

Qualité physicochimique des eaux souterraines de Nara (Mali) et impacts sur la santé humaine

Mamadou Mariam TRAORE^{1*}, Abdoukadi Oumarou TOURE², Oumou LY¹,
Farmata YARO¹ et Domo DJIGUIBA¹

¹ *Laboratoire National des Eaux du Mali (LNE), BP 4161, Bamako, Mali*

² *Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako, Faculté d'Histoire et de Géographie (FHG), Bamako, Mali*

(Reçu le 14 Octobre 2024 ; Accepté le 18 Novembre 2024)

* Correspondance, courriel : mamoukante@yahoo.fr

Résumé

L'eau souterraine est une ressource cruciale pour la population de Nara au Mali, elle constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable. L'objectif de cette étude est d'analyser la qualité physicochimique des eaux souterraines de la région de Nara et impacts sur la santé humaine. La démarche méthodologique s'est déroulée en trois phases : la recherche documentaire, les travaux de collecte de données de terrain et d'analyse au laboratoire. Les paramètres in situ (pH, conductivité) ont été mesurés à l'aide d'un multi paramètre LF 197 de marque WTW et un GPS a été utilisé pour la prise des coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude) des points d'eau ; La chromatographie ionique a été utilisée au laboratoire pour l'analyse des nitrates et fluorures. Les principaux résultats montrent que les valeurs des pH varient entre 5,63 et 8,54, les teneurs en fluor oscillent entre 0,001 et 9,656 mg/L, celles des nitrates entre 0,12 et 1 587,70 mg/L et celles des minéralisations entre 27 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 11 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et le tiers des eaux de forages étudiées sont de mauvaises qualités physicochimiques dues à des teneurs en excès de fluor et de nitrate non conformes à la norme du Mali et à la norme OMS. Les teneurs en nitrate supérieures à 50 mg/L peuvent provoquer la méthémoglobinémie ou le cancer digestif. Celles des teneurs en fluorures supérieures à 1,5 mg/L peuvent provoquer la fluorose dentaire et de 3 à 6 mg/L la fluorose osseuse. La consommation humaine de ces eaux de forage non conformes sans traitement constitue des risques sanitaires pour les populations consommatrices. L'osmose inverse ou la filtration membranaire sont des techniques très efficaces pour le traitement de ces types d'eaux. Pour davantage réduire les risques de maladies hydriques, il serait souhaitable que des dispositions idoines soient prises par les autorités régionales afin d'assurer le contrôle et le suivi de la qualité des ressources en eaux.

Mots-clés : *eau souterraine, qualité, physicochimique, impact, Nara.*

Abstract

Physicochemical quality of groundwater in Nara (Mali) and impacts on human health

Groundwater is a crucial resource for the population of Nara in Mali, it is the main source of drinking water supply. The objective of this study is to analyze the physicochemical quality of groundwater in the Nara region and its impacts on human health. The methodological approach was carried out in three phases : documentary research, field data collection and laboratory analysis. In situ parameters (pH, conductivity) were measured using a WTW brand LF 197 multi-parameter and a GPS was used to take the geographical coordinates (longitude, latitude, altitude) of the water points; Ion chromatography was used in the laboratory for the analysis of nitrates and fluorides. The main results show that pH values vary between 5.63 and 8.54, fluoride contents range from 0.001 to 9.656 mg/L, nitrate contents range from 0.12 to 1,587.70 mg/L and mineralization contents range from 27 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 11,740 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and a third of the drill waters studied are of poor physicochemical quality due to excess fluoride and nitrate contents that do not comply with the Mali standard and the WHO standard. Nitrate contents above 50 mg/L can cause methemoglobinemia or digestive cancer. Fluoride contents above 1.5 mg/L can cause dental fluorosis and 3 to 6 mg/L bone fluorosis. Human consumption of these non-compliant drill waters without treatment constitutes health risks for the consuming populations. Reverse osmosis or membrane filtration are very effective techniques for treating these types of water. To further reduce the risks of waterborne diseases, it would be desirable for provisions to be made by regional authorities to ensure the control and monitoring of the quality of water resources.

Keywords : *groundwater, quality, physicochemical, Impact, Nara.*

1. Introduction

Les ressources en eaux souterraines occupent une place de choix dans la politique d'approvisionnement en eau potable des populations rurales et urbaines [1]. Les eaux souterraines sont d'une importance capitale dans la plupart des régions du monde pour l'approvisionnement en eau potable [2]. Dans la majeure partie du monde et surtout dans les pays en développement, l'approvisionnement en eau est devenu un facteur clé de la santé publique et du développement socio-économique [3]. Dans le monde, la mauvaise qualité de l'eau constitue encore une forte menace de santé publique. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime que 80 % des maladies affectant la population mondiale sont directement associées à la qualité de l'eau [4]. L'accès à l'eau potable dans les zones rurales et semi-rurales constitue une préoccupation majeure pour les populations à cause de la qualité de la ressource, l'eau souterraine peut contenir des éléments pouvant avoir des effets indésirables sur la santé, comme des microorganismes pathogènes, des substances indésirables ou même des substances toxiques [5]. Les difficultés d'accès à une eau potable sont la plupart une des principales causes de maladies altérant la santé humaine [6]. L'eau apporte à l'organisme les éléments nutritifs dont il a besoin pour bien fonctionner [7]. L'utilisation intensive des ressources naturelles et l'accroissement des activités humaines engendrent de graves problèmes sur la qualité des eaux souterraines [8]. En outre l'OMS estime que 30 millions de personnes meurent chaque année des suites de la consommation d'une eau insalubre, dont particulièrement les enfants de moins de 5 ans. Ces infections hydriques sont dues aux substances chimiques et aux agents microbiologiques [9]. L'eau est une ressource naturelle limitée, nécessaire à la vie. Elle est la plus importante des ressources naturelles qui rendent la vie possible sur terre tant pour les animaux, les hommes que pour les végétaux [10]. Partout dans le monde, la pression sur les ressources en eau et en particulier sur celles en eau souterraines est à la hausse, principalement en raison de la demande croissante et de la dégradation de la qualité de l'eau de surface [11]. Les eaux souterraines sont des ressources fragiles et limitées, la demande ne fait que croître or la disponibilité et la qualité de cette

ressource restent des défis à relever [12]. Les eaux souterraines sont les ressources en eau privilégiées pour l'eau potable, car elles sont plus à l'abri des polluants que les eaux de surface [13]. La disposition de l'eau en quantité suffisante et en qualité contribue au maintien de la santé [14]. Les régions nord du Mali enregistrent des teneurs en excès de nitrates et de fluor dans les eaux souterraines [15]. La préservation et la sauvegarde de cette ressource est donc une nécessité qui concerne à la fois ses usages et sa valeur environnementale [16]. L'eau insalubre est à l'origine de plusieurs maladies hydriques, surtout dans les pays en développement [17]. Au Mali, le problème se pose avec acuité notamment dans les parties ouest et nord du pays. Dans la région de Nara, située dans la partie occidentale du Mali, la qualité des eaux de certains forages indique qu'elles ne sont pas consommables en raison de la teneur élevée de nitrate et de fluor. La Société Malienne de Gestion de l'eau potable dispose d'un réseau de distribution d'eau potable à travers le pays, la région de Nara n'est pas desservie par ce réseau. A l'absence de ce réseau, la population utilise les eaux de forages pour leurs consommations humaines. Ainsi la consommation humaine de ces eaux de forage sans connaissance de leurs qualités peut avoir des impacts négatifs sur la santé de cette population. L'objectif visé par cette étude est d'analyser la qualité physicochimique des eaux souterraines de la région de Nara et impacts sur la santé humaine. Pour ce faire, nous procéderons à l'analyse de certains paramètres physicochimiques tels que le potentiel hydrogène, le nitrate, le fluor, la conductivité électrique et la conformité des teneurs des éléments chimiques et de l'aptitude des eaux de forage à la consommation humaine.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Zone d'étude

Nara, 14^{ème} région du Mali, a été créée suivant la loi N°2023_0060 / du 13 Mars 2023 portant création des circonscriptions administrative en République du Mali [18] et loi N°2023-007/ du 13 Mars 2023 portant création des collectivités territoriale en République du Mali [19]. La région de Nara se divise en 06 cercles à savoir : le cercle de Nara, le cercle de Ballé, cercle de Dilly, le cercle de Mourdiah, le cercle de Guiré et le cercle de Fallou et les cercles se divisent en communes. Les communes de la région de Nara sont : Gueneibé, Ouagadou, Allahina, Dogofry, Dabo, Dilly, Karonga, Niamana, Madina Kagaro, Guiré, Boudjiguiré, Fallou et Digan. La région de Nara compte une population de 307 777 habitants [19] pour une superficie de 31 213 Km² [20].

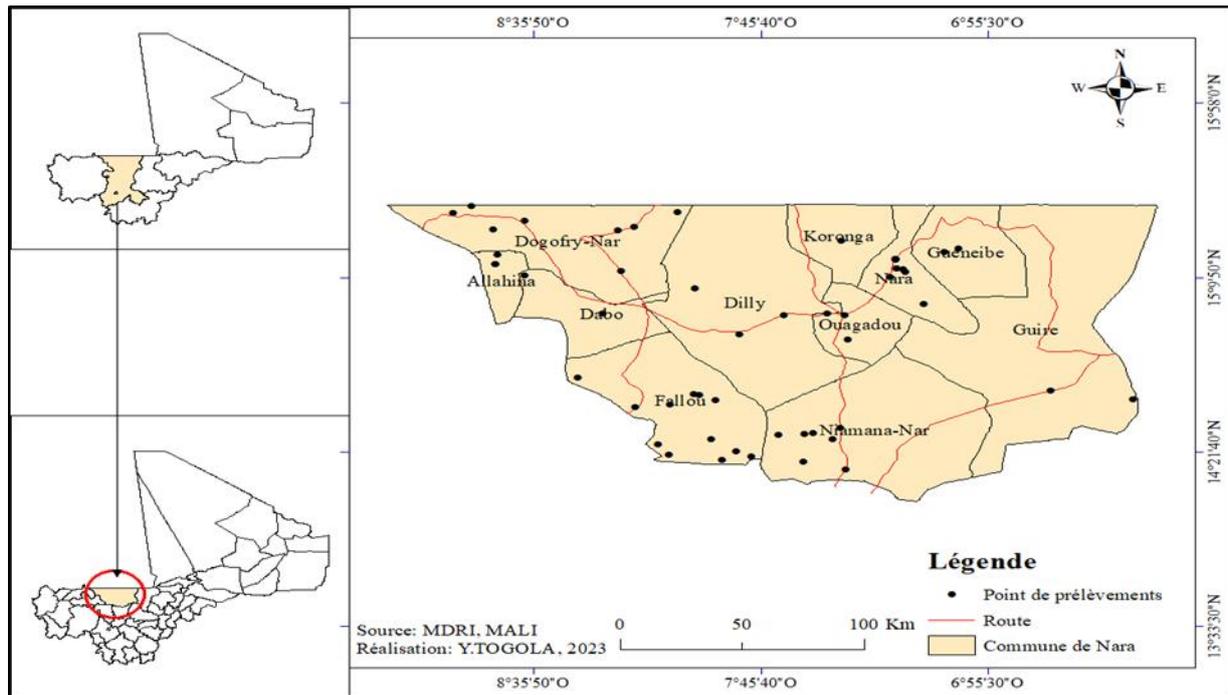


Figure 1 : Carte de présentation de la région de Nara avec les points de prélèvement

2-1-2. Matériel technique

Les matériels utilisés dans le cadre de cette étude comprennent :

- Le GPS (Global Positioning System) ;
- Un conductimètre LF 197 de marque WTW ;
- Un chromatographe ionique de marque Metrohm ;

2-2. Méthodes

2-2-1. Sur terrain

Un GPS est utilisé pour la prise des coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude) des points de mesure ; un conductimètre LF 197 de marque WTW est utilisé pour la mesure de la conductivité électrique.

2-2-2. Au laboratoire

Un Chromatographe ionique de marque Metrohm est utilisé pour mesurer les teneurs en nitrate et en fluorure. Le titreur automatique pH, TA, TAC, TH de marque Metrohm a été utilisé pour la mesure du pH.

2-2-3. Échantillonnage

Pour cette étude, 83 eaux de forages ont fait l'objet de prélèvement. Les échantillons d'eaux ont été prélevés dans des flacons de 1,5 litre, préalablement rincés avec l'eau de forage trois fois et rempli jusqu'au bord sans laisser de vide. Ces échantillons ont été reçus et enregistrés au Laboratoire National des Eaux entre janvier 2019 et juillet 2023.

3. Résultats

Les résultats issus de notre étude sur les eaux souterraines de Nara de 2019 à 2023 se présentent comme suit :

3-1. Présentation des résultats des analyses de 2019 à 2023

En 2019, l'analyse a porté sur 25 échantillons dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Paramètres physicochimiques analysés en 2019

N° Labo	Communes	Village ou Quartier	pH	Cond $\mu\text{S/cm}$	F- mg/L	NO_3^- mg/L
240A19	Dabo 1	Tofara	7,5	632	0,377	6,772
284B19	Dogofry 1	Missira Samoura	7,42	49	0,183	2,186
285B19	Dogofry 2	Makagnari	7,68	959	0,154	22,435
286B19	Dogofry 3	Daradia	6,93	27	0,212	5,156
287B19	Dogofry 4	Djenké	7,79	465	0,194	14,291
288B19	Dogofry 5	Hamaké	5,9	63	0,205	2,711
213D19	Ouagadou 1	Tissilima hamo	7,66	2150	0,451	150,8
229D19	Nara 1	Mourdiah	7,01	540	0,216	9,256
63E19	Nara 2	Toumoudrane	6,89	539	0,111	10,32
64E19	Nara 3	Toules	7,3	1189	0,439	53,786
65E19	Nara 4	Goumbou	6,74	3000	0,502	129,08
66E19	Nara 5	Diagaba	6,79	783	0,102	43,75
224E19	Nara 6	Kéibane	7,49	1024	0,814	66,573
225E19	Nara 7	Kohely	7,5	835	0,188	54,29
226E19	Nara 8	Djiguibougou	7,09	1215	0,542	73,086
227E19	Nara 9	Allahina	7,19	875	0,489	57,709
209F19	Nara 10	Galo	6,19	175	0,001	13,68
324F19	Nara 11	Biné NIAKATE	8,54	2460	0,001	40,227
135G19	Nara 12	Nara	6,1	158	0,170	0,362
136G19	Nara 13	Nara	5,88	141	0,240	1,0713
88H19	Nara 14	nara koregayi F1	6,7	217	0,102	10,304
89H19	Nara 15	nara koregayi F2	7,18	113	0,081	4,98
226K19	Nara 16	Goumbou H1	6,86	502	0,301	6,978
227K19	Nara 17	Goumbou F3SE7)	7,5	469	0,431	5,164
393L19	Nara 18	Sékholé	7,47	2930	2,167	2,398
Norme Mali			$5,5 \leq \text{pH} \leq 9$	≤ 1500	$\leq 0,5$	≤ 50

Source : Base de données du Laboratoire National des Eaux, 2019

Les résultats d'analyses des eaux en 2019 montrent que :

- le pH est conforme à la norme dans l'ensemble. Il a varié entre 5,9 à Hamaké et 8,54 à Biné Niakaté ;
- la conductivité électrique est conforme à la norme dans l'ensemble sauf à Tissilima hamo (2150 $\mu\text{S/cm}$), Goumbou (3000 $\mu\text{S/cm}$), Biné NIAKATE (2460 $\mu\text{S/cm}$) et Sékholé (2930 $\mu\text{S/cm}$). Elle a varié entre 27 $\mu\text{S/cm}$ à Daradia et 3000 $\mu\text{S/cm}$ à Goumbou ;
- la teneur en fluor est conforme à la norme dans l'ensemble sauf à Sékholé 2,167 mg/L, avec une variation de 0,081 mg/L à Nara koregayi F2 et 2,167 mg/L à Sékholé ;
- la teneur en nitrate est conforme à la norme dans l'ensemble excepté au niveau de Tissilima hamo (150,80 mg/L), Toules (53,786 mg/L), Goumbou (129,08 mg/L), Kéibane (66,573 mg/L), Kohely (54,29 mg/L), Djiguibougou (73,086 mg/L), Allahina (57,709 mg/L) ;
- Elle a varié entre 0,362 mg/L à Nara qui est la minimale et 150,80 mg/L la maximale à Tissilima hamo ;

En 2020, l'analyse a porté sur 21 échantillons dont les résultats sont présentés dans le **Tableau** suivant.

Tableau 2 : Paramètres physicochimiques analysés en 2020

N°Labo	Communes	Village ou Quartier	pH	Cond µS/cm	F ⁻ mg/L	NO ₃ mg/L
24B20	Nara 19	Kachida Soniké	8,54	9 400	2,787	95,608
87B20	Fallou 1	Djigué	7,61	530	0,308	53,951
88B20	Fallou 2	N'tibougou	7,32	450	0,264	5,942
87B20	Fallou 3	Djigué	7,61	530	0,308	53,951
88B20	Fallou 4	N'tibougou	7,32	450	0,264	5,942
2D20	Ballé 1	Gassambaro	7,39	1102	0,643	133,94
53E20	Nara 20	Dossorola	8,02	440	0,273	15,07
54E20	Nara 21	Djiguibougou	7,73	11 740	2,041	1422,4
55E20	Dogofry 6	Kassakaré	5,63	305	0,001	118,23
424F20	Fallou 5	Kalabana	7,55	333	0,447	9,84
425F20	Fallou 6	N'Golobana	7,27	67	0,185	4,452
426F20	Fallou 7	Djemene	7,34	326	0,296	69,969
427F20	Fallou 8	Maréna Diarrioso	7,58	326	0,456	1,194
9G20	Fallou 9	Moribabougou	7,27	447	0,258	30,284
10G20	Fallou 10	Moribabougou	7,19	428	0,471	19,756
11G20	Fallou 11	Dialloubé	7,35	1193	0,831	261,08
169H20	Fallou 12	Woloko	6,29	153	0,124	0,124
147J20	Fallou 13	Fallou	6,54	309	0,140	54,152
88L20	Allahina 1	Djinke	6,93	4620	4,189	1587,7
215L20	Guiré 1	Camp de Guiré F1	6,22	1671	0,238	128,62
216L20	Guiré 2	Camp de Guiré F2	6,22	1621	0,238	43,17
Norme Mali			5,5 ≤ pH ≤ 9	≤ 1500	≤ 0,5	≤ 50

Source : Base de données du Laboratoire National des Eaux, 2020

Les résultats d'analyses des eaux en 2020 montrent que :

- le pH est conforme à la norme dans l'ensemble, avec une variation de 5,63 à Kassakaré et 8,54 à Kachida Soniké ;
- la conductivité électrique est conforme à la norme dans l'ensemble sauf à Kachida Soniké (9 400 µS/cm), Djiguibougou (11 740 µS/cm), Djinke (4 620 µS/cm), Camp de Guiré F1 (1 671 µS/cm) et Camp de Guiré F2 (1 621 µS/cm). Elle a varié entre 67 µS/cm à N'Golobana et à Djiguibougou (11 740 µS/cm) ;
- la teneur en fluor est conforme à la norme dans l'ensemble sauf à Kachida Soniké (2,787 mg/L), Gassambaro (0,643 mg/L), Djiguibougou (2,041 mg/L), Kalabana (0,447 mg/L), Maréna Diarrioso (0,456 mg/L), Moribabougou (0,471 mg/L), Dialloubé (0,831 mg/L) et Djinke (4,189 mg/L). Elle a varié entre 0,001 mg/L à Kassakaré et à Djinke (4,189 mg/L) ;
- la teneur en nitrate est conforme à la norme dans l'ensemble à l'exception de Kachida Soniké (95,608 mg/L), Djigué (53,951 mg/L), Gassambaro (133,94 mg/L), Djiguibougou (1 422,4 mg/L), Kassakaré (118,23 mg/L), Djemene (69,969 mg/L), Dialloubé (261,08 mg/L), Fallou (54,152 mg/L), Djinke (1 587,7 mg/L) et Camp de Guiré F1 (128,62 mg/L). Ici on constate que le maximum de teneur en nitrate a été observé dans le village de Djinke avec 1 587,7 mg/L.

En 2021, l'analyse a porté sur 15 échantillons dont les résultats sont présentés dans le **Tableau** suivant.

Tableau 3 : Paramètres physicochimiques analysés en 2021

N° Labo	Communes	Village ou Quartier	pH	Cond $\mu\text{S/cm}$	F- mg/L	NO_3^- mg/L
39D21	Niamana 1	M'Pete	5,87	196	0,002	46,59
40D21	Niamana 2	Gounguede	6,8	779	0,129	1,37
36D21	Fallou 14	Toumoula	6,41	206	0,002	9,63
37D21	Fallou 15	Borodio	7,66	497	0,015	9,98
301D21	Nara 22	Mourdia Camp Militaire	6,94	234	0,029	9,75
444D21	Niamana 3	Bouamadjougou	6,47	231	0,461	41,42
33E21	Niamana 4	Bagoïni	8,28	593	0,019	6,51
34E21	Korongou 1	Tablenco	7,31	2220	0,507	6,32
240E21	Fallou 16	Tionta	7,66	803	0,080	1,68
268E21	Fallou 17	Koron	6,98	231	0,033	18,78
49F21Ba	Dilly 1	Diencoulou	8,08	751	0,137	8,35
245 F21	Nara 23	Dialoubé	7,19	1480	0,006	324,94
285H21	Allahina 2	Borherire	6,47	71	0,034	8,73
178I21	Nara 24	Keibane	7,29	861	0,001	47,09
190I21	Nara 25	Dembassala	6,79	908	0,001	263,76
Norme Mali			$5,5 \leq \text{pH} \leq 9$	≤ 1500	$\leq 0,5$	≤ 50

Source : Base de données du Laboratoire National des Eaux, 2021

Les résultats d'analyses des eaux en 2021 montrent que :

- le pH est conforme à la norme dans l'ensemble et varie de 5,87 à M'Pete et 8,28 à Bagoïni ;
- la conductivité électrique est conforme à la norme dans l'ensemble sauf à Tablenco (2 220 $\mu\text{S/cm}$) avec une variation de 71 $\mu\text{S/cm}$ à Borherire et à Tablenco (2 220 $\mu\text{S/cm}$) ;
- la teneur en fluor est conforme à la norme dans l'ensemble. Elle a varié entre 0,001 mg/L à Keibane et à Tablenco (0,507 mg/L) ;
- la teneur en nitrate est conforme à la norme dans l'ensemble à l'exception de Dialoubé (324,94mg/L) et Dembassala (263,76 mg/L).

La teneur en nitrate est de 1,37 mg/L à Gounguede et à Dialoubé (324,94mg/L). En 2022, l'analyse a porté sur 15 échantillons dont les résultats sont présentés dans le **Tableau** suivant.

Tableau 4 : Paramètres physicochimiques analysés en 2022

N° Labo	Communes	Village ou Quartier	pH	Cond $\mu\text{S/cm}$	F- mg/L	NO_3^- mg/L
116A22	Niamana 5	M'pete	5,63	376	0,124	151,01
182A22	Dilly 2	Karakourou-Peulh	7,04	1211	0,339	57,85
178G22	Nara 26	Nara	6,72	4350	1,147	12,59
179G22	Nara 27	Nara	7,11	4300	0,984	19,86
180G22	Nara 28	Keibané Maure	7,09	2440	0,638	328,44
181G22	Nara 29	Kabida Bambara	7,45	1936	0,838	17,36
182G22	Nara 30	Kabida Bambara	7,41	928	0,830	10,45
183G22	Nara 31	Keibané Maure	7,4	962	9,656	56,24
184G22	Nara 32	Kabida Soninké	6,89	2000	0,498	2,4
185G22	Nara 33	Kabida Soninké	7,02	1943	0,417	21,51
186G22	Nara 34	Keibané Soninké	7,4	918	3,082	1,3
187G22	Nara 35	Keibané Soninké	7,77	802	4,415	9,05
219L22	Gueneibe 1	Gueneibe	7,11	1346	0,487	41,42
220L22	Dilly 3	Dally	7,43	889	0,791	1,38
288L22	Dilly 4	Dina coura	7,38	572	0,156	158,82
Norme Mali			$5,5 \leq \text{pH} \leq 9$	≤ 1500	$\leq 0,5$	≤ 50

Source : Base de données du Laboratoire National des Eaux, 2022.

Les résultats d'analyse des eaux en 2022 montrent que :

- le pH est conforme à la norme dans l'ensemble avec une variation de 5,63 à M'Pete et 7,45 à Kabida Bambara ;
- la conductivité électrique est conforme à la norme dans l'ensemble sauf à Nara (4350 $\mu\text{S/cm}$; 4 300 $\mu\text{S/cm}$), Keibané Maure (2 440 $\mu\text{S/cm}$), Kabida Bambara (1 936 $\mu\text{S/cm}$), Kabida Soninké (2 000 $\mu\text{S/cm}$; 1 943 $\mu\text{S/cm}$). Elle a varié entre 376 $\mu\text{S/cm}$ à M'Pete et à Nara (4 350 $\mu\text{S/cm}$) ;
- la teneur en fluor est non conforme à la norme dans l'ensemble à l'exception de M'pete (0,124 mg/L), Karakourou-Peulh (0,339 mg/L), Kabida Soninké (0,498 mg/L ; 0,417 mg/L), Gueneibe (0,487 mg/L) et Dina coura (0,156 mg/L). Elle a varié entre 0,124 mg/L à M'pete et à Keibané Maure (9,656 mg/L) ;
- la teneur en nitrate est conforme à la norme dans l'ensemble à l'exception de M'pete (151,01 mg/L), Karakourou-Peulh (57,85 mg/L), Keibané Maure (328,44 mg/L ; 56,24 mg/L), et Dina coura (158,82 mg/L).

En 2023, l'analyse a porté sur 7 échantillons dont les résultats sont présentés dans le **Tableau** suivant

Tableau 5 : Paramètres physicochimiques analysés en 2023

N°Labo	Communes	Village ou Quartier	pH	Cond $\mu\text{S/cm}$	F- mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L
165E23	Nara 36	Bague F2	7,66	981	0,177	232,70
480E23	Ballé 2	Barsafé	7,98	1972	0,594	387,18
481E23	Ballé 3	Boulalle	7,49	4830	1,019	1193,71
199F23	Nara 37	Bague M1	7,85	2740	2,475	161,66
200F23	Nara 38	Bague M2	7,65	1533	0,342	247,65
142H23	Nara 39	Nara	8,05	5270	6,119	11,15
143H23	Dilly 5	Dilly	7,88	2510	0,767	26,16
Norme Mali			5,5 ≤ pH ≤ 9	≤ 1500	≤ 0,5	≤ 50

Source : Base de données du Laboratoire National des Eaux, 2023

Les résultats d'analyse des eaux en 2023 montrent que :

- le pH est conforme à la norme dans l'ensemble avec une variation de 7,49 à Boulalle et 8,05 à Nara ;
- la conductivité est non conforme à la norme dans l'ensemble à l'exception de Bague F2 (981 $\mu\text{S/cm}$) avec une variation de 981 $\mu\text{S/cm}$ à Bague F2 et à Nara (5 270 $\mu\text{S/cm}$) ;
- la teneur en fluor est non conforme à la norme dans l'ensemble sauf celles de Bague F2 (0,177 mg/L) et Bague M2 (0,342 mg/L). Elle a varié entre 0,177 mg/L à Bague F2 et (6,119 mg/L) à Nara ;
- la teneur en nitrate est non conforme à la norme dans l'ensemble et varie de 161,66 mg/L à Bague M1 et à Boulalle (1 193,71 mg/L).

3-2. Synthèse générale de la qualité des eaux en fonction des paramètres analysés

Dans le tableau qui suit, nous avons effectué une synthèse de la conformité des paramètres des points d'eau (pH, fluor, nitrate et la conductivité électrique) par rapport à la norme malienne des eaux de consommation humaine.

Tableau 6 : Synthèse générale en fonction des paramètres analysés

Paramètres	pH	%	F- mg/L	%	NO ₃ ⁻ mg/L	%	CE µS/Cm	%
Points d'eau conformes	83	100	61	73	53	64	61	73
Points d'eau non conformes	0	0	22	27	30	36	22	27
Total	83	100	83	100	83	100	83	100

Source : Base de données du Laboratoire National des Eaux, 2024

3-2-1. Interprétation de la synthèse générale de la conformité des paramètres

L'analyse de la synthèse de la conformité des résultats d'analyse de la teneur en fluor, en nitrate, teneur en acidité ou en basicité et de teneur en conductivité électrique par rapport à la norme malienne montre que :

- sur les 83 eaux de forage analysés, le potentiel hydrogène des eaux de forages sont conformes dans l'ensemble donc 100 % ;
- sur les 83 eaux de forage analysés, 73 % des eaux de forage sont conformes par rapport à la teneur en fluor contre 27 % non conformes ;
- sur les 83 eaux de forage analysés, 64 % des eaux de forages sont conformes par rapport à la teneur en nitrate contre 36 % non conformes ;
- sur les 83 eaux de forages analysés, 73 % des eaux de forage sont conformes par rapport à la conductivité électrique contre 27 % non conformes.

4. Discussion

L'étude réalisée sur la qualité physicochimique des eaux souterraines de la région de Nara et ses impacts sur la santé humaine a permis d'analyser la qualité physicochimique des eaux souterraines prélevées de 2019 à 2023. Les résultats obtenus montrent que le pH est conforme à 100 %, 36 % des teneurs en nitrate, 27 % des teneurs en fluor et 27 % des teneurs en conductivité sont non conformes. La consommation humaine de telles eaux sans traitement au préalable impacte négativement la santé des populations de Nara. Ces résultats montrent que les risques sanitaires liés à l'eau de boisson sont bien présents à Nara à cause des teneurs en excès de nitrate, de fluor et la forte minéralisation du tiers des eaux souterraines analysés.

4-1. Impacts sur la santé humaine de la consommation par rapport aux pH

Les pH dans l'ensemble des eaux étudiées, tendent vers le neutre (5,63 - 8,54) sont conformes à la norme Malienne (5,5-9) dans l'ensemble pour les eaux de consommation. Les valeurs des pH sont proches de 7 en moyenne. Donc les eaux de forages dans la zone d'étude ont un caractère neutre. Ces résultats sont similaires à ceux de [21] sur le lac Djètoè dans la commune de Lokossa au Bénin. Selon [22], Les eaux de pH dont les valeurs se situent vers les valeurs neutres ne sont pas agressives. Ces résultats corroborent les études de [23] sur les eaux souterraines en Mauritanie.

4-2. Impacts sur la santé humaine de la consommation d'eaux en excès de nitrate

Les résultats de l'étude par rapport aux nitrates variant entre 0, 12 mg/L à 1 587, 70 mg/L. Ces teneurs sont assez élevées à celles des eaux souterraines de Sokorodji et Sogoniko à Bamako [24]. Selon [14], la variation

des teneurs en nitrate varie entre 0,05 mg/L et 196,20 mg/L dans la ville d'Abidjan est un indicateur de la pollution de la nappe due à la croissance démographique et à l'urbanisation. Selon [25], la consommation d'eau à des teneurs de nitrate dépassant la norme 50 mg/L peuvent être à l'origine de diverses complications sanitaires telles que : irritations, allergies, avortement, cancers et intoxications chimiques.

4-3. Impacts sur la santé humaine de la consommation d'eaux en excès de fluor

Les teneurs obtenues en fluor varient de 0,001 mg/L à 9,656 mg/L. Ainsi, le tiers des eaux souterraines de Nara est fluorée donc non conformes. Ces résultats sont similaires à ceux de [26] dans une commune rurale du Niger où la consommation humaine d'eaux de forage alimentant le réseau d'adduction publique, après deux années d'exposition à des teneurs de fluor de 3,24 à 4,77 mg/L provoqué un désordre du développement osseux chez des jeunes enfants. Selon [27], une intoxication au fluor peut survenir en dépassant les doses recommandées. L'intoxication la plus répandue et également l'un des premiers signes d'intoxication au fluor est la fluorose dentaire qui survient essentiellement durant les sept premières années de vie, et peut aller d'une simple coloration jusqu'à l'hypoplasie pouvant affecter la forme générale de la dent. La fluorose dentaire n'intervient chez l'homme que suite à l'apport de doses supérieures à 1,5 mg/L. On note des intoxications plus générales en buvant une eau concentrée à 8-10 ppm de fluor pendant 10 ans. Elles peuvent atteindre le système squelettique, endocrinien, cardio-vasculaire, gastro-intestinal, respiratoire. Elles peuvent aussi provoquer des manifestations neurologiques et également des effets hépatiques et rénaux. Selon [28], la présence du fluor à une faible teneur, inférieure à 0,8 mg/l pour les pays chauds et à 1,5 mg/L pour les pays tempérés dans l'eau de consommation est nécessaire pour la santé humaine. Des teneurs comprises entre 1,5 mg/L et 4 mg/L de fluor, les eaux de boisson peuvent provoquer la fluorose dentaire et pour des teneurs supérieures à 4 mg/L, il y'a risque de fluorose osseuse. L'OMS rapporte qu'à l'échelle mondiale, les maladies bucco-dentaires touchent près de 3,5 milliards de personnes, dont trois sur quatre vivent dans des pays à revenu intermédiaire [29]. Dans la zone d'étude, nous avons observés des teneurs en fluor dépassant largement la valeur critique des normes de l'OMS et du Mali. Les sources de contamination des eaux seraient profondes et sont liées à la lithologie argileuse du principal aquifère du continental intercalaire/hamadien [30]. La teneur maximale de fluor de notre étude étant 9,656 mg/L de fluor dans les eaux, corroborent avec ceux de cet auteur.

4-4. Causes de minéralisation des eaux souterraines

Les valeurs des conductivités électriques varient entre 27 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 11 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces eaux souterraines sont salées dues aux ions nitrates. Le tiers des teneurs obtenues sont non conformes à la norme Malienne (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les valeurs de la conductivité obtenue sont supérieures à celles enregistrées dans la région du Béliér en Côte d'Ivoire [31], la composition chimique d'une eau issue du milieu naturel dépend généralement de la nature géologique du sol d'où elle provient et aussi des substances réactives qu'elle rencontre lors de son écoulement. Les valeurs des conductivités de notre étude concordent d'avec celles obtenues en Merdja en Algérie [32] dont les eaux souterraines sont soumises à deux types de facteurs de minéralisation : le premier type comprend des facteurs naturels directement liés à la lithologie de l'aquifère et le second facteur est dû à l'effet des conditions climatiques, où la température élevée en été atteint 45°C provoquant ainsi une évaporation intense et donc une forte concentration en sel. Ceci entraîne une augmentation de la salinité de l'eau d'où l'enregistrement des eaux de conductivités entre 500 et 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Selon [33], les phénomènes qui gouvernent la minéralisation des eaux souterraines sont la minéralisation-temps de séjour, la pollution par intrusion marine et lagunaire et la pollution anthropique par ces apports superficiels.

5. Conclusion

Cette étude a permis d'analyser la qualité physicochimique des eaux souterraines de Nara. Les résultats d'analyses ont montré des non conformités par rapport aux teneurs en fluor, en nitrate et en conductivité électrique. Sur le plan physicochimique, les résultats montrent que les eaux sont légèrement neutres ($5,63 < \text{pH} < 8,54$), des teneurs en fluor entre ($0,001 \text{ mg/L} < \text{F} < 9,656 \text{ mg/L}$), des teneurs en nitrates entre ($0,12 < \text{NO}_3^- < 1\,587,70 \text{ mg/L}$) et fortement minéralisées ($27 \mu\text{S/cm} < \text{CE} < 11\,740 \mu\text{S/cm}$). Les paramètres physico-chimiques sont en majorités conformes à la norme Malienne d'une eau de consommation humaine et à la norme OMS, à l'exception de 36 % des teneurs en nitrate des eaux de forge, 27 % des teneurs en fluor des eaux de forage et 27 % des teneurs en conductivité électrique des eaux de forage. La consommation humaine des eaux non conformes sans traitement impacte négativement la santé humaine des populations de Nara en outre les petits enfants de 0 à 5 ans et les femmes enceintes sont les plus vulnérables aux risques sanitaires liés à la consommation de ces eaux. En outre, la consommation humaine des eaux de mauvaise qualité peut provoquer la fluorose dentaire, la fluorose osseuse quand il y a excès de fluor, la méthémoglobinémie chez le nourrisson, le cancer gastrique chez l'adulte, pour les nourrissons des troubles graves apparaissent. L'origine de la minéralisation de ces eaux souterraines est naturelle liée à l'altération chimique des roches et des évaporites. La filtration membranaire ou l'osmose inverse permettent de corriger ces non conformités et de contribuer à la réduction des maladies liées à la consommation humaine de ces eaux. Les autorités nationales et régionales devront accentuer la sensibilisation des populations et surtout procéder au contrôle de la qualité des eaux avant leur consommation.

Références

- [1] - T. D. SORO, O. L. BLE, G. Y. M. KONE, Y. M. S. OGA et N. SORO, Qualité et origine de la minéralisation des eaux souterraines du département de grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Adv. Res.*, 10 (09) (2021) 359 - 367
- [2] - O. A. ADJIRI, B. KONE, N. AKA, I. DJABAKATE et B. DIBI, Caractérisation physico-chimique et source de la minéralisation des eaux souterraines des départements de Daloa et Zoukougbeu, (Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 13(4) (2019) 2388 - 2401
- [3] - K. EDITH, G. BATI, B. FLORENT, et B. DJIMAKO, Etude de la qualité des eaux souterraines et leur aptitude à la consommation : cas de la ville de Moundou (Sud-Ouest du Tchad). *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, (2023) 2429 - 5396
- [4] - A. BAKAYOKO, T. GBAGBO, S. KPAIBE, J. CLAON, K. SACKOU, N. AMIN et L. KOUADIO, Qualité physicochimique et bactériologique des eaux de consommation à BOGUEDIA de 2014 A 2018. *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, (2022) <https://www.researchgate.net/publication/378104123>
- [5] - F. K. E. OTCHOUMOU, O. B. YAPO, B. DIBI et A. C. BONNY, Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de Bingerville. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11 (5) (2017) 2495 - 2509
- [6] - A. H. RABEARISOA, V. HARINANDRASANA, H. RABEARISOA, J. C. R. RAKOTOZAFY, B. RAZANAMPARANY et S. N. RANDIMBIARISON, Risques sanitaires liés à la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de source souterraine d'Igaga, Fianarantsoa (Madagascar). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 17 (7) (2023) 3037 - 3046
- [7] - T. MARTIN, L. M. R. FELICIEN, M. K. M. ADONAI, M. N. PROMESSE, O. J. MAURILLE, Evaluation de la Qualité Physico-Chimique et Microbiologique des eaux de Puits Consommées dans le Quartier Kombé à Brazzaville. *European Scientific Journal*, Edition, Vol. 20, N°12 (2024)

- [8] - J. P. MEHOUNOU, R. G. JOSSE, P. DOSSOU-YOVO, S. F. SENOU et R. M.TOKLO, Caractérisation physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines et superficielles dans la zone de production cotonnière d'Aplahoué. *Journal of Applied Biosciences*, 103 (2016) 9841 - 9853
- [9] - S. F. R. O. SENOU, R. G. JOSSE, R. M. TOKLO, K. J. FATOMB2, N. TOPANOU et B. COULOMB, Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la ville de Bembèrèkè au Nord-Est du Bénin. *International Journal of Innovation and Applied*, Vol. 23, N° 1 (2018). <http://www.ijias.issr-journals.org/>
- [10] - A. O. DENONSI, N. AGOÏNON et J. B. K. VODOUNOU, Qualités physiques, chimiques et bactériologiques de l'eau de puits dans la commune de Ouessè, centre-Bénin. *Afrique SCIENCE*, 22 (4) (2023) 47 - 61, <http://www.afriquescience.net>
- [11] - M. B. I. OUMAROU, M. M. A. ADAMOU et S. T. T. AGI, Caractérisation physicochimique des eaux de la nappe phréatique de la vallée de Boghol, commune de Dabaga/Agadez (Niger). *European Scientific Journal*, Edition Vol. 18, N°21 (2022)
- [12] - R. E. MOUSTAINÉ, A. CHAHLAOUI, E. H. ROUR, D. BENGOUNI et M. L. BELGHITI, Étude de la qualité bactériologique et physico-chimique des eaux de certains puits et sources par l'utilisation d'une analyse en composantes principales (ACP) : Une étude de cas de la région de Meknès (MAROC). *Les technologies de Laboratoire*, Vol. 8, N°33 (2013)
- [13] - E. O. HOUNSOUNOU, M. A. D. CHIBOZO, N. C. KELOME, E. W. VISSIN, G. A. MENSAH et AGBOSSOU, Pollution des eaux à usages domestiques dans les milieux urbains défavorisés des pays en développement : Synthèse bibliographique. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 10 (5) (2016) 2392 - 2412
- [14] - M. HANE, I. DIAGNE, M. NDIAYE, B. NDIAYE, C. T. DIONE, D. CISSE et A. DIOP, Etude comparative de la qualité physico-chimique des eaux de puits et de forage consommées dans la commune de Sinthiou Malème dans la région de Tambacounda (Sénégal). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 14 (9) 2020) 3400 - 3412
- [15] - A. Z. TRAORE, H. BOKAR, A. SIDIBE and K. U. B. O. DOCHARTAIGH, "Atlas de l'eau souterraine en Afrique", Ed. hydrogéologie du Mali, Londres, (2018)
- [16] - R. K. OROU, K. J. COULIBALY, G. A. TANO, E. K. AHOUSI, P. E. K. KISSIEDOU, D. T. SORO et N. SORO, Qualité et vulnérabilités des eaux d'aquifère d'altérites dans les sous-préfectures de grand-Morié et d'Azaguié dans le département d'Agbobille au sud-est de la Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 28 (2016) 243 - 272
- [17] - N. E. B. TAMUNGANG, N. F. BIOSENGAZEH, M. N. ALAKEH et D. Y. TAMEU, Contrôle de la qualité des eaux domestiques dans le village Babessi au Nord-Ouest Cameroun. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 10 (3) (2016) 1382 - 1402
- [18] - DGATM, Direction Générale de l'Administration du Territoire du Mali, Création des circonscriptions administratives en République du Mali "Bamako, (2023) 350 p. <http://www.google.fr>
- [19] - INSAT, "Institut National de la Statistique du Mali, Cinquième recensement général de la population et de l'habitat RGPH5 "Bamako, (2023) 56 p. <http://www.google.fr>, Rapport technique décennal
- [20] - IGM, "Institut Géographique du Mali, *Cartographie Nationale du Mali*" Bamako, (2023) 350 p. Rapport d'activité annuel
- [21] - F. E. DOVONOU, W. ATCHICHOE, G. BANKOLE. F. ADANDEDJI, Évaluation de la qualité écologique de l'eau du lac Djètoè dans la commune de Lokossa. *Afrique SCIENCE*, 23 (1) (2023) 79, <http://www.afriquescience.net>
- [22] - K. E. AHOUSI et Armand Patrick YAPO, Étude de la minéralisation des eaux de surface en éléments traces métalliques (ETM) des zones d'orpaillage de la sous-préfecture de Kokumbo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 19 (4) (2021) 36 - 50, <http://www.afriquescience.net>

- [23] - S. ISSELMOU, E. M, B. A. DICK, H. CHAAIR, K. DIGUA, A. K. MAHMOUD, M. FAJEL, A. M. YAHYA, K. B. HOURIA, D. AMEL et I. YOUM, Caractérisation et étude physicochimique pour la valorisation des points d'eaux au Nord de la Mauritanie (CAR de la zone d'Inchiri et Nouadhbou). *Int. J. Adv. Res.*, 5 (7) (2017) 41 - 47
- [24] - F. KONARE, S. KEITA, M. A. KONARE et M. M. TRAORE, Etude comparative de la qualité physicochimique des eaux souterraines à Sorodji et Sogoniko. *International Journal of Applied Science and Research*, Vol. 6, (4) (2023)
- [25] - K. E. AHOUSSE, S. LOKO, Y. B. KOFFI, G. O. Y. M. S. SOLANGE et N. SORO, Evolution spatio-Temporelle Des Teneurs en Nitrates Des Eaux Souterraines De La Ville d'Abidjan (CÔTE D'IVOIRE). *Int. J. Pure App. Biosci.*, 1 (3) (2013) 45 - 60
- [26] - A. BAKAYOKO, T. GBAGBO, S. KPAIBE, J. CLAON, K. SACKOU, N. AMIN et L. KOUADIO, *Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique*, (2022) <https://www.researchgate.net/publication/378104123>
- [27] - HAROUN NOURADINE, "Evaluation des ressources en eau dans les aquifères de Socle dans la région du Guera (Tchad) : combinaison d'approches géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, géochimiques et d'apprentissage automatique ", Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement, Faculté des Sciences, 310 p.
- [28] - S. M. RABLOU, M. A. M. MOUSBAHOU, M. S. LAOUALI, N. IBRAHIM et I. HABOU, Caractérisation Physico-Chimique des Eaux Souterraines du Socle de La Région de Zinder (Niger) pendant la saison des pluies et la saison sèche. *European Scientific Journal*, édition Vol. 14, N°27 (2018)
- [29] - OMS, "Organisation Mondiale de la Santé, Rapport de situation sur la santé bucco-dentaire dans le monde : vers la couverture sanitaire universelle pour la santé bucco-dentaire d'ici à 2030 "Genève, Rapport annuel, (2022) 20 p.
- [30] - SANDAO, A. K. H. SALEY, M. B. GAMBO HALADOU, M. MAMAN MOUSSA et B. OUSMANE, Teneur en Fluor dans les eaux souterraines et ses impacts dans l'alimentation en eau des populations du Nord-Ouest de la Région de Zinder, Niger. *Afrique SCIENCE*, 15 (5) (2019) 340 - 351, <http://www.afriquescience.net>
- [31] - K. M. EHOUSSE, A. M. KOUASSI et B. KAMAGATÉ, Caractérisation hydrogéochimiques des aquifères fissurés de la région du Bélier, centre de la Cote d'Ivoire, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 33 (2019) 137 - 160
- [32] - L. GOUADIA, M. LAOUAR, N. DEFALIA et N. ZENATI, Origine de la minéralisation des eaux souterraines d'un aquifère dans la zone semi-aride, cas de la nappe de la Merdja, Nord - Est Algérien. *International Journal of Environment and Water*, Edition Vol. 6, Issue 2 (2017)
- [33] - T. D. SORO, O. L. BLE, G. Y. M. KONE, Y. M. S. OGA et N. SORO, Qualité et origine de la minéralisation des eaux souterraines du département de grand-Lahou (Sud-Ouest de la Cote d'Ivoire). *Int. J. Adv. Res.*, 10 (09) (2021) 359 - 367