

Use of in situ analyses to assess salinity risk in the interdune ponds of the southern Korama valley (Niger).

Résumé

Contexte : Depuis le milieu des années 1990, dans la bande sud de la vallée de la Korama, au sud de Zinder, le retour des pluies se traduit par un regain hydrique, suivi d'un phénomène encore nouveau dans la zone : la salinisation des eaux des cuvettes interdunaires.

Méthodes : L'eau de 21 cuvettes a été analysée in situ au cours de deux campagnes (janvier et avril 2026). Quatre paramètres ont été mesurés à l'aide d'un appareil multifonction portatif : la conductivité électrique (CE), le total des solides dissous (TDS), la salinité et le pH. Un indice de risque de salinisation (IRS), construit à partir des seuils de classification de la CE et du TDS, a été calculé puis interpolé (IDW).

Résultats : La qualité de l'eau se dégrade nettement entre les deux campagnes : en moyenne, la CE est multipliée par 3,9 et le TDS par 3,2. À Kaba, la CE passe de 3 266 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en janvier à 19,6 dS/m en avril, sous l'effet de la concentration évaporative de fin de saison sèche. Le pH atteint des valeurs fortement alcalines, jusqu'à 9,8 à Kaba et 9,71 à Garin Zado. L'IRS distingue un foyer structurel à Dungass, stable d'une saison à l'autre, et un foyer émergent à Bandé, où l'aggravation saisonnière est la plus marquée.

Conclusion : Ces résultats confirment une salinisation locale des eaux, surtout en fin de saison sèche, dans des zones où la remontée de la nappe alluviale subaffleurante dissout les formations salifères du Continental Terminal, menaçant le principal capital de production en zone rurale.

Mots-clés : *Korama, salinisation, physico-chimie de l'eau, conductivité électrique, cuvettes, Niger.*

Abstract

Background: Since the mid-1990s, the return of rainfall in the southern strip of the Korama valley, south of Zinder (Niger), has expanded the water bodies of interdune ponds, followed by a phenomenon new to the area: water salinization.

Methods: Water from 21 ponds was analysed in situ during two field campaigns (January and April 2026). Electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), salinity and pH were measured with a portable multiparameter meter. A salinization risk index (SRI), based on EC and TDS classification thresholds, was computed and interpolated (IDW).

Results: Water quality deteriorated markedly between campaigns: mean EC increased 3.9-fold and TDS 3.2-fold. At Kaba, EC rose from 3,266 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in January to 19.6 dS/m in April due to evaporative concentration at the end of the dry season, and pH reached 9.8. The SRI identifies a structural hotspot at Dungass, stable across seasons, and an emerging hotspot at Bandé, where seasonal worsening is strongest.

Conclusion: Surface waters undergo local salinization, mainly at the end of the dry season, where the rising shallow alluvial aquifer dissolves salt-bearing Continental Terminal formations, threatening the main rural production asset.

Keywords: *Korama, salinization, water physico-chemistry, electrical conductivity, interdune ponds, Niger.*

1. Introduction

Dans les régions arides et semi-arides, la salinisation des eaux et des sols est l'une des principales causes de dégradation des terres. Les sels dissous se concentrent par évaporation, d'autant plus vite que la nappe est proche de la surface ou que l'on irrigue avec des eaux déjà chargées (Ayers & Westcot, 1985 ; Shokri et al., 2024). Les bassins endoréiques y sont particulièrement exposés, puisque l'eau n'y trouve aucun exutoire. La salinité y augmente vers les points bas terminaux, où la dissolution des minéraux et l'évapotranspiration se cumulent (Wang et al., 2025).

Au Sahel central, les pluies sont revenues depuis le milieu des années 1990, et avec elles une hausse des écoulements de surface et une remontée des nappes. C'est ce que l'on appelle le « paradoxe hydrologique sahélien » (Descroix et al., 2018 ; Leblanc et al., 2008). Dans la bande sud de la vallée de la Korama, au sud de la région de Zinder, les plans d'eau des cuvettes interdunaires de Kwaya, Bandé et Dungass s'étendent depuis. En 2024, lors d'une enquête auprès de 293 ménages, de nombreux exploitants ont signalé d'eux-mêmes que l'eau des cuvettes se dégradait et que des croûtes salines apparaissaient sur les berges.

Au Niger, la salinité a d'abord été étudiée sur les sols irrigués de la vallée du fleuve. Guero et Bozza (1992) ont relié fertilité des sols et salinité dans les zones sahélienne et saharienne du pays. À Kollo, Ducloux et al. (1994) ont décrit la minéralogie des efflorescences salines des sols rizicoles, et Issifou Adam (2011) a cartographié finement la salinité d'un périmètre irrigué, montrant une structure spatiale stable d'une saison à l'autre. Dans l'Est nigérien, les cuvettes oasiennes du Manga, dans le département de Gouré, offrent le cas le plus proche du nôtre. Barké et al. (2017) les interprètent comme les vestiges d'un réseau hydrographique démantelé par les dunes, à l'image des cuvettes interdunaires de la Korama. Ambouta et al. (2018) y observent une minéralisation de la nappe plus forte au centre qu'en bordure des cuvettes, un faciès bicarbonaté sodique à Iskour et un remplissage récent coiffé d'une couche évaporitique pouvant atteindre une douzaine de mètres ; au centre de la cuvette de Balla, l'eau est impropre à la boisson et de mauvaise qualité pour l'irrigation. Dans les cuvettes où la nappe est proche de la surface, des croûtes de natron se forment en saison sèche et sont exploitées chaque année (Illou, 2018), et les exploitants comptent la salinité parmi leurs contraintes de production (Malam Assane et al., 2021).

Dans le bassin de la Korama, les travaux portent surtout sur les eaux souterraines. La minéralisation des eaux de la région de Zinder et la géochimie des aquifères du Continental Terminal et de la Korama sont connues (Amadou et al., 2014 ; Issa et al., 2015 ; Souley Moussa et al., 2018) : la conductivité y varie de quelques dizaines à plus de 2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ selon l'aquifère, sous l'effet du temps de séjour et de la dissolution des minéraux, tandis que l'aquifère de la Korama reste faiblement minéralisé (35 à 83 $\mu\text{S}/\text{cm}$; Issa et al., 2015). Dans

le haut bassin, à Droum, la nappe phréatique est très peu minéralisée (CE de 23 à 246 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et apte à l'irrigation (Souleymane et al., 2020a) ; les isotopes stables y révèlent des eaux de recharge marquées par l'évaporation et des échanges entre aquifères (Sandao et al., 2018). Les études menées à Dogo-Dogo et à Gouchi ont caractérisé l'hydrogéologie et la qualité sanitaire des eaux souterraines, les dépassements concernant surtout l'arsenic, les nitrates et les bactéries (Souleymane et al., 2022, 2024). Dans la vallée voisine du Goulbi N'Kaba, la minéralisation de la nappe alluviale augmente de l'amont vers l'aval avec le temps de contact eau-roche (Yahouza et al., 2018). Les eaux de surface des cuvettes de la Korama, en revanche, n'ont à notre connaissance jamais été suivies : ni leur chimie, ni ses variations saisonnières, ni ce qu'elles impliquent pour l'arrosage et l'abreuvement. Ces cuvettes sont loin de tout laboratoire et d'aucun réseau de suivi. Un appareil portatif utilisé directement sur le terrain permet de contourner cette difficulté.

Cet article décrit la salinité des eaux de 21 cuvettes de la bande sud de la Korama à partir de mesures physico-chimiques in situ, puis en tire un indice spatialisé du risque de salinisation. Il s'agit plus précisément (i) de mesurer comment quatre paramètres (CE, TDS, salinité et pH) évoluent entre le début et la fin de la saison sèche ; (ii) de situer ces eaux par rapport aux référentiels internationaux pour l'irrigation et l'abreuvement ; (iii) de cartographier le risque et d'en localiser les foyers.

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude comprend les communes rurales de Kwaya et de Bandé (département de Magaria) et de Dungass (département de Dungass), dans le sud de la région de Zinder, à la frontière du Nigéria (Figure 1). Le terrain s'abaisse d'ouest (Kwaya) en est (Dungass) : c'est dans ce sens que l'eau s'écoulerait si l'endoréisme venait à se rompre.

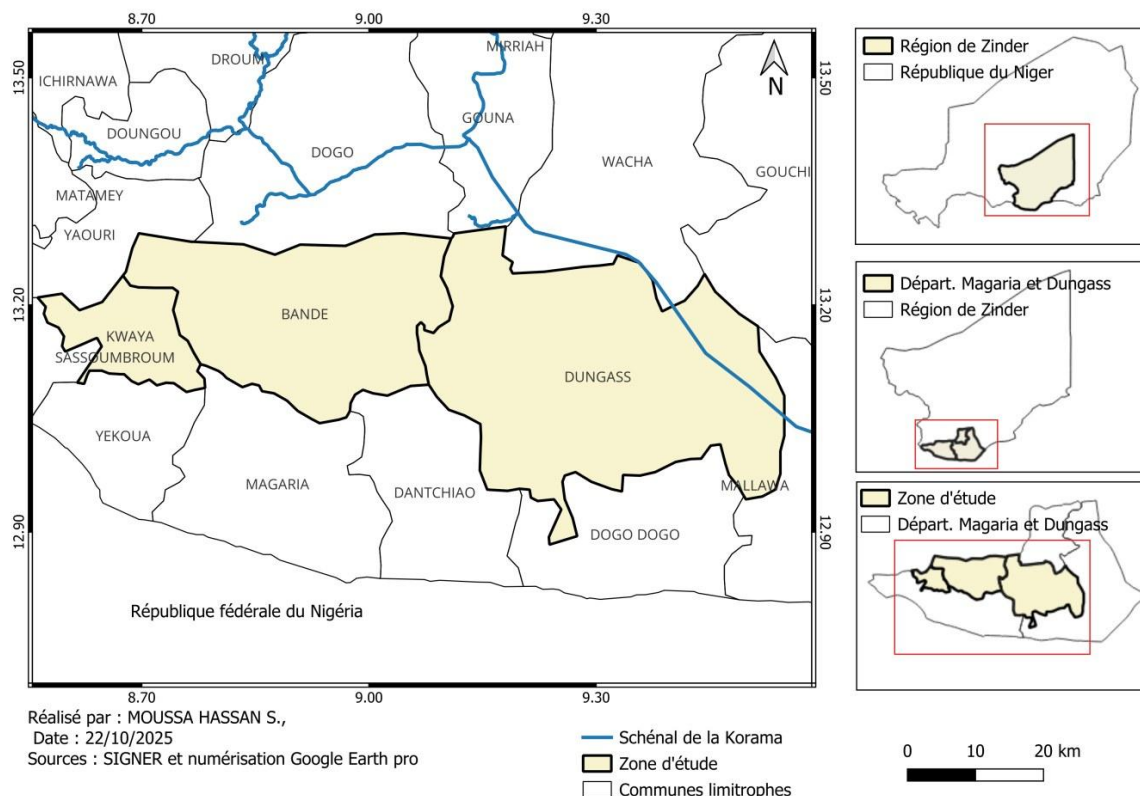


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Source : SIGNER et numérisation Google Earth Pro ; réalisation : Moussa Hassan S., 2025

La zone repose sur le Continental Terminal du bassin des Iullemmeden, fait de grès argileux et de sables fins, avec par endroits des niveaux salifères, évaporitiques ou carbonatés. C'est dans ces formations que se trouve l'aquifère alluvial de la Korama. Sa profondeur varie en général de 0 à 20 m (Souleymane et al., 2020b) et il est subaffleurant dans la plupart des bas-fonds. Nappe et eaux de surface échangent donc très rapidement. En saison des pluies, les cuvettes rechargent la nappe ; ensuite, la nappe remonte et garde les zones humides en eau longtemps après les dernières pluies (Alpha Gado, 2021).

Le modelé est dominé par des dunes quaternaires, surtout transversales (Malam Abdou, 2014). Entre elles s'insèrent des cuvettes fermées, dont chacune fonctionne comme un petit bassin endoréique, comme les cuvettes oasiennes du Manga dont la forme et l'orientation sont commandées par les cordons dunaires (Barké et al., 2017). Les sols sont sableux sur les sommets dunaires, sablo-limoneux dans les cuvettes maraîchères et argilo-sableux dans certaines plaines ; les bas-fonds portent des sols hydromorphes plus argileux. Le climat est sahélo-soudanien, avec 400 à 600 mm de pluie par an, de juin à septembre. La saison sèche qui suit est longue et chaude, et l'évapotranspiration y est forte. Après la sécheresse des années 1970 et 1980, les pluies ont repris à partir de 1994 et les cumuls extrêmes se sont multipliés, en particulier en 2020 et en 2024. Les surfaces en eau des cuvettes se sont alors fortement étendues.

2.2. Choix des sites de prélèvement

Le réseau compte 21 cuvettes : 13 à Bandé, 4 à Kwaya et 4 à Dungass (Figure 2). Bandé en a davantage parce que la commune concentre la plupart des cuvettes permanentes et semi-permanentes visibles sur les images Sentinel. Les sites correspondent aux dix villages de l'enquête ménage de 2024, auxquels s'ajoutent les chefs-lieux de Bandé et de Kwaya, ce qui permet de comparer directement la chimie de l'eau et ce qu'en disent les habitants. Toutes les cuvettes retenues ont un fort potentiel hydrique. Elles se trouvent dans les secteurs d'où les services communaux de l'agriculture reçoivent des demandes d'aide pour récupérer des terres.

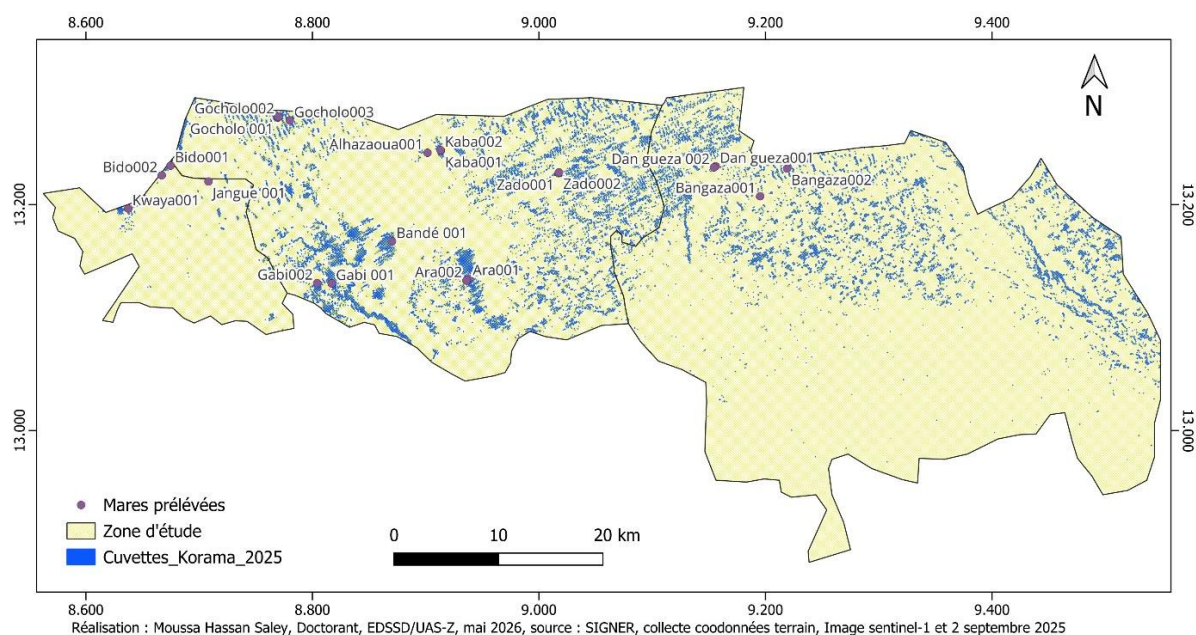


Figure 2 : Localisation des 21 cuvettes prélevées en janvier et avril 2026

Réalisation : Moussa Hassan S., mai 2026 ; sources : SIGNER, relevés GPS de terrain, images Sentinel-1 et 2 (septembre 2025)

Dans chaque cuvette, le point de mesure devait remplir trois conditions. Il devait d'abord être à l'écart des zones de piétinement du bétail, de lavage et de rejets domestiques. L'eau devait ensuite être assez profonde pour immerger la sonde et le flacon sans toucher le fond, car des sédiments remis en suspension auraient faussé la mesure. Enfin, le point était placé dans la partie la plus étendue du plan d'eau, pour que l'échantillon représente la masse d'eau principale.

2.3. Stratégie de collecte et protocole de mesure

Deux campagnes ont eu lieu en 2026. En janvier, au début de la saison sèche, les cuvettes gardent encore un volume d'eau important après les pluies. En avril, la saison sèche est bien avancée : l'évaporation accumulée depuis octobre-novembre a fortement réduit leur volume et concentré les éléments dissous. L'écart entre les deux campagnes mesure donc l'effet de la concentration par évaporation.

Les mesures ont été faites avec un appareil multifonction portatif (*water quality tester*) qui lit en même temps la conductivité électrique (CE, en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou dS/m), le total des solides dissous (TDS, en mg/L), la salinité (en $\%$) et le pH. Il a été étalonné avec des solutions de référence avant chaque campagne, et la sonde a été rincée à l'eau distillée entre deux sites.

L'eau était prélevée dans des flacons en plastique de 2 L, stérilisés puis rincés trois fois avec l'eau de la cuvette. Elle était ensuite versée dans un gobelet rincé de la même façon, où l'on plongeait les électrodes pour la lecture (Figure 3).

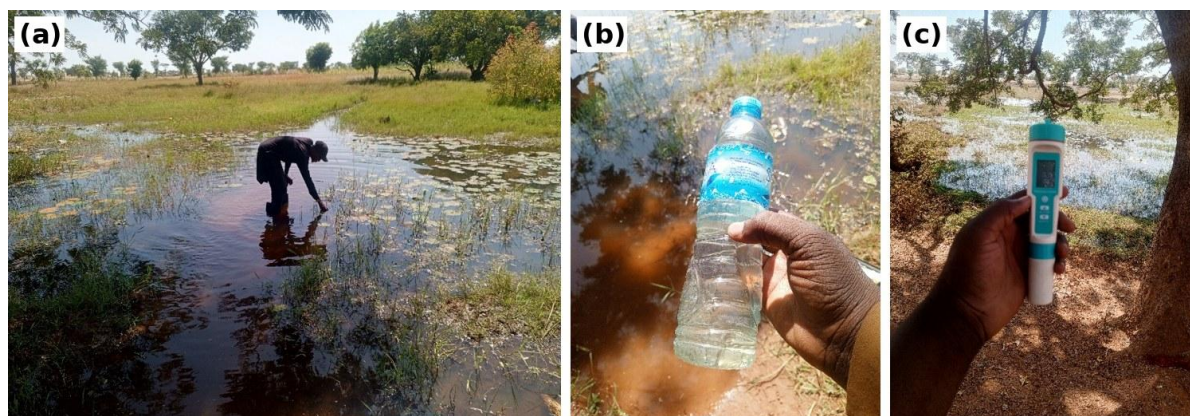


Figure 3 : Protocole de mesure : (a) prélèvement dans la cuvette de Kwaya ; (b) eau conditionnée dans un flacon ; (c) appareil de mesure multiparamètre

Clichés : Moussa Hassan S., janvier 2026

2.4. Traitement et interprétation des données

Le traitement s'est fait en trois temps. Nous avons d'abord calculé, pour chaque paramètre et chaque campagne, la moyenne, le minimum, le maximum et le rapport avril/janvier, qui indique l'ampleur de la concentration saisonnière. Les eaux ont ensuite été classées selon plusieurs référentiels (Tableau 1) : les classes de salinité de l'USSL, fondées sur la CE (Richards, 1954) ; les restrictions d'usage des eaux d'irrigation et le guide des eaux salines pour le bétail et la volaille (Ayers & Westcot, 1985) ; enfin deux seuils de TDS, 1,5 g/L comme limite supérieure de potabilité et 5 g/L comme seuil critique. L'OMS ne fixe pas de valeur guide sanitaire pour le TDS, mais elle note que le goût de l'eau se dégrade nettement au-delà d'environ 1 g/L (OMS, 2017).

Tableau 1 : Seuils de classification utilisés

Référentiel	Paramètre	Classes et seuils
USSL (Richards, 1954)	CE	C1 < 0,25 ; C2 : 0,25–0,75 ; C3 : 0,75–2,25 ; C4 : 2,25–5 ; C5 > 5 dS/m
FAO, irrigation (Ayers & Westcot, 1985)	CE	Aucune restriction < 0,7 ; restriction légère à modérée : 0,7–3 ; restriction sévère > 3 dS/m
FAO, abreuvement (Ayers & Westcot, 1985)	CE	Excellente < 1,5 ; très satisfaisante : 1,5–5 ; impropre à la volaille : 5–8 ; usage limité : 8–11 ; très limité : 11–16 ; non recommandée > 16 dS/m
Seuils TDS retenus	TDS	≤ 1,5 g/L ; 1,5–5 g/L ; > 5 g/L
Risque de sodisation	pH	pH > 8,5 : risque de sodisation des sols irrigués

Sources : Richards (1954) ; Ayers & Westcot (1985) ; OMS (2017)

La troisième étape est le calcul d'un indice de risque de salinisation (IRS) pour chaque cuvette et chaque campagne. L'IRS est la moyenne de deux scores. Le score de CE va de 1 à 5 selon la classe USSL (C1 à C5) ; le score de TDS vaut 1, 3 ou 5 selon le palier atteint. L'indice varie donc de façon continue entre 1 et 5, et les seuils 2, 3 et 4 le découpent en quatre niveaux : faible, modéré, élevé et critique. Les valeurs des 21 cuvettes ont enfin été interpolées par pondération inverse à la distance (IDW, puissance 2) pour obtenir une carte du risque à chaque campagne.

3. Résultats

3.1. Une dégradation saisonnière systématique de la qualité de l'eau

Le Tableau 2 présente les valeurs de six cuvettes représentatives et la moyenne des 21 cuvettes. Toutes se dégradent nettement entre janvier et avril. En moyenne, la CE est multipliée par 3,9 (de 1,87 à 7,24 dS/m) et le TDS par 3,2 (de 1 124 à 3 647 ppm) ; la salinité passe de 1,0 à 3,8 ‰ et le pH de 8,05 à 9,18. Même à Jangué, la cuvette la moins minéralisée, la CE triple.

Tableau 2 : Valeurs physico-chimiques mesurées par cuvette et par campagne (janvier et avril 2026)

Cuvette (commune)	Campagne	CE (µS/cm)	CE (dS/m)	TDS (ppm)	Salinité (‰)	pH	Classe IRS
Kaba001 (Bandé)	Janvier	3 266	3,27	1 959	1,7	8,4	Élevé
Kaba001 (Bandé)	Avril	19 600	19,60	9 859	10,4	9,80	Critique
Garin Zado (Bandé)	Janvier	2 940	2,94	1 764	1,5	8,2	Élevé
Garin Zado (Bandé)	Avril	12 100	12,10	6 096	6,4	9,71	Critique
Alhazawa (Bandé)	Janvier	2 150	2,15	1 290	1,1	8,1	Modéré
Alhazawa (Bandé)	Avril	8 450	8,45	4 260	4,5	9,35	Critique
Gochalo (Bandé)	Janvier	1 880	1,88	1 128	1,0	8,0	Modéré
Gochalo (Bandé)	Avril	6 720	6,72	3 386	3,6	9,20	Élevé
Ara Haoussa (Bandé)	Janvier	1 420	1,42	852	0,7	7,9	Modéré
Ara Haoussa (Bandé)	Avril	4 980	4,98	2 510	2,6	9,05	Élevé
Jangué (Kwaya)	Janvier	640	0,64	384	0,3	7,6	Faible
Jangué (Kwaya)	Avril	1 950	1,95	983	0,8	8,45	Modéré
Moyenne des 21 cuvettes	Janvier	1 874	1,87	1 124	1,0	8,05	Modéré
Moyenne des 21 cuvettes	Avril	7 236	7,24	3 647	3,8	9,18	Élevé

Source : relevés in situ, Moussa Hassan S., 2026

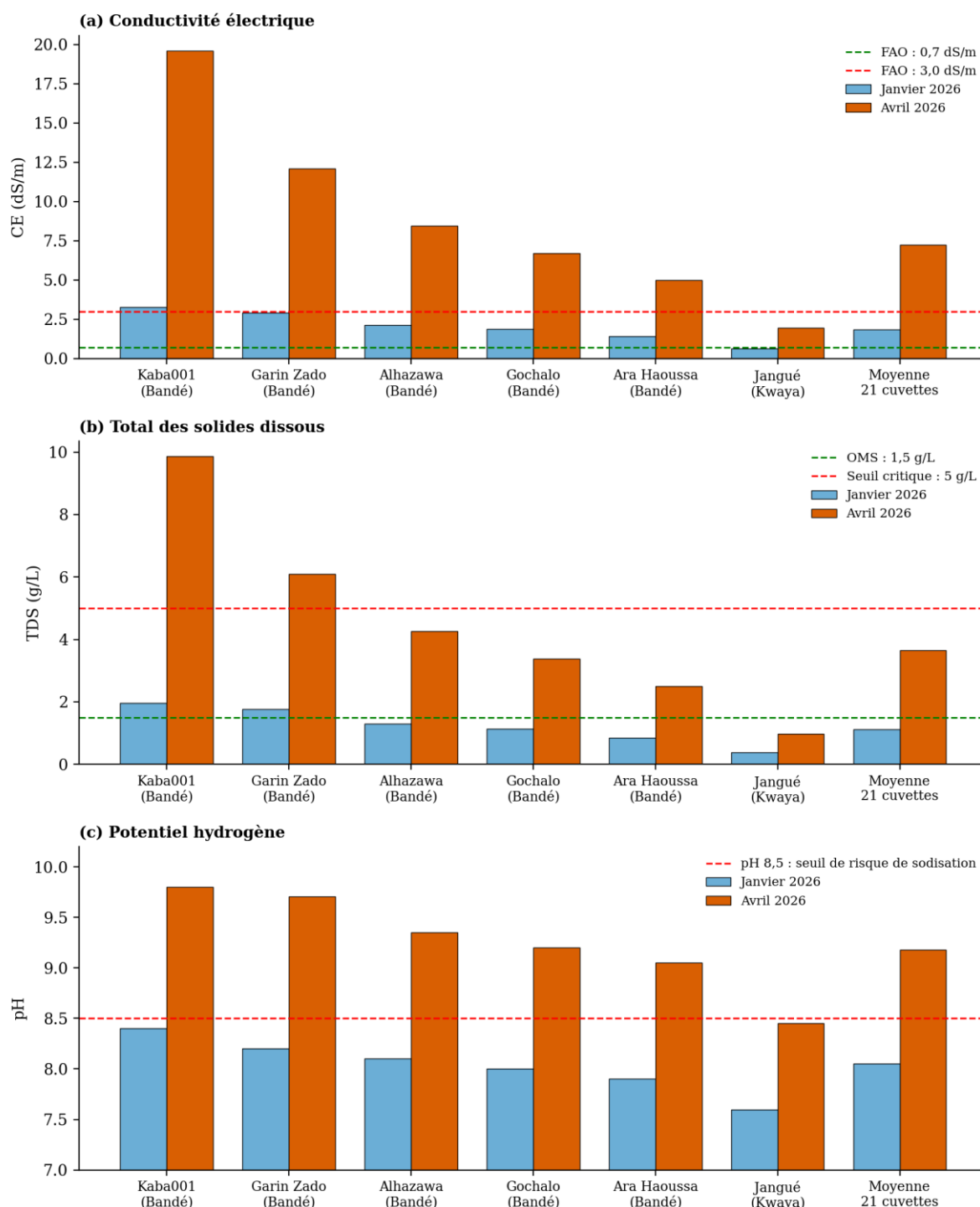


Figure 4 : Évolution saisonnière (a) de la conductivité électrique, (b) du TDS et (c) du pH entre janvier et avril 2026, comparée aux seuils de référence

Source : relevés in situ, Moussa Hassan S., 2026

3.2. Conductivité électrique et salinité

C'est la CE qui réagit le plus à la saison (Figure 4a). À Kaba, elle passe de 3 266 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3,27 dS/m) en janvier à 19,6 dS/m en avril, soit six fois plus, et la salinité atteint 10,4 ‰. En avril, les valeurs sont aussi très élevées à Garin Zado (12,1 dS/m ; 6,4 ‰) et à Alhazawa (8,45 dS/m ; 4,5 ‰). Le classement des cuvettes reste le même d'une campagne à l'autre, mais les écarts

se creusent : celles qui contenaient le plus de sels en janvier sont aussi celles où la concentration progresse le plus.

3.3. Total des solides dissous

Le TDS évolue de la même façon (Figure 4b). En janvier, seules Kaba (1 959 ppm) et Garin Zado (1 764 ppm) dépassent 1,5 g/L. En avril, cinq des six cuvettes du tableau sont au-dessus de ce seuil, et Kaba (9 859 ppm) comme Garin Zado (6 096 ppm) franchissent le seuil critique de 5 g/L. La moyenne des 21 cuvettes (3 647 ppm) se situe dans la classe intermédiaire. À ces niveaux, l'eau n'est pas potable et se prête mal à l'arrosage.

3.4. Potentiel hydrogène

En janvier, les eaux sont faiblement basiques (pH de 7,6 à 8,4). En avril, elles sont franchement alcalines (pH de 8,45 à 9,8 ; Figure 4c), avec les valeurs les plus fortes à Kaba (9,8) et à Garin Zado (9,71). À cette date, toutes les cuvettes du tableau sauf Jangué dépassent 8,5, seuil au-delà duquel l'irrigation expose les sols à la sodisation. Cette alcalinité signale la présence de carbonates et de bicarbonates. Elle accroît la toxicité ionique et réduit la disponibilité des nutriments pour les plantes.

3.5. Aptitude des eaux aux usages agricoles et pastoraux

Le Tableau 3 résume le classement des eaux. Pour l'irrigation, une seule des six cuvettes relevait d'une restriction sévère en janvier ; en avril, elles sont cinq. Quatre cuvettes passent en classe USSSL C5. Pour l'abreuvement, l'eau de Kaba n'est plus recommandée en avril, celle de Garin Zado ne peut être utilisée que de façon très limitée, celle d'Alhazawa de façon limitée, et celle de Gochalo ne convient plus à la volaille. En janvier, toutes ces eaux étaient jugées excellentes ou très satisfaisantes.

Tableau 3 : Classification des eaux des cuvettes selon les référentiels d'usage

Cuvette	Classe USSSL (jan. / avr.)	Irrigation FAO (jan. / avr.)	Abreuvement FAO (avril)
Kaba001	C4 / C5	Sévère / Sévère	Non recommandée (> 16 dS/m)
Garin Zado	C4 / C5	Modérée / Sévère	Très limitée (11–16 dS/m)
Alhazawa	C3 / C5	Modérée / Sévère	Limitée (8–11 dS/m)
Gochalo	C3 / C5	Modérée / Sévère	Impropre à la volaille (5–8 dS/m)
Ara Haoussa	C3 / C4	Modérée / Sévère	Très satisfaisante (1,5–5 dS/m)
Jangué	C2 / C3	Aucune / Modérée	Très satisfaisante (1,5–5 dS/m)
Moyenne 21 cuvettes	C3 / C5	Modérée / Sévère	Impropre à la volaille (5–8 dS/m)

Source : relevés in situ, 2026 ; classification d'après Richards (1954) et Ayers & Westcot (1985)

3.6. Indice de risque de salinisation et foyers de risque

L'IRS moyen passe de 3,4 en janvier à 3,8 en avril. Sur les cartes interpolées (Figures 5 et 6), il augmente de Kwaya, à l'ouest, vers Dungass, à l'est, dans le sens de la pente générale et de l'axe de la vallée. Bandé, au centre, est la commune la plus hétérogène : l'IRS y varie de 1,5 à 4,5.

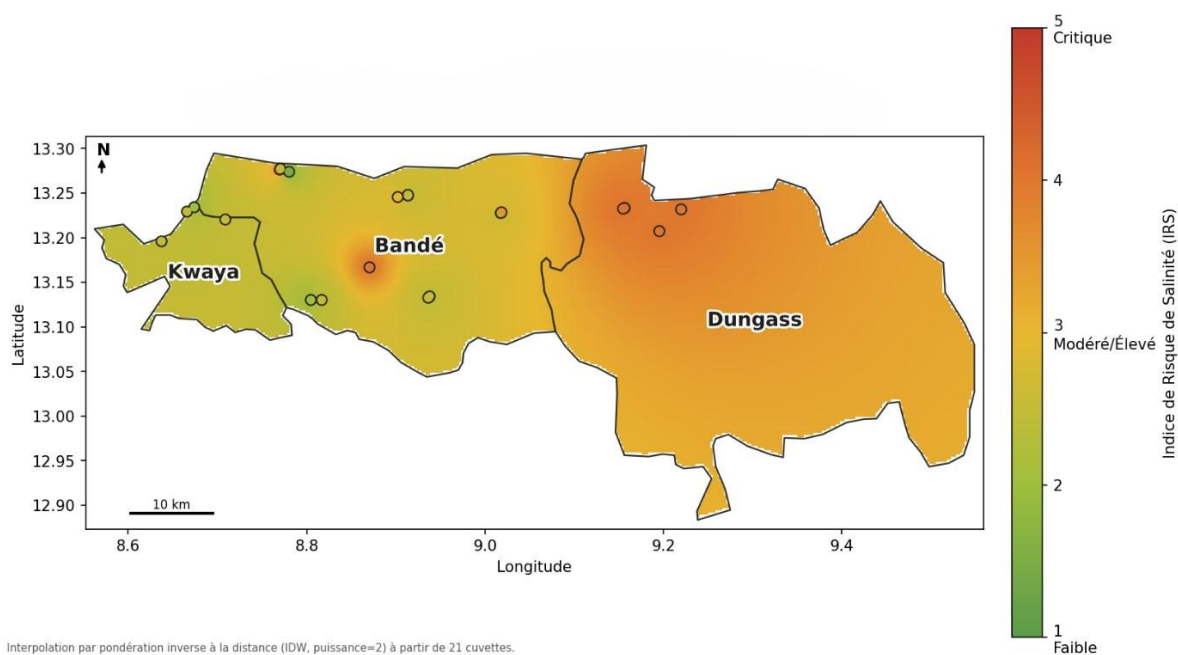


Figure 5 : Indice de risque de salinisation (IRS) en janvier 2026

Interpolation IDW (puissance 2) à partir de 21 cuvettes ; relevés in situ, Moussa Hassan S., 2026

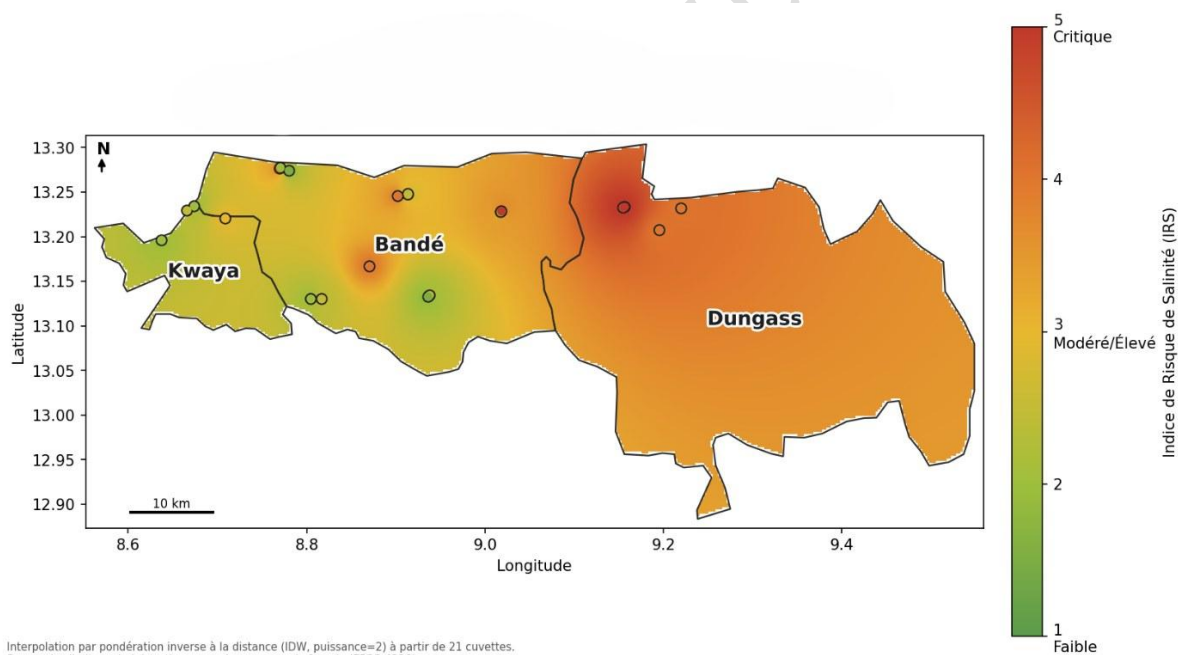


Figure 6 : Indice de risque de salinisation (IRS) en avril 2026

Interpolation IDW (puissance 2) à partir de 21 cuvettes ; relevés in situ, Moussa Hassan S., 2026

Deux foyers se distinguent, et ils ne se comportent pas de la même façon. Le **foyer de Dungass** est stable. Son IRS atteint déjà 3 à 4 en janvier ; en avril, le niveau élevé couvre 81 % de la commune, mais la hausse moyenne n'est que de 0,33. Il s'agit sans doute d'une minéralisation de fond, liée au substrat géologique et peu sensible à la saison. Le **foyer de Bandé**, lui, s'aggrave fortement au cours de la saison sèche. Les cuvettes de Kaba et d'Alhazawa passent du niveau élevé en janvier au niveau critique en avril, et celles de Garin Zado et de Gochalo de 3,5 et 4 à 5. Cette hausse tient à la concentration par évaporation en fin

de saison sèche bien plus qu'à une dérive du fond géochimique. Sur le terrain, elle se voit aux efflorescences salines qui bordent les cuvettes (Figure 7).



Figure 7 : Cristallisation des sels autour d'une cuvette à Kaba (commune de Bandé)

Cliché : Moussa Hassan S., décembre 2024

4. Discussion

4.1. Une salinité acquise en surface par évaporation

Les eaux de surface de la bande sud de la Korama sont donc salées, et nettement plus en fin de saison sèche. La hausse de la CE, du TDS et du pH entre janvier et avril s'explique par l'évaporation, qui concentre les solutés dans un volume d'eau de plus en plus réduit. C'est le mécanisme central de la salinisation en milieu aride et semi-aride (Shokri et al., 2024). Le cas de Kaba (19,6 dS/m ; pH 9,8) rappelle ce que l'on observe dans des bassins endoréiques arides comme celui de Barkol, en Chine, où la salinité croît vers les exutoires internes sous l'effet de la dissolution des minéraux et de l'évapotranspiration (Wang et al., 2025).

Le contraste avec les eaux souterraines de la région est frappant. Dans le haut bassin de la Korama, la CE moyenne de la nappe phréatique n'est que de 132 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Souleymane et al., 2020a), et celle de la nappe alluviale du Goulbi N'Kaba ne dépasse pas 325 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Yahouza et al., 2018). Les cuvettes étudiées ici atteignent en moyenne 1,87 dS/m dès janvier, soit plus de dix fois ces valeurs, et 7,24 dS/m en avril. Même si la nappe peut être localement plus chargée dans les bas-fonds de la bande sud, qui n'ont pas encore fait l'objet de mesures, cet écart d'un ordre de grandeur indique que l'essentiel de la charge saline s'acquiert à la surface, dans des plans d'eau peu profonds alimentés par la nappe et soumis à une forte évaporation. L'empreinte d'évaporation relevée dans les eaux de recharge du bassin par Sandao et al. (2018) va dans le même sens.

4.2. Origine des sels : comparaison avec les cuvettes de Gouré et du Manga

Les paramètres globaux mesurés ici ne suffisent pas à établir l'origine des sels. Plusieurs indices désignent toutefois la nappe. En remontant, la nappe alluviale, subaffleurante dans les bas-fonds, dissout les niveaux salifères et carbonatés du Continental Terminal ; chargée en sodium, chlorures, sulfates et bicarbonates, elle dépose ces ions en s'évaporant. Les travaux sur les eaux de la région de Zinder et sur les aquifères de la Korama ont d'ailleurs montré que leur minéralisation varie fortement selon les formations traversées et le temps de séjour de l'eau (Amadou et al., 2014 ; Issa et al., 2015 ; Souley Moussa et al., 2018).

Les cuvettes du Manga, dans le département de Gouré, présentent une organisation comparable. Ambouta et al. (2018) y décrivent une minéralisation croissante de la bordure vers le centre des cuvettes, un faciès bicarbonaté sodique à Iskour et un remplissage récent coiffé d'évaporites. Le natron qui y cristallise en croûtes, en saison sèche, dans les cuvettes à nappe proche de la surface (Illou, 2018) est un carbonate de sodium ; au Kavar, les sels de natronière sont dominés par la trona (Malam Moussa et al., 2022). Le pH supérieur à 9 mesuré en avril dans la Korama et l'exploitation du natron dans les cuvettes les plus salées traduisent vraisemblablement la même évolution vers des eaux carbonatées sodiques. Les nappes du Manga restent toutefois proches de la neutralité (pH de 6,2 à 7,4 ; Ambouta et al., 2018), ce qui situe l'alcalinisation dans les eaux de surface en cours d'évaporation plutôt que dans l'aquifère. Enfin, le gradient de Kwaya vers Dungass rappelle à la fois l'augmentation de la minéralisation de l'amont vers l'aval dans la vallée du Goulbi N'Kaba (Yahouza et al., 2018) et l'opposition entre bordure et centre des cuvettes du Manga (Ambouta et al., 2018) : dans les trois cas, les sels se concentrent vers les points bas où l'eau séjourne le plus longtemps.

Le processus s'entretient de lui-même. Le retour de l'eau étend les surfaces en eau, ce qui accélère la dissolution des sels et alourdit la charge saline. La salinisation fait ensuite reculer la végétation, ce qui augmente le ruissellement vers les cuvettes. Descroix et al. (2015, 2018) invitaient déjà à dépasser les seuls facteurs climatiques et à intégrer ces rétroactions pédologiques et anthropiques dans l'étude des risques hydrologiques au Sahel. Dans la Korama, inondation et salinisation relèvent d'un même processus et devraient être gérées ensemble.

4.3. Implications pour la gestion

Les deux foyers n'appellent pas les mêmes réponses. À Dungass, où la minéralisation reste élevée toute l'année, il s'agit surtout d'adapter les usages : cultures et espèces tolérantes, halophytes, recherche d'eaux souterraines moins salées. À Bandé, le risque dépend beaucoup de la saison, et le calendrier devient un levier. Il vaut mieux y conduire le maraîchage et l'arrosage en début de saison sèche, avant que la concentration ne devienne critique. La difficulté est que le pic de salinité tombe au moment où le maraîchage a le plus besoin d'eau. Avec des eaux de classe C5 et des pH supérieurs à 9 en avril, les référentiels prescrivent un drainage efficace et un amendement calcique, par exemple du gypse, pour éviter la dégradation des sols irrigués (Richards, 1954 ; Ayers & Westcot, 1985).

Les expériences nigériennes éclairent ces options. Sur le périmètre irrigué de Kollo, un lessivage maîtrisé a retiré 19 à 39 % du stock de sels des 40 premiers centimètres du sol (Issifou Adam, 2011), mais cette pratique suppose une eau d'irrigation peu salée, que les

cuvettes ne fournissent plus en avril ; les eaux souterraines faiblement minéralisées du bassin (Souleymane et al., 2020a) pourraient jouer ce rôle, sous réserve de leur qualité sanitaire (Souleymane et al., 2024). Les efflorescences observées à Kaba mériteraient une caractérisation minéralogique, comme celle menée à Kollo (Ducloux et al., 1994), pour distinguer sels neutres et carbonates de sodium, dont les risques pour les sols diffèrent. Enfin, dans le Manga, la salinité figure déjà parmi les contraintes citées par 19 à 28 % des exploitants selon le type de cuvette (Malam Assane et al., 2021) : les perceptions recueillies dans la Korama en 2024 suggèrent que la bande sud suit la même trajectoire.

4.4. Portée et limites de l'approche

La mesure in situ coûte peu et se répète facilement dans des zones éloignées, d'où il est difficile d'acheminer des échantillons vers un laboratoire. L'IRS repose sur deux paramètres et des seuils normatifs. Il est plus simple qu'une analyse multicritère complète, mais reste utilisable avec les moyens disponibles, et la démarche est proche des cartographies du risque par combinaison de couches sous SIG pratiquées en Afrique de l'Ouest (Houessinon et al., 2022). L'approche a cependant ses limites. Un appareil portatif donne des valeurs approchées et non des mesures de laboratoire ; il calcule en outre le TDS à partir de la CE au moyen d'un facteur de conversion, ce qui ajoute une incertitude. Deux campagnes ne couvrent pas le cycle annuel complet. Sans dosage des ions majeurs (sodium, calcium, magnésium, chlorures, bicarbonates), on ne peut ni calculer le SAR ni préciser le faciès chimique des eaux, comme l'ont fait Souleymane et al. (2020a) pour la nappe du haut bassin. Enfin, l'interpolation repose sur 21 points, dont quatre seulement à Dungass. Le gradient spatial reste donc à confirmer, même si sa cohérence d'une campagne à l'autre et avec les observations des habitants plaide pour sa réalité.

5. Conclusion

Des mesures physico-chimiques in situ réalisées dans 21 cuvettes de la bande sud de la Korama ont permis de décrire la salinité des eaux et d'en tirer un indice spatialisé du risque. L'eau se dégrade nettement entre le début et la fin de la saison sèche : la CE moyenne est multipliée par 3,9 et le TDS par 3,2, tandis que le pH devient fortement alcalin. En avril, Kaba atteint 19,6 dS/m et un pH de 9,8. À cette période, la plupart des cuvettes imposent des restrictions sévères pour l'irrigation, et certaines ne conviennent plus à l'abreuvement.

L'IRS augmente de Kwaya vers Dungass. À Dungass, le risque est structurel et varie peu d'une saison à l'autre ; à Bandé, il est émergent et s'aggrave fortement en fin de saison sèche. En remontant, la nappe alluviale dissout les formations du Continental Terminal, et les sels ainsi libérés, concentrés par l'évaporation, menacent le principal capital de production des ménages, comme dans les cuvettes du Manga à Gouré. Il faudrait désormais suivre régulièrement la qualité de l'eau des cuvettes, compléter ces mesures par des dosages d'ions majeurs et des analyses de sols, et adapter les interventions selon que le risque est structurel ou saisonnier.

Remerciements

Les auteurs remercient le partenariat stratégique entre le Programme alimentaire mondial (PAM) et l'Université André Salifou de Zinder, qui a financé ce travail, ainsi que le Laboratoire Géosciences, Géoressources de l'Environnement (LGGE) pour son appui scientifique et matériel. Ils remercient les autorités communales et coutumières de Kwaya, Bandé et Dungass, les chefs de village et les populations riveraines des cuvettes pour leur accueil et leur accompagnement lors des deux campagnes de terrain, ainsi que les services communaux de l'agriculture pour l'orientation dans le choix des sites.

Déclaration éthique

Les mesures présentées portent exclusivement sur des eaux de surface. Les perceptions des habitants citées en introduction proviennent d'une enquête ménage conduite en 2024 auprès de 293 ménages ; aucune donnée personnelle n'est publiée. Une autorisation de recherche est obtenue au niveau de l'université André Salifou de Zinder, au niveau des communes de l'étude et au niveau de chaque personne enquêtée avant de procéder à l'administration du questionnaire.

Références

- Alpha Gado, B. (2021). *Crises environnementales et gestion des espaces humides au Sahel : dynamiques des cuvettes et des eaux souterraines*. Les Éditions du Flamboyant.
- Amadou, H., Laouali, M. S., & Manzola, A. (2014). Application of multivariate statistical analysis methods to the study of water mineralization in the Zinder zone (South-East of Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(4), 1904–1916. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i4.38>
- Ambouta, K. J. M., Karimou Barké, M., Tidjani, A. D., & Tychon, B. (2018). Les cuvettes du Manga, un écosystème unique en milieu semi-aride objet d'une recherche interdisciplinaire et pluri-institutionnelle. *Geo-Eco-Trop*, 42(2), 245–257. <https://hdl.handle.net/2268/242802>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1). FAO. <https://www.fao.org/4/t0234e/t0234e00.htm>
- Barké, M. K., Ousseïni, I., Biélders, C., Ambouta, K. J.-M., & Tychon, B. (2017). Caractérisation morphologique des cuvettes oasiennes du Centre-Est du Niger. *Physio-Géo – Géographie Physique et Environnement*, 11, 255–276. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.5607>
- Descroix, L., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L. A., Panthou, G., Mahé, G., Gal, L., Dardel, C., Quantin, G., Kergoat, L., Bouaïta, Y., Hiernaux, P., Vissel, T., Pellarin, T., Faty, B., Wilcox, C., Malam Abdou, M., Mamadou, I., Vandervaere, J.-P., ... Paturel, J.-E. (2018). Evolution of surface hydrology in the Sahelo-Sudanien strip: An updated review. *Water*, 10(6), 748. <https://doi.org/10.3390/w10060748>
- Descroix, L., Mahé, G., Olivry, J.-C., Albergel, J., Tanimoun, B., Amadou, I., Coulibaly, B., Bouzou Moussa, I., ... Diedhiou, A. (2015). Facteurs anthropiques et environnementaux de la recrudescence des inondations au Sahel. In *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* (pp. 153–170). IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.9080>

- 383 Ducloux, J., Guero, Y., Fallavier, P., & Valet, S. (1994). Mineralogy of salt efflorescences in paddy
384 field soils of Kollo, southern Niger. *Geoderma*, 64(1–2), 57–71. [https://doi.org/10.1016/0016-](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90089-2)
385 7061(94)90089-2
- 386 Guero, Y., & Bozza, J.-L. (1992). *Fertilité des sols et salinité : étude de cas dans les zones sahélienne*
387 *et saharienne au Niger*. CIRAD-CA.
- 388 Houessinon, D. R. B., Tchibozo, E. A. M., Vissin, E. W., & Ognondoun, A. (2022). Cartographie du
389 risque d'inondation dans l'agglomération urbaine du Grand Nokoué au Bénin : SIG et approche
390 multicritère. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 39, 216–233.
- 391 Illou, M. (2018). Impact sur les ménages de l'exploitation des ressources naturelles des cuvettes
392 oasiennes du Département de Gouré dans le sud-est nigérien : cas du natron. *Geo-Eco-Trop*,
393 42(2), 351–359.
- 394 Issa, S., Alassane, A., Adamou, Z., Natatou, I., Boukari, M., Sohounhloué, D., & Mama, D. (2015).
395 Hydrogeochemical characterization of Continental Intercalary, Terminal, the base and the
396 Korama aquifers groundwater found in five local governments in the Zinder region in the
397 Republic of Niger. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*, 3(4), 9–16.
- 398 Issifou Adam. (2011). *Cartographie fine et suivi détaillé de la salinité des sols d'un périmètre irrigué*
399 *au Niger en vue de leur remédiation* [Thèse de doctorat, Institut Supérieur des Sciences
400 Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage (Agrocampus Ouest)]. HAL : tel-
401 02810672.
- 402 Leblanc, M. J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S. O., Loireau, M., & Cappelaere, B. (2008). Land
403 clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*,
404 61(3–4), 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.011>
- 405 Malam Abdou, M. (2014). *États de surface et fonctionnement hydrodynamique multi-échelles des*
406 *bassins sahéliens : études expérimentales en zones cristallines et sédimentaires* [Thèse de
407 doctorat, Université de Grenoble].
- 408 Malam Assane, M., Tidjani, A. D., Laminou Manzo, O., Ambouta Karimou, J.-M., Biielders, C., &
409 Mahamane, A. (2021). Les cuvettes oasiennes du Manga, Sud-Est Niger : un patrimoine à forte
410 productivité agricole menacé d'ensablement, protégé par la fixation des dunes. *Afrique Science*,
411 18(5), 102–117.
- 412 Malam Moussa, D., Tidjani, A. D., Saidou, H., Guero, Y., & Ambouta, K. (2022). Caractérisation des
413 principales évaporites des oasis du Kavar (Nord-Est du Niger). *Revue des BioRessources*,
414 12(1), 113–130.
- 415 OMS. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*.
416 Organisation mondiale de la Santé.
- 417 Richards, L. A. (Éd.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (USDA
418 Agriculture Handbook No. 60). United States Salinity Laboratory.
- 419 Sandao, I., Abdou Babaye, M. S., Ousmane, B., & Michelot, J. L. (2018). Apports des isotopes naturels
420 de l'eau à la caractérisation des mécanismes de recharge des aquifères du bassin de la Korama,
421 Région de Zinder, Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(4),
422 1931–1954. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i4.33>
- 423 Souley Moussa, R., Malam Alma, M. M., Laouali, M. S., Natatou, I., & Habou, I. (2018).
424 Caractérisation physico-chimique des eaux des aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien

- et du Continental Terminal de la région de Zinder (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(5), 2395–2411. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v12i5.37>
- Shokri, N., Hassani, A., & Sahimi, M. (2024). Multi-scale soil salinization dynamics from global to pore scale: A review. *Reviews of Geophysics*, 62(3), e2023RG000804. <https://doi.org/10.1029/2023RG000804>
- Souleymane, I. M. S., Abdou Babaye, M. S., Alhassane, I., & Boureima, O. (2020a). Caractérisations hydrogéochimiques et qualités des eaux de la nappe phréatique du haut bassin versant de la Korama, commune de Droum/région de Zinder (Niger/Afrique de l'Ouest). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(5), 1862–1877. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i5.29>
- Souleymane, I. M. S., Abdou Babaye, M. S., Alhassane, I., Issoufou, S., & Boureima, O. (2020b). Caractérisations hydroclimatiques et estimation du taux de recharge de la nappe libre du haut bassin versant de la Korama, commune de Droum/région de Zinder/Niger. *European Scientific Journal*, 16(3), 318. <https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n3p318>
- Souleymane, I. M. S., Abdou Babaye, M. S., Issaka, A. M., Illias, A., & Ousmane, B. (2022). Preliminary study on the groundwater resources of the Korama sub-watershed in the commune of Dogo-Dogo/Zinder region: Hydrogeological characterization and groundwater quality. *International Journal of Advanced Research*, 10(01), 1158–1175.
- Souleymane, I. M. S., Abdou Babaye, M. S., Alhassane, I., & Moussa Issaka, A. (2024). Preliminary study on the groundwater resources of the Korama sub-catchment in the commune of Gouchi/Zinder region: Hydrogeological characterization and groundwater quality. *American Journal of Water Resources*, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.12691/ajwr-12-1-1>
- Wang, Z., Zan, C., Zhao, Y., Xu, B., Long, R., Wang, X., Zhang, J., & Huang, T. (2025). Water and soil salinization mechanism in the arid Barkol inland basin in NW China. *Water*, 17(24), 3462. <https://doi.org/10.3390/w17243462>
- Yahouza, L., Sandao, I., Maman Sani, A. B., Metral, B., & Ousmane, B. (2018). Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale de la vallée du Goulbi N’Kaba dans la région de Maradi au Niger. *European Scientific Journal*, 14(24), 37. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n24p37>