

## Étude de l'aptitude des eaux souterraines de Touba à l'irrigation

### [ Study of the suitability of Touba groundwater for irrigation ]

*Ibra Kandji<sup>1</sup>, Pape Babacar Diop Thioune<sup>2</sup>, and Mouhamadou Masseck Fall<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Laboratoire BIOGERENAT, Institut Supérieur Formation Agricole et Rural (ISFAR) BP 54, Université Alioune de Bambey, Senegal

<sup>2</sup>Université Alioune Diop de Bambey, Senegal

<sup>3</sup>LaSTEE, Ecole Polytechnique de Thies, Senegal, BP A10, Senegal

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** With no surface water available during the dry season in Touba, using groundwater for irrigation is a real alternative. In general, the poor quality of irrigation water has an effect on soil quality, which is harmful to plant growth and therefore has an impact on yield. Irrigation water can even pose a risk to human health. It is crucial to assess the quality of irrigation water before use. Consequently, the aim of this study is to assess the suitability of the groundwater in TOUBA and the surrounding area for irrigation. For the purposes of this study, the Sodium Absorption Ratio (SAR), the Magnesium Absorption Ratio (MAR), the Doneen Permeability Index (IP) and the Potential Salinity (SP) were calculated for sixteen (16) boreholes tapping the Maastrichtian aquifer. The determination of these parameters is based on hydro-chemical data (Electrical Conductivity (EC), concentration of chloride (Cl<sup>-</sup>), sulphate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), calcium (Ca<sup>2+</sup>), bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), magnesium (Mg<sup>2+</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>) and potassium (K<sup>+</sup>) ions) received from the Water Resources Management and Planning Department (DGPPE) and the Rural Drilling Office (OFOR). According to the SAR, 12.5% are C3S1, 12.5% C1S4, 31.25% C4S3-C3S4, 6.25% C2S4 and 37.5% C4S4. 93.75% of the samples have a MAR above 60% [FAO limit]. Determination of the Doneen index (PI) shows that all the samples have PI above 75%. However, only 18.75% of the waters studied have the SP values recommended by Doneen.

**KEYWORDS:** groundwater, hydrochemical, Sample, Maastrichtian, soil.

**RESUME:** Avec l'absence des eaux de surface durant la saison sèche à Touba, le recours aux eaux souterraines pour l'irrigation constitue un véritable alternatif. En général, la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation a des effets sur la qualité du sol, ce qui est nuisible à la croissance des plantes, et donc a un impact sur le rendement. L'eau d'irrigation peut même constituer un risque pour la santé humaine. Il est crucial de bien évaluer la qualité de l'eau destinée à l'irrigation avant toute utilisation. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'adéquation des eaux souterraines de TOUBA et ses environs à l'irrigation. Pour bien mener cette étude, le rapport d'absorption de Sodium (SAR), le rapport d'absorption de Magnésium (MAR), l'indice de perméabilité de Doneen (IP) et la salinité potentielle (SP) ont été calculés sur seize (16) forages captant la nappe Maastrichtienne. La détermination de ces paramètres précités repose sur les données hydro-chimiques (Conductivité Electrique (CE), concentration des ions de chlorure (Cl<sup>-</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), calcium (Ca<sup>2+</sup>), bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Magnésium (Mg<sup>2+</sup>), Sodium (Na<sup>+</sup>), et potassium (K<sup>+</sup>)) de la nappe reçues de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPPE) et de l'Office des Forages Ruraux (OFOR). Selon le SAR 12,5% sont de C3S1, 12,5% de C1S4, 31,25% de classe C4S3-C3S4, 6,25% de classe C2S4 et 37,5% de classe C4S4. 93,75% des échantillons ont un MAR supérieur à 60% [valeur limite de la FAO]. La détermination de l'indice de Doneen (IP) montre que tous les échantillons ont des IP supérieurs à 75%. Par contre, seul 18,75% des eaux étudiées ont des valeurs de SP recommandées par Doneen.

**MOTS-CLEFS:** nappe, hydrochimiques, échantillons, Maastrichtienne, sol.

## 1 INTRODUCTION

Touba est une ville religieuse située dans la région de Diourbel au Sénégal. En terme de démographie, c'est la deuxième ville la plus peuplée après la capitale, Dakar. Les ressources en eau souterraine se trouvent au niveau de trois aquifères (superficielle, semi profonde et profonde/maastrichtien). Les forages qui captent le maastrichtien sont profondes d'environ 250-450m [1].

Les eaux souterraines constituent une réserve d'eau importante pour la consommation d'eau potable et les activités industrielles et agricoles. Elles sont devenues la principale source d'eau utilisée dans les activités agricoles dans de nombreux pays où les rivières et les systèmes de drainages ne sont pas adéquats. Cependant, le choix d'une eau pour l'irrigation dépend de la concentration totale de sels solubles évalués par la conductivité électrique (CE). Une salinité élevée peut être préjudiciable à la croissance des plantes. Les sels minéraux contenus dans l'eau ont des effets sur le sol et les plantes [2]. Ces sels peuvent perturber le développement physique des plantes par l'absorption de l'eau qui agit sur le processus osmotique, ou chimiquement par les réactions métaboliques telles que celles causées par les constituants toxiques. Si l'on arrose la plante avec de l'eau faiblement minéralisée, l'eau pénètre dans la plante par un phénomène d'osmose, par contre si l'on arrose par de l'eau trop minéralisée, on inverse le phénomène d'osmose et la plante se dessèche. On aura le même phénomène avec un excès d'engrais. Pour éviter ces phénomènes, certaines règles d'utilisation font intervenir la salinité totale, la composition ionique ainsi que la présence des éléments traces [3]. En général, les facteurs de qualité de l'eau étudiés sont principalement des cations comme  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ , des anions comme  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $NO_3^-$  et des métaux lourds qui sont des indicateurs de la potabilité de l'eau. En revanche, le rapport d'absorption de Sodium (SAR), le rapport d'absorption de Magnésium (MAR), l'indice de perméabilité de Doneen (IP) et la salinité potentielle (SP) ont été fréquemment utilisés pour définir la qualité de l'eau pour l'irrigation [4].

L'objectif du présent travail est d'étudier l'utilisabilité des eaux souterraines de la nappe de Touba pour l'irrigation. De façon spécifique, il s'agit de calculer le SAR, le MAR, l'IP et la SP. L'étude a été rendue possible grâce aux données hydrogéologiques d'une quinzaine de forages captant le Maastrichtien, reçues de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE) et de l'Office des Forages Ruraux (OFOR).

## 2 METHODOLOGIE

### 2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La commune de Touba Mosquée est située dans l'arrondissement de Ndame (département de Mbacké, Région de Diourbel). Elle est géographiquement limitée:

- Au Nord par l'arrondissement de Darou Mousty;
- Au Sud par l'arrondissement de Kaël;
- A l'Est par l'arrondissement de Saggatta Djoloff;
- A l'Ouest par un ensemble de communes que sont celles de Touba Fall et Dalla – Ngabou [5].

La figure 1 donne la position géographique de notre zone d'étude.

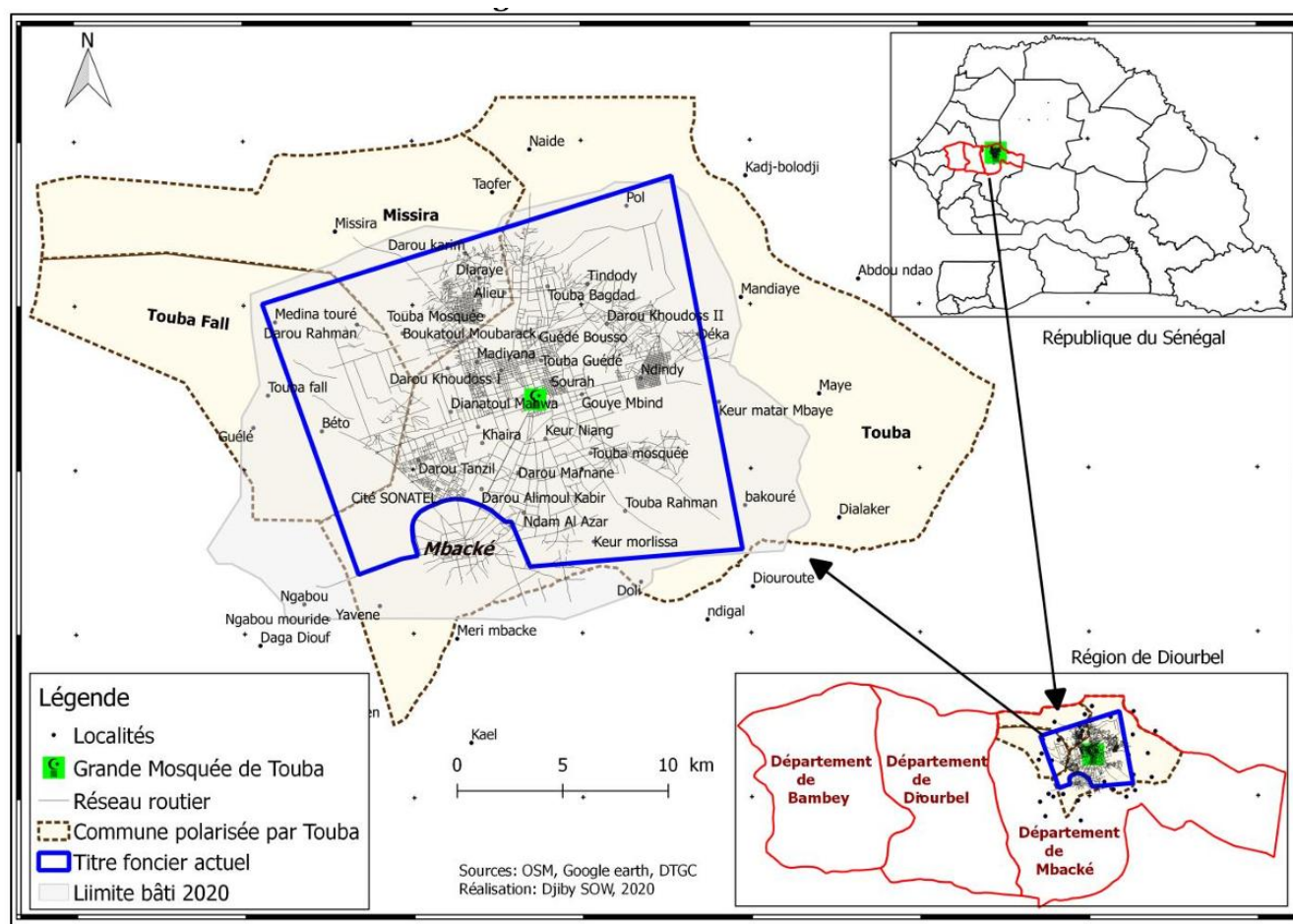


Fig. 1. Position géographique de la zone d'étude Source des données: OSM, DTGC, Google Earth [5]

Les sols sont de type ferrugineux tropical et se répartissent en deux principales composantes:

- Des sols à 85 % de type ferrugineux tropicaux faiblement lessivés sur sable (Dior), sableux et profonds, bien drainés, perméables et à faible degré de saturation, à la fois hyper sensibles et exposés aux érosions éoliennes et hydriques.
- Les 15 % restant sont constitués de sols de type ferrugineux tropicaux lessivés (Deck Dior) tropicaux rougeâtres et ferrugineux, argileux par endroits (sur environ 10 % du territoire) [5], [6].

Les mois les plus pluvieux sont Août et Septembre. Le mois d'Août peut totaliser en moyenne 171 mm sur un total annuel de 613 mm. La température moyenne annuelle est de 36°C dans Touba. Le mois le plus chaud de l'année est Mai, avec une température moyenne de 40°C [7].

Les ressources en eau occupent une place prépondérante dans la création d'un espace de vie urbain ou rural. À Touba, les ressources en eau sont réparties entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

- **Les eaux de surface:** elles sont quasi inexistantes. Les quelques retenues d'eaux sont constituées par les opportunités qu'offrent quelques dépressions plus ou moins importantes. Elles sont alimentées par les eaux de pluies et disparaissent deux à trois mois après la fin de celle-ci.
- **Les eaux souterraines:** on note la présence d'une nappe phréatique dans les calcaires de l'éocène. Elle donne une eau douce de bonne qualité qui, aujourd'hui est exploitée à des profondeurs situées entre 25 et 90 mètres. Aujourd'hui, d'après [1], le Maastrichtien à l'est de Touba dispose de bonnes **potentialités** en termes quantitatifs estimées à 100 000 m<sup>3</sup>/jour. Cette zone présente une bonne potentialité en eaux douces, à la fois en termes de quantité et de productivité dans les zones d'appel des forages.

A Touba, ce sont les nappes du Continental terminal et celles du Maastrichtien qui sont essentiellement sollicitées pour l'approvisionnement en eau potable. Malheureusement, les forages captant la nappe du Maastrichtien présentent tous des teneurs en fluor qui dépassent la norme admissible fixée par l'Association Sénégalaise de Normalisation (NS 05-033) qui est de 0,8 mg par litre d'eau [1].

## 2.2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données hydrogéologiques ont été fournies par la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPPE) et l'Office des Forages Ruraux (OFOR). Il s'agit de la Conductivité Electrique (CE), de la concentration des ions de chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Sodium ( $\text{Na}^+$ ) et potassium ( $\text{K}^+$ ). Les mesures des paramètres hydrochimiques précitées ont été effectuées sur seize (16) forages captant le Maastrichtien. Sur la base des données de ces 16 forages nous avons Calculé pour chaque forage quatre paramètres que sont le rapport d'Absorption de Sodium (SAR), le rapport d'absorption de Magnésium (MAR), l'indice de perméabilité de Doneen (IP) et la salinité potentielle (SP) afin d'évaluer l'utilisabilité des eaux souterraines de Touba et ses environs dans le domaine agricole. Les logiciels utilisés pour le traitement sont: GOOGLE EARTH pour la localisation des points, ARCGIS pour la réalisation des cartes et Excel pour l'étude statistique. Les positions géographiques des forages testés sont données par la figure 3 ci-dessous.

L'analyse et l'interprétation des résultats reposent sur le calcul des paramètres suivant:

- **Rapport d'absorption de sodium (SAR)**

L'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ) peut être considéré comme un des ions les plus importants pour l'évaluation des critères de qualité d'une eau à usage agricole. La classification des eaux est élaborée à l'aide du diagramme de la classification des eaux d'irrigation d'U.S.S.L (United States Salinity Laboratory). Ce dernier est fonction de la conductivité électrique (CE) à 25°C et le rapport d'absorption du sodium (SAR). Le coefficient d'adsorption du sodium (S.A.R), appelé "pouvoir alcalinisant" est calculé par la formule suivante [8]:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}} \quad [9], \text{ Tous les éléments sont exprimés en méq/l.}$$

Le tableau 1 et la figure 2 donnent une classification des eaux d'irrigation.

**Tableau 1.** *Classification des eaux d'irrigation par le diagramme de Richards*

Classe	Qualité	Appréciation
C1S1	Bonne	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
C1-S2, C2-S1	Moyenne à bonne	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles.
C2-S2, C1-S3, C3-S1	Moyenne à médiocre	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse
C1-S4, C2-S3, C3-S2, C4-S1	Médiocre à mauvaise	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
C2-S4, C4-S2, C3-S3	Mauvaise	Eau de qualité mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.
C3-S4, C4-S3	Très mauvaise	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.
C4-S4	Inutilisable	Déconseillée pour l'irrigation

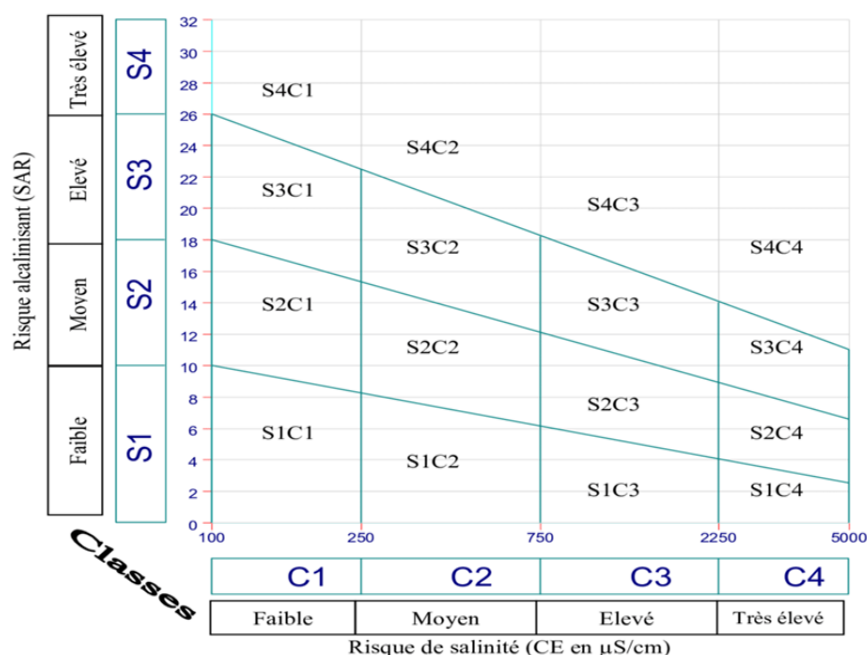


Fig. 2. Diagrammes de classification des eaux d'irrigation ((United States Salinity Laboratory))

#### • Indice de perméabilité de Doneen (IP)

La perméabilité du sol est affectée par l'utilisation à long terme de l'eau irriguée et les constituants influents sont les solides dissous totaux, le ratio de bicarbonate de sodium et le type de sol. Selon [10], l'indice de perméabilité est un critère basé sur la solubilité du sel et la réaction se produisant dans la solution du sol à partir de l'eau. L'indice de perméabilité permet de mettre en exergue l'impact d'une eau d'irrigation sur la perméabilité d'un sol. Il est donné par la formule 12 [11]:

$$IP = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} * 100 \quad [12]$$

Selon [12], l'IP est divisé en trois classes: classe I (> 75%, *appropriée*), classe II (25-75%, *bonne*) et classe III (< 25%, *inappropriée*). L'eau des classes I et II est utilisable pour l'irrigation [2].

#### • La salinité potentielle (SP)

La salinité du sol est constituée par tous les sels de chlorure de sodium et des sulfates de magnésium. La salinité potentielle (Sp) pourrait être estimée par l'équation 13 où tous les termes sont exprimés en milliéquivalent par litre (meq/L) [8].

$$SP = Cl^- + \frac{SO_4^{2-}}{2} \quad [12]$$

Elle est définie sur une échelle variante entre 3 à 5 qui permet de juger de l'aptitude des eaux à l'irrigation. Les eaux souterraines sont déconseillées à l'irrigation si le SP est au-delà de 5 [8].

#### • Rapport d'absorption du magnésium (MAR)

Le rapport d'absorption du magnésium (MAR) évalue la concentration de Magnésium (Mg) par rapport au Calcium (Ca). Une teneur élevée en Magnésium (Mg) par rapport au Calcium (Ca), constitue une menace pour la qualité du sol, elle réduit la porosité et éventuellement la perméabilité du sol, inhibant ainsi la circulation et la disponibilité de l'eau dans le sol. Le rapport d'absorption de Magnésium est donné par la formule 13 [11]:

$$MAR (\%) = \frac{Mg}{Mg + Ca} * 100 \quad [13]$$

Selon [14], une valeur de MAR inférieure à 60% convient à l'irrigation.

La figure 3 ci-dessous donne la position géographique des différents forages testés

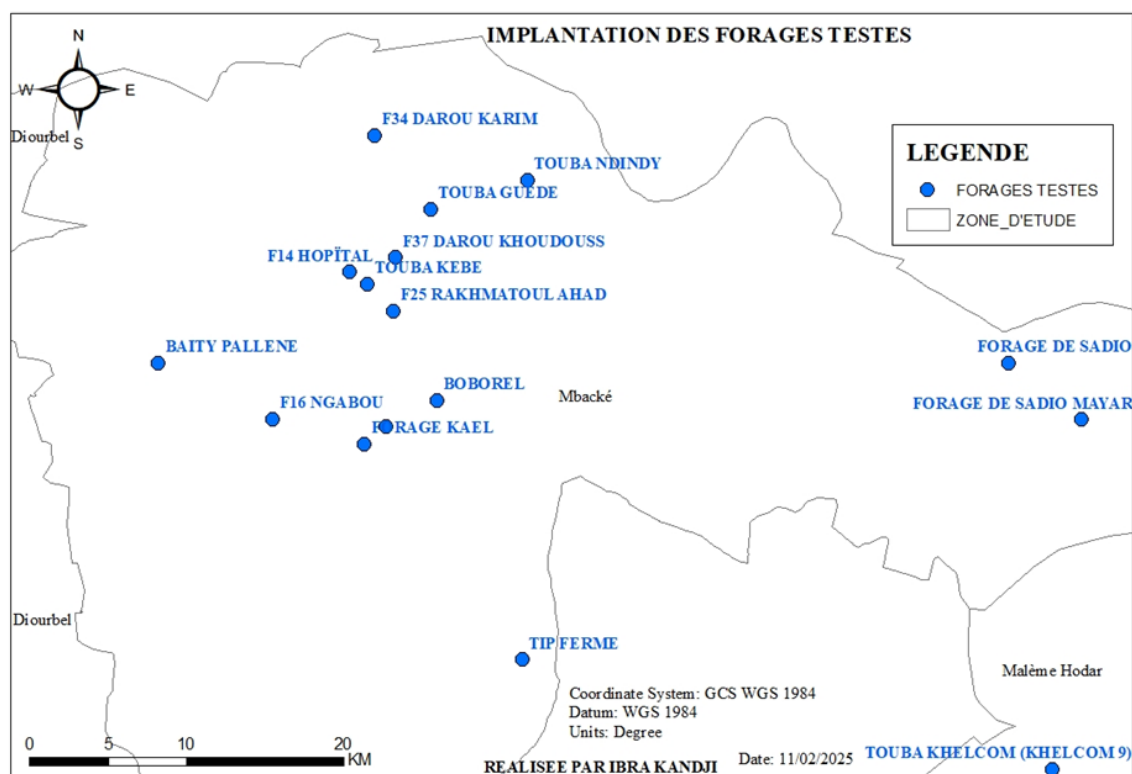


Fig. 3. Implantation des forages testés:

### 3 RESULTATS ET DISCUSIONS

L'analyse et l'interprétation des résultats reposent sur la détermination des quatre (04) paramètres suivants:

#### 3.1 RAPPORT D'ABSORPTION DE SODIUM (SAR)

Après avoir reporté tous les points d'eau des différentes campagnes sur le diagramme de Richards (figure 2) en fonction de la conductivité électrique et la valeur du S.A.R, nous avons déterminé six classes:

- **La classe "C3-S1"**: elle renferme les eaux de qualité moyenne à médiocre. Ces eaux doivent être utilisées avec précaution, nécessitant un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse. Elles peuvent être utilisées pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainé. Cette catégorie des eaux est située sur la partie Sud-Est de Touba (TOUBA KHELCOM).
- **La classe "C1S4"** qui renferme les eaux d'eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles. Son emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse. Ce sont les eaux des forages de TIP FERME et BAITTY PALLENE.
- **Les classes "C4S3" et "C3S4"** qui renferment les eaux de qualité très mauvaise. Elles ne conviennent pas généralement à l'irrigation mais pouvant être utilisées sous certaines conditions: Sol très perméable, bien lessivé, plantes tolérantes aux sels. Elles couvrent une bonne partie des eaux de Touba et se situent plus précisément au nord et un peu au centre de la cité religieuse (voir figures 4 et 5) avec un taux de 31,25% (TOUBA GUEDE, TOUBA NDINDY, F34 DAROU KARIM, F25 RAKHMATOU AHAD et F37 DAROU KHOUDOUSS).
- **La classe "C2S4"** qui renferme les eaux de qualité mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse. Ces eaux représentent 6,25% des eaux testées et se trouvent à l'Est de Touba (FORAGE DE SADIO);
- **La classe "C4S4"** qui est déconseillée pour l'irrigation. Elle est la plus fréquente dans notre zone d'étude avec un pourcentage de 37,5% et se situe au centre, à l'Ouest et au Sud-Ouest de Touba (TOUBA KEBE, BOBOREL, F16 NGABOU, F14 HOPITAL, FORAGE KAEI et FORAGE SAM THIALLE).

Les figures 4 et 5 ci-dessous représentent respectivement la distribution spatiale de la conductivité électrique et celle du SAR sur notre zone d'étude.

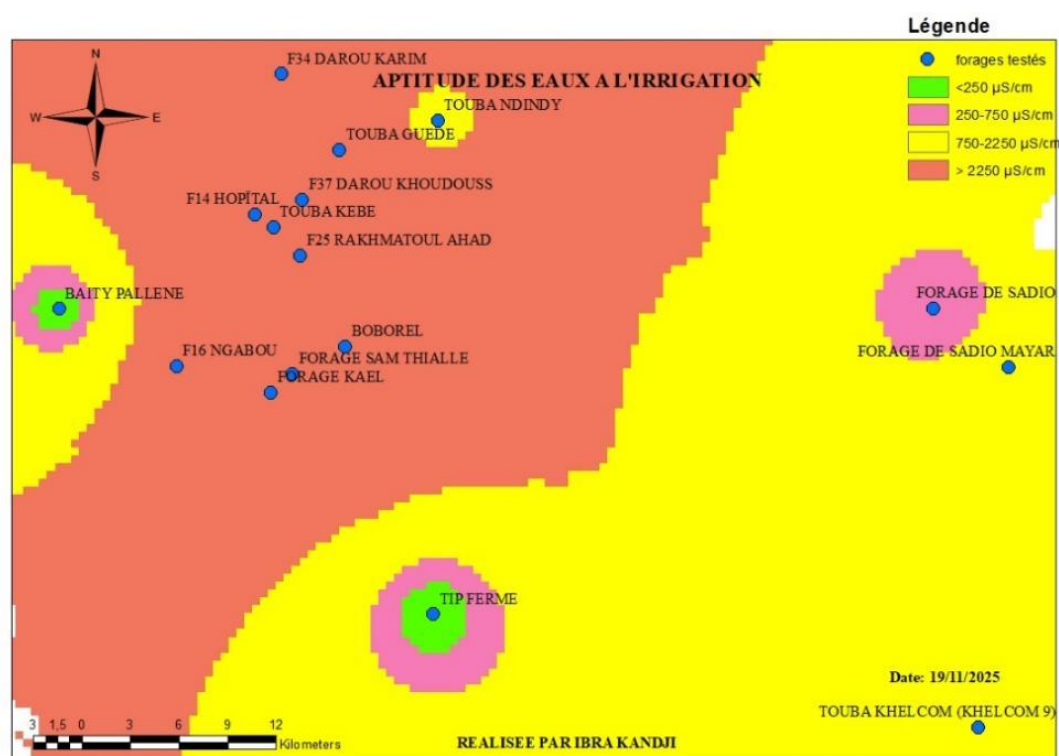


Fig. 4. Distribution spatiale de la Conductivité électrique

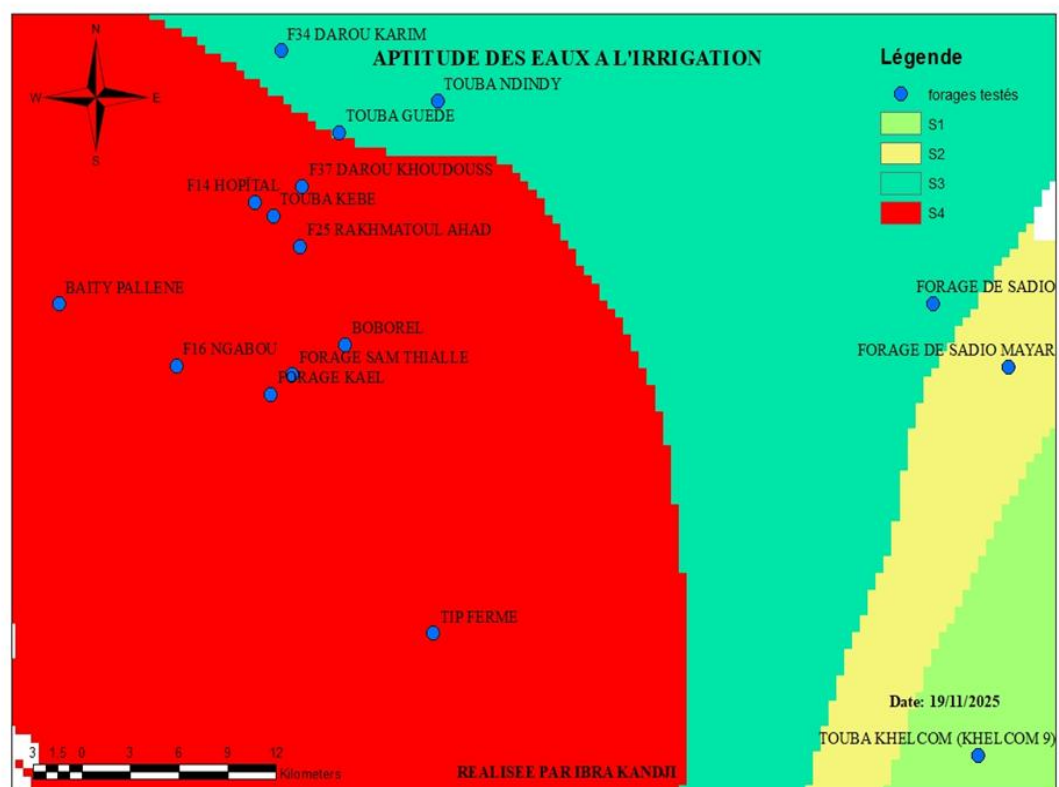


Fig. 5. Distribution spatiale du SAR



### 3.2 RAPPORT D'ABSORPTION DU MAGNÉSIUM (MAR)

Afin d'étudier le risque lié au magnésium, seize (16) forages ont été étudiés. Les résultats ont montré que le risque au magnésium est faible dans la zone d'étude; seul un (01) sur Seize (16) testés, soit un taux de 6,25% dépasse la limite fixée par l'Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) (60%). Il s'agit du forage de SAM THIALLE qui a un coefficient d'absorption de Magnésium de 61,79%, valeur légèrement supérieure à celle de la norme FAO (figure 6).

La figure 6 ci-dessous donne la distribution spatiale du MAR sur notre zone d'étude.

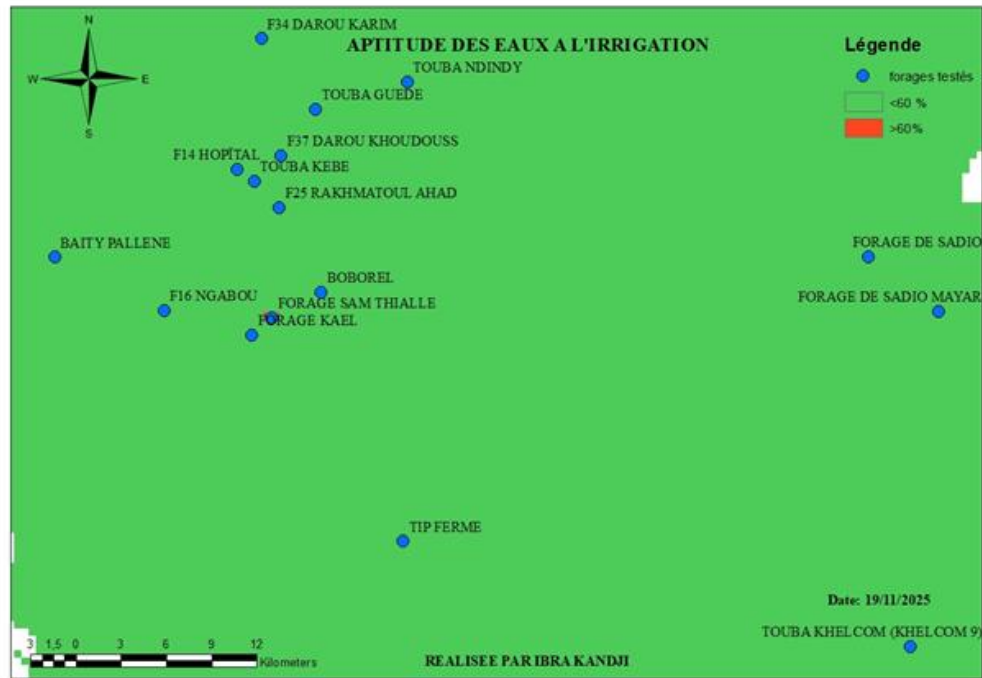


Fig. 6. Distribution Spatiale du MAR

### 3.3 INDICE DE PERMÉABILITÉ DE DONEEN (IP)

Doneen a développé un critère pour évaluer l'adéquation de l'eau d'irrigation sur la base de l'indice de perméabilité tel qu'exprimé dans la section 2.2 Matériel et Méthode-Indice de perméabilité de Doneen (IP). Selon lui, Les eaux avec un indice de perméabilité dépassant 25% sont adaptées à l'irrigation. Par conséquent, toutes les eaux de notre zone d'étude peuvent être utilisées sans aucun danger sur la perméabilité du sol, à l'irrigation car leurs indices de perméabilité dépassent largement 25% (figure 7).

La figure 7 ci-dessous donne la distribution spatiale de l'indice de perméabilité de Doneen (IP) sur notre zone d'étude.



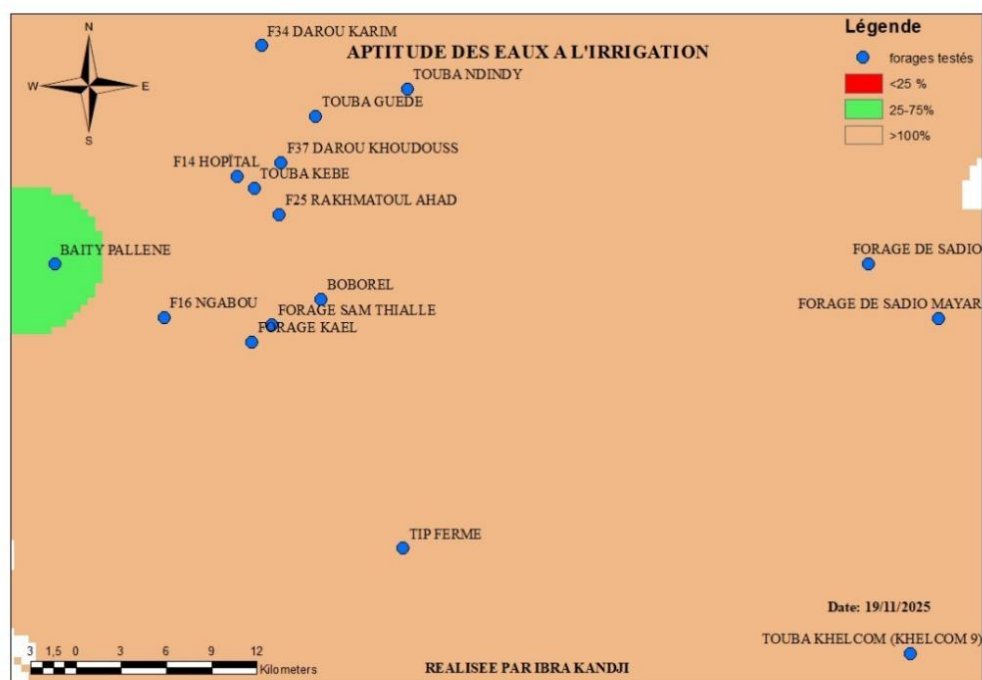


Fig. 7. Distribution spatiale de l'indice de perméabilité de Doneen (IP)

### 3.4 LA SALINITÉ POTENTIELLE (SP)

Afin d'évaluer l'effet des sels de chlorure de sodium et des sulfates de magnésium sur les eaux d'irrigation de Touba et ses environnants, la salinité potentielle (SP) a été étudiée. Les résultats ont montré que la plus plupart des eaux de ces forages sont déconseillées à l'irrigation. seuls trois (03) forages (TOUBA KHEL COM, FORAGE DE SADIO et FORAGE DE SADIO MAYAR) sur seize (16), soit un taux de 18,75% ont une salinité potentielle recommandée par Doneen (figure8).

La figure 8 ci-dessous donne la distribution spatiale de la salinité potentielle (SP sur notre zone d'étude.



Fig. 8. Distribution spatiale de La salinité potentielle (SP)

## 4 CONCLUSION

Les résultats de la présente étude ont contribué à une meilleure connaissance des caractéristiques hydrochimiques du Maastrichtien de Touba. Des données d'une quinzaine de forages reçues de la DGPRE et de l'OFOR répartis dans notre zone d'étude ont été étudiées. Les résultats ont montré que dans notre zone d'étude, à l'exception de SADIO MAYAR et Touba Khelcom, les eaux souterraines sont salées et leur utilisation peut nuire à la croissance de certaines cultures, surtout celles non tolérantes aux sels. Cependant, ces eaux peuvent être utilisées sans aucune impact néfaste sur la perméabilité du sol sur tout l'étendu de notre zone d'étude. Dès lors, il est important de bien maîtriser le type de sol avant l'utilisation de l'eau d'irrigation car la salinité de ces eaux a des impacts négatifs sur les cultures non tolérantes au sel.

## REFERENCES

- [1] MOUSTAPH SANE, « NOTE SUR LES RESSOURCES EN EAUX DU SENEGAL : ZONES POTENTIELLES POUR LE TRANSFERT D'EAU », MINISTERE DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'ASSAINISSEMENT /DIRECTION DE L'HYDRAULIQUE, oct. 2015.
- [2] Abdalkarim S. Gharbia et Salem S. Gharbia, « Groundwater Quality Evaluation for Irrigation Suitable Using Geostatistical Algorithms », janv. 2021, Consulté le: 19 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://orcid.org/0000-0002-0627-5801>.
- [3] S. M'nassri, L. Dridi, A. El Amri, M. Hachicha, et R. MAJDOUB, « Ability of groundwater of the basin of Sidi El Hani for irrigation (Center East of Tunisia) », *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 7, p. 4742-4753, janv. 2016.
- [4] S. K. Gautam, C. Maharana, D. Sharma, A. K. Singh, J. K. Tripathi, et S. K. Singh, « Evaluation of groundwater quality in the Chotanagpur plateau region of the Subarnarekha river basin, Jharkhand State, India », *Sustain. Water Qual. Ecol.*, vol. 6, p. 57-74, sept. 2015, doi: 10.1016/j.swaqe.2015.06.001.
- [5] SOW, « Dynamique spatiale de 1930 à 2020 et gouvernance urbaine de la « ville » de Touba », These de doctorat, Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ), Ziguinchor, 2021.
- [6] S. DIANGAR, « Agronomie du mil et des systemes de cultures à base de mil dans le bassin arachidier.Acquis et perspectives », Institut sénégalaise de recherche agricole (ISRA), Rapport de titularisation, avr. 2000.
- [7] « Conditions climatiques en Touba », hikersbay.  
[En ligne]. Disponible sur: <https://hikersbay.com/climate-conditions/senegal/touba/conditions-climatiques-en-touba.html?lang=fr>.
- [8] A. SARR, « Caractérisation de l'aquifère du quaternaire de la zone de Samba DIA (Sénégal) par approche hydrogéochimique, isotopique et géophysique », These de doctorat, Université Cheikh Anda DIOP de DAKAR, Dakar, 2024.
- [9] L. A. Richards, *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. U.S. Government Printing Office, 1954.
- [10] F. M. Eaton, « Importance des carbonates dans les eaux irriguées », *Soil Science*, vol. 69. 1950.
- [11] A.N. Amadi, T.A. Umore, O.P. Umeugochukwu, et H.O. Nwankwoala, « Suitability of Groundwater in Auchu and Its Environs for Irrigation Purposes », *Pac. J. Sci. Technol.*, vol. 21, nov. 2020.
- [12] Doneen, L. D, « Notes on water quality in agriculture »; Department of Water Science and Engineering, University of California, Davis., California, 1964.
- [13] Szabolcs, I. et K. Darab, *Irrigation, Drainage and Salinity. Int.* in Butchinson Co.: London, U.K. 510. 1968.
- [14] FAO, norme des eaux d'irrigation, 2006.