tolérance au sel. Aussi, pour toute utilisation permanente de ce type d'eau, surtout dans les sols peu perméables, il faudrait veiller à un bon lessivage afin d'éviter une salinisation progressive des sols. Les eaux de la classe C2S1 sont donc utilisables avec précaution [31]. Des caractéristiques similaires ont été rapportées dans des eaux souterraines des zones telles que la haute Marahoué [32], Grand-Lahou [31] et Katiola [33] et ont montré que les eaux étaient caractérisées par des niveaux de faible conductivité et de pouvoir alcalinisant.

5. Conclusion

La présente étude a permis d'évaluer l'aptitude des eaux de forage de la région du Bélier à l'irrigation. Les indices de qualité des eaux ont démontré que la majorité des eaux souterraines étudiées sont de qualité acceptable et/ou excellente pour un usage agricole. Elles présentent donc un faible risque de salinisation et d'alcalinisation des sols, de dégradation éventuelle de la structure des sols et d'altération de leurs qualités physiques. En outre, l'utilisation des diagrammes caractéristiques ont montré que les eaux souterraines de la région du Bélier se répartissent en deux classes majeures : C1S1 et C2S1, qui correspondent respectivement aux eaux à faible et à moyenne salinité et sans danger d'alcalisation. Les eaux de la classe 1 ne présentent aucun risque pour la plupart des espèces cultivées, tandis que la classe 2 convient aux plantes à faible tolérance. Par conséquent, les eaux étudiées peuvent être utilisées sans problème pour l'irrigation, sans risque de perte de la structure du sol et de sa capacité d'infiltration. Toutefois, toute utilisation à long terme de ces eaux, nécessite un amendement préalable.

Références

[1] - P. D. NGUYEN, B. TOUMBOU, S. DUCHESNE, N. KOKUTSE & J. P. VILLENEUVE, "Évaluation de l'impact de la pollution diffuse sur la qualité de l'eau en rivière avec données restreintes : cas d'application du bassin versant de la rivière Cau", *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 31 (3) (2018) 293 - 312, https://doi.org/10.7202/1054308ar

[2] - F. TIBERGHIEN, "Eau et agriculture : problématiques actuelles", *Revue Pour*, 1 N° 213 (2012) 37 - 43, https://doi.org/10.3917/pour.213.0035

[3] - FAO, "L'eau, l'agriculture et l'alimentation-Une contribution au rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau". Rome, (2004), https://www.doc-developpement-durable.org/file/programmes-de-sensibilisations/eaux/eau-agriculture-alimentation_FAO.pdf (24 janvier 2025)

[4] - FAO, "Crops and drops – making the best use of water for agriculture", (2002). https://www.fao.org/4/y3918e/y3918e00.htm (January 24, 2025)

[5] - K. TURNER, S. GEORGIOU, R. CLARK, R. BROUWER and J. BURKE, "Economic valuation of water resources in agriculture - From the sectoral to a functional perspective of natural resource management". *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, (2004), https://www.fao.org/3/y5582e/y5582e00.htm#Contents

[6] - H. C. J. GODFRAY, J. R. BEDDINGTON, I. R. CRUTE, L. HADDAD, D. LAWRENCE, J. F. MUIR, J. PRETTY, S. M. THOMAS and C. TOULMIN, "Food security: The challenge of feeding 9 billion people", *Science*, 327 (5967) (2010) 812 - 818, https://doi.org/10.1126/science.1185383

[7] - S. SIEBERT and P. DÖLL, "Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production", *Journal of Hydrology,* 384 (3) (2010) 198 - 217, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.031

[8] - J.-N. SALOMON, "Les dangers de l'irrigation", *Annales des mines*, (2006) 20 - 32, https://www.annales.org/re/2006/re42/Salomon.pdf

[9] - J.-Y. LOYER, "Dégradation saline des sols, induite par l'irrigation en domaine sahélien", In : Eldin Michel (ed.), Milleville Pierre (ed.). Le risque en agriculture. Paris : *ORSTOM*, (1989) 531 - 540, (A Travers Champs). ISBN 2-7099-0960-X. ISSN 0998-4658

[10] - A. E. K. ROUABIA and L. DJABRI, "L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'El Ma Labiod", *Larhyss Journal,* 8 (2010) 55 - 67

[11] - A. DOUAOUI and T. HERTANI, "Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du bas-Chéliff". Actes de l'atelier régional SIRMA. Tunis, (2007) 5 p.
[12] - IPTRID, "Extension de la salinisation et stratégie de prévention et réhabilitation", Conférence de presse électronique, (2006) 2 p.
[13] - F. A. GHASSEMI, A. J. JAKEMAN and H. A. NIX, "Salinization of Land and Water Resources: Human Causes, Extend, Management and Case Studies", University of New South Wales Press, Sydney, 1 (1995) 526 p.
[14] - R. B. SALAMA, C. J. OTTO and R. W. FITZPATRICK, "Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization", *Hydrogeology Journal*, 7 (1999) 46 - 64
[15] - K. TODD, "Groundwater Hydrology", 2nd Edition, Wiley J. and Sons, New York, USA, (1980) 510 p.
[16] - R. S. AYERS and D.W WESTCOT, "La qualité de l'eau en agriculture", Ed. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. 29 Rév. 1, (1988) 165 p.
[17] - Y. ALTCHENKO, R. BIANCALANI, J. L. G. ARÓSTEGUI, K. VILLHOLTH and A. DUCHARNE, "Irrigation avec les eaux souterraines pour atteindre les Objectifs de Développement Durable sur l'éradication de la faim : espoirs et limites pour l'Afrique Sub-Saharienne", *Géologues*, 215 (2022) 75 - 81, hal-04250520
[18] - B. T. A. GOULA, I. SAVANE, B. KONAN, V. FADIKA and G. B. KOUADIO, "Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide)", *Vertigo,* 7 (1) (2006) 1 - 12
[19] - Climata-data.org, *"Climat Yamoussoukro diagramme ombrothermique Yamoussokro"*, https://fr.climate-data.org/afrique/cote-d-ivoire/yamoussoukro/yamoussoukro-3915/, (2012)
[20] - Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), "Détermination de l'alcalinité et de l'acidité : méthode titrimétrique automatisée ", Ed. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, révision, 3 (2016) 1 - 14
[21] - Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), "Détermination des métaux : méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon", Ed. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, révision 7, (2020) 1 - 33
[22] - Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), "Détermination des anions : méthode par chromatographie ionique", Ed. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, révision 6, (2020) 1 - 14
[23] - L. RICHARDS, "Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils", US Department of Agriculture, Washington, DC, 120 (3124) (1954) 800 p. DOI: 10.1126/science.120.3124.800.a
[24] - L. WILCOX, "Classification et usages des eaux d'irrigation", Circulaire USDA n°969, Washington, DC, (1955) 165 p.
[25] - W. KELLY, "Use of saline irrigation water", *Ed. Soil Science*, 95 (1963) 355 - 391
[26] - R. MORRIS and D. DEVITT, "water sampling and interpretation for landscape irrigation", Cooperative Extension, (2014)
[27] - Z. OLIVIER, "Guide pratique de viticulture innovante en collaboration avec l'Anivin de France, *Dunod*", (2016) 214 p.
[28] - E. ZID, E. KHIR and Z. BAIUCH, "Contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigations les paramètres physico-chimique en zone semi-aride Cas des eaux souterraines de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire de la plaine de M'Sila", (2015)
[29] - K. RODRIGUE, S. GBOMBÉLÉ, T. DRISSA, T. ABOU and M. ROSINE, "Aptitudes à l'agriculture des eaux souterraines du département d'Agboville (Sud-est de la Côte d'Ivoire)", *European Scientific Journal*, 12 (21) (2016) 81 - 100

[30] - J. CHERBUIN, "Salinité des eaux et méthodes d'irrigation en lien avec le rendement des cultures maraichères : analyse et pistes de gestion", (2022) 67 p. http://hdl.handle.net/2268.2/13906

[31] - N. SORO, "Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand Lahou et ses environs (Sud-ouest de la Côte d'ivoire). Implications hydrologiques et hydrogéologiques", Thèses de Doctorat d'Etat ès Naturelles, Université de Cocody, (2002) 256 p.

[32] - J. BIEMI, "Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopique des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'ivoire)", Thèse de doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université National d'Abidjan, Côte d'ivoire, (1992) 493 p.

[33] - M. OGA, F. GNAMBA, B. ADIAFFI, T. SORO, K. OULAI and J. BIEMI, "Aptitude of groundwaters for irrigation in Katiola area", *Asian review of Environnemental and Earth*, 2 (3) (2015) 54 - 60