

**Analyse Géospatiale du Potentiel en eau Souterraine de la Ville de Zinder au Niger**

Tidjani Amadou YACINE*, Inoussa TOKO MOUHAMADOU, Vincent O. A. OREKAN

*Campus Universitaire Obafemi Awolowo, Département de la Science de l'Information
Géographique (SIG), Institut Régional Africain des Sciences et Technologies de l'Information
Géospatiale (AFRIGIST), PMB 5545, Ile-Ife, État d'Osun, Nigéria.**(Received 20 August 2026; Accepted 01 September 2026)***Résumé**

La ville de Zinder (Damagaram) est située sur le socle cristallin du plateau, reposant sur des formations précambriennes. Mais malgré cela, l'accès à l'eau souterraine reste difficile pour les populations depuis des décennies. Cette étude a pour objectif d'évaluer les outils modernes efficaces d'aide à la décision basés sur les technologies géospatiales, en vue d'une implantation optimale des points d'eau dans la ville de Zinder. La méthodologie repose sur l'utilisation de la télédétection, des systèmes d'information géographique et de l'analyse multicritère. Les principaux facteurs influençant la présence des eaux souterraines, notamment les réseaux de fractures, la végétation, la géologie, le type de sol, la pente et les indices spectraux (NDVI, NDBI, NDWI), ont été analysés. L'extraction et l'analyse des linéaments ont été réalisées à partir de l'analyse en composantes principales (ACP). L'image Landsat a été utilisée pour réaliser la carte d'occupation du sol par la méthode de classification supervisée dans le logiciel ENVI 5.3. A partir de cette carte d'occupation du sol, la végétation a été extraite puis également reclassée en trois classes. Les résultats montrent que 992 linéaments ont été identifiés dans la ville de Zinder, avec des longueurs comprises entre 0,01 km et 2,08 km. La direction dominante des linéaments est NE–SW, tandis que la direction la moins représentée est NW–SE, comme l'indique la rosace de direction. Les résultats de la carte des zones propices en eau souterraine de la ville de Zinder distinguent trois classes : potentiel élevé, modéré et faible, cette carte a été ainsi validée en superposant les résultats avec les débits des forages existants de la ville de Zinder.

*Corresponding author. Email: tidjaniamadouyacine@gmail.com

†Present address: African Regional Institute for Geospatial Information Science and Technology (AFRIGIST), Obafemi Awolowo University, Ile-Ife, Nigeria.

Mots-clés : Analyse géospatiale, occupation du sol, zones propices, Zinder, Niger

Abstract

The city of Zinder (Damagaram) lies on the crystalline basement of the plateau, resting on Precambrian formations. Despite this geological setting, access to groundwater has remained difficult for the population for decades. This study aims to evaluate effective modern decision-support tools based on geospatial technologies in order to optimize the siting of water points in the city of Zinder. The methodology relies on remote sensing, geographic information systems (GIS), and multicriteria analysis. The main factors controlling groundwater occurrence namely fracture networks, vegetation, geology, soil type, slope, and spectral indices (NDVI, NDBI, NDWI) were analyzed. Lineament extraction and analysis were performed using principal component analysis (PCA). A Landsat image was used to produce a land-cover map through supervised classification in ENVI 5.3 software. Vegetation was then extracted from this land-cover map and reclassified into three classes. Results show that 992 lineaments were identified within the city of Zinder, with lengths ranging from 0.01 km to 2.08 km. The dominant trend is NE–SW, while the least represented direction is NW–SE, as indicated by the rose diagram. The resulting groundwater potential map of Zinder distinguishes three classes high, moderate, and low potential. This map was validated by overlaying the results with the yields of existing boreholes in the city.

Keywords: Geospatial analysis, land cover, potential zones, Zinder, Niger.

.

INTRODUCTION

L'eau souterraine est une eau qui s'accumule sous terre, que ce soit dans les zones saturées ou non saturées (Bensouici, 2014). Contrairement aux eaux de surface, les eaux souterraines sont considérées comme l'une des sources les plus importantes pour l'approvisionnement en eau potable au sahel, du fait de leur grande capacité de stockage ainsi que de leur faible exposition aux polluants (Guergazi et Achour., 2005, Ehoussou *et al.*, 2018). Les eaux souterraines constituent une source naturelle profitable qui renforce le bien-être humain, l'évolution économique et la diversité écologique. Selon Waikar & Nilawar (2007), les eaux souterraines occupent les vides dans les formations géologiques, agissant comme des conduits pour le transport et des réservoirs pour le stockage. Leur présence dépend principalement de la porosité des formations géologiques. Selon aussi, El Arabi (2012), les eaux souterraines sont considérées comme l'une des principales sources d'approvisionnement en eau, tant pour les zones rurales que pour les zones urbaines, dans de nombreuses régions d'Égypte, notamment dans les régions désertiques. Ces dernières années, l'augmentation des prélèvements pour répondre à la demande croissante d'eau potable et l'expansion des travaux de réhabilitation des terres en périphérie du désert ont suscité des inquiétudes quant à leur durabilité. Dans les pays sahéliens, la situation s'est particulièrement dégradée depuis les années 1970, en raison de la diminution des précipitations et de leur répartition inégale dans le temps et l'espace. Cette évolution a entraîné un assèchement progressif des cours d'eau ainsi que la disparition de nombreux puits et forages, aggravant la crise hydrique dans la région (Ali *et al.*, 2022). Les eaux souterraines constituent une ressource vitale pour satisfaire les besoins en eau douce des collectivités (Otchoumou *et al.*, 2012). L'exploration des eaux souterraines est devenue un sujet de préoccupation, en particulier dans les zones souffrant d'une pénurie d'eau (Yao *et al.*, 2016). Les méthodes classiques appliquées pour les eaux souterraines n'ont pas souvent identifié les domaines prometteurs pour le stockage des eaux souterraines, pris ici dans le sens des réserves renouvelables, liées à l'emmagasinement des aquifères libres ou captifs. Dans les pays en développement, les eaux souterraines constituent une ressource de premier choix pour l'alimentation en eau potable des populations car elles ont une qualité relativement bonne et un coût peu élevé (Cocker *et al.*, 2020). Cependant, l'exploitation de ces eaux pose souvent des problèmes surtout en zone de socle. En effet, l'hydrogéologie des régions de socle est très complexe (Kouamé *et al.*, 2005 ; Yao *et al.*, 2016), ce qui rend l'exploitation de la ressource en eau souterraine aléatoire avec une faible productivité des ouvrages et de taux

d'échecs très élevés (Zoumenou, 2023). Or, le captage de ces eaux a longtemps été axé sur le repérage de niveaux aquifères ayant les meilleures caractéristiques hydrauliques, le fonctionnement des nappes d'altérites et l'utilisation de la géomorphologie pour le repérage des structures géologiques favorables (cuirasse noyée, fosse d'altération) (Mangoua, 2013). Ce procédé conduit parfois à la réalisation de bon nombre d'ouvrages non productifs et même parmi ceux qui sont positifs, plus de 45% ont un débit inférieur à 1 m³/h (DHH, 2001). Aussi, près de 85% des ouvrages du socle du Liptako Gourma nigérien ont un débit d'exploitation inférieur à 5 m³/h (Babaye, 2012). Ces échecs et ces faibles débits pourraient être essentiellement dus au mauvais choix des sites d'implantation des forages et à une méconnaissance du système de fractures qui couvrent ces régions de socle (Yao *et al.*, 2016). Au cours de ces dernières années, le développement des outils tels que la télédétection, la géostatistique et la géophysique a montré que les gros débits sont liés à des fractures d'extension kilométrique, des intersections des fractures, et à des réseaux de fractures caractérisés par une forte interconnexion (N'Go *et al.*, 2010, Baka *et al.*, 2012). Une étude menée par le Cabinet GERMES Consulting sur le pluton de Téra a relevé que la plupart des forages positifs sont situés à proximité des fractures (GERMES Consulting, 2014). Sur 18 forages implantés, les 17 sont positifs avec de profondeur qui varie entre 27m à 100m et un débit de 3m³/h à 10m³/h. Le Niger, à l'instar des autres pays sahéliens est confronté à ce problème d'eau qui est récurrent dans certaines localités. Certes, la partie occidentale du pays, traversée sur 550 km par un cours d'eau majeur (le fleuve Niger), renferme des eaux souterraines importantes (2,5 milliards de m³ renouvelables par an, dont moins de 20% sont utilisés, et 2 000 milliards de m³ non renouvelables) (UNICEF, 2023). Face à ce constat, une nouvelle méthodologie utilisant la télédétection et les SIG est nécessaire pour identifier des sites de forage productifs, réduire les échecs, optimiser la mobilisation de l'eau souterraine et faciliter l'accès à l'eau potable et à l'irrigation (Ali *et al.*, 2022). Cette recherche vise à répondre à la question suivante : Quel est le niveau de l'utilité de l'analyse géospatiale dans la planification des campagnes de prospection en eau souterraine par rapport aux méthodes traditionnelles ? Pour y répondre, l'objectif retenu est le suivant : Analyser l'importance des technologies géospatiales dans la planification de la prospection en eau souterraine.

Cadre d'étude

Située dans la partie sud-est du territoire nigérien, la région de Zinder s'étend en latitude entre 12°48' et 17°30' Nord et en longitude entre 7°20' et 12°00' Est. Elle a une superficie d'environ 145 000 km². La ville de Zinder est la deuxième ville du Niger en population avec 322 844 habitants (RGPH, 2012). Ville précoloniale, Zinder est située au centre-est du pays dans la zone d'affleurement du socle granitique du Damagaram. Le climat de la région est de type sahélien dans le Sud avec une transition vers un climat de type désertique dans le Nord. Il est caractérisé par deux saisons distinctes : une saison des pluies de quatre à cinq mois, de mi-juin à septembre/octobre, avec des températures moyennes de 30 à 35°C, et une longue saison sèche avec des températures variant entre 20°C en décembre et plus de 40°C en mai. La majorité des sols de la ville de Zinder est à dominance sableuse). La ville est actuellement peuplée des groupes ethniques suivants : Kanouri, Zarma, Peulh, Touareg, Haoussa et Toubou. On y retrouve également des expatriés venus essentiellement du Nigéria, du Burkina Faso, du Bénin, du Tchad et du Mali. Les principales activités de la population sont l'agriculture et l'élevage, auxquelles il faut ajouter la pêche, la vente du bois et le commerce.

A l'instar de plusieurs pays, le Niger est partie prenante de plusieurs conventions, traités, codes et stratégies qui visent la préservation de l'environnement.

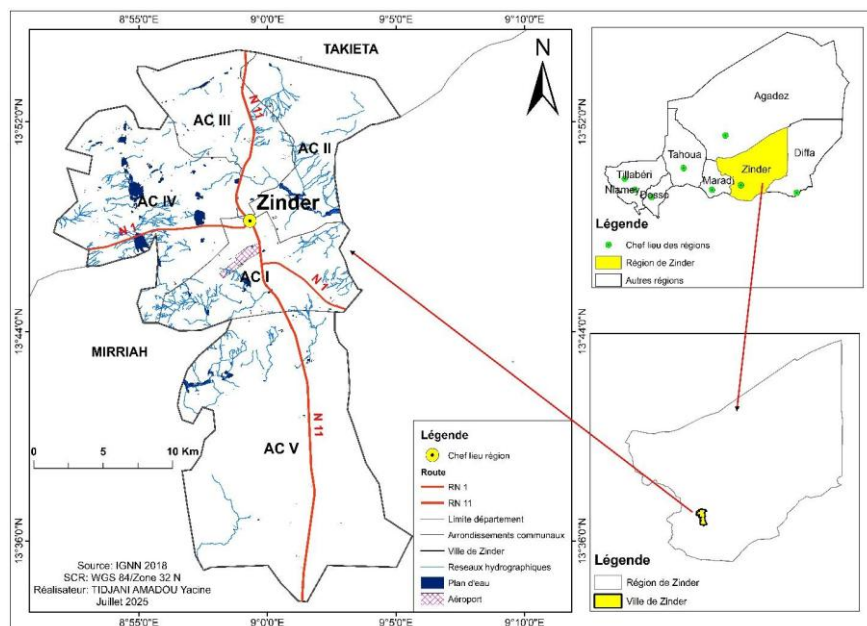


Figure 1: Localisation de la ville de Zinder

MATERIEL ET METHODES

Matériel

Le matériel est constitué de données et de logiciels.

- **Données satellitaires**

Il s'agit des images de différentes scènes de Landsat 8 OLI/TIRS, des images SRTM téléchargées sur le site de l'USGS

- **Données cartographiques et autres**

Ces données concernent : répartition des forages, obtenus auprès de la direction régionale de l'hydraulique de Zinder (DRH/A Z) ; des données de réseau routier, d'hydrographie, des localités, obtenues auprès de l'IGNN, MHE ; carte pédologique à l'échelle 1/200000 obtenues à l'IGNN; carte géologique à l'échelle 1/200000 obtenue au CRGM ; le fichier de forme du découpage régional, départemental et communal du Niger obtenu à l'Institut Géographique National du Niger (IGNN) ; des données socio-économiques du Niger et du secteur d'étude obtenues à la Mairie de la commune urbaine de la ville de Zinder ; des données démographiques de RGPH 2012 du secteur d'étude obtenues à (INS).

Méthodes

Cartographier les principaux indicateurs environnementaux qui favorisent la présence d'eau souterraine dans la ville de Zinder.

- **Extraction des linéaments de la ville de Zinder**

L'approche utilisée pour extraire les linéaments est la méthode automatique en utilisant l'outil LINE dans le logiciel PCI Geomatica. Les linéarités obtenues sont synthétisées et coupées en fonction de la limite de la ville de Zinder dans le logiciel ArcGIS 10.8, ensuite les activités anthropiques (réseaux routiers, limites des bâtis et des plantations...) qui se confondent avec les structures géologiques sont supprimées (Bonssara *et al.*, 2023).

- **Calcul des indices spectraux (NDVI, NDWI, NDBI)**

Les calculs des indices spectraux sont des méthodes de traitement d'images satellites appelées transformations multispectrales, Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification sur l'environnement. À partir des images Landsat 8 OLI-TIR de 2025, les calculs des indices ont été faits à partir du logiciel ENVI Classic, dans l'interface Basic Tools puis l'option Band Math pour la saisie des

formules. La pente déterminera le sens des écoulements de surface vers ou pas aux endroits des recharges des aquifères. Elle a été réalisée dans le logiciel ArcGIS 10.8 avec le SRTM de la ville de Zinder.

- **Occupation du sol**

La carte d'occupation du sol a été réalisée grâce à la méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance. Elle a été sélectionnée pour sa robustesse dans l'identification de classes spectrales assez similaires (Hassane *et al.*, 2024).

- **Digitalisation**

Les cartes géologiques et pédologiques utilisées dans cette étude étaient initialement au format raster. Elles ont d'abord été découpées (*clip*) selon les limites de la ville de Zinder afin de ne conserver que l'emprise spatiale pertinente. Après vérification du géoréférencement, une session d'édition a été ouverte dans ArcGIS Desktop 10.8 pour procéder à la numérisation des différentes unités lithologiques et pédologiques sous forme de polygones. Enfin, ces unités ont été reclassifiées en trois classes de favorabilité hydrogéologique (forte, moyenne et faible), sur la base de leurs propriétés de perméabilité et de capacité d'infiltration, en vue de leur intégration dans l'analyse multicritère de la potentialité en eau souterraine (Esri, 2020).

Identifier les zones qui présentent un fort potentiel hydrogéologique

- **Méthode de densité de Kernel**

La méthode de densité de noyau (*Kernel Density*) a été appliquée afin d'analyser la densité spatiale des linéaments extraits dans la ville de Zinder. La carte de densité obtenue a ensuite été reclassifiée en trois classes (forte, moyenne et faible densité) et intégrée à l'analyse multicritère.

- **Méthode d'interpolation (IDW)**

Les données ponctuelles issues des forages, notamment le débit, la profondeur et l'épaisseur du profil d'altération, ont été interpolées afin d'analyser leur variation spatiale à l'échelle de la ville de Zinder.

- **Les zones d'infiltration**

La carte des zones d'infiltration a été élaborée à partir d'une approche multicritère intégrant plusieurs paramètres physiques et environnementaux influençant la recharge des eaux souterraines. Cette analyse a pris en compte les indices spectraux issus de l'imagerie

satellitaire, utilisés pour caractériser la couverture végétale et l'humidité de surface, la pente dérivée du modèle numérique de terrain, la pédologie préalablement reclassifiée selon sa capacité d'infiltration, ainsi que la densité des linéaments obtenue par la méthode de densité de noyau (*Kernel Density*). Chacun de ces paramètres a été normalisé et reclassifié en classes de favorabilité, puis combiné par superposition pondérée sous ArcGIS Desktop 10.8 afin de produire une carte synthétique des zones d'infiltration.

Analyser l'importance des technologies géospatiales dans la planification de la prospection en eau souterraine

L'identification des zones potentielles d'aquifères repose sur une analyse multicritère intégrant quatre paramètres essentiels, chacun apportant une contribution spécifique à l'évaluation de la favorabilité hydrogéologique (la géologie, la couverture végétale, la densité des linéaments et les zones d'infiltration). Le principe de la méthode repose sur la comparaison des critères deux à deux à l'aide d'une échelle d'importance relative variant de 1 à 9. La valeur 1 traduit une importance égale entre deux critères, tandis que les valeurs 3, 5, 7 et 9 expriment respectivement une importance modérée, forte, très forte et extrême d'un critère par rapport à un autre. Les valeurs inverses ($1/3$, $1/5$, etc.) sont utilisées lorsque le critère est jugé moins important.

La validation des zones potentielles d'aquifères a été réalisée par superposition de la carte des zones favorables aux données ponctuelles des débits mesurés dans les forages existants. Cette étape a permis la vérification de la pertinence de la classification multicritère en confrontant les zones identifiées comme favorables à la réalité hydrogéologique observée sur le terrain.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Rastérisation et reclassification de la géologie

La figure 2 suivante présente la géologie reclassée en trois classes (formations favorables, moyennement favorables et moins favorables) selon la lithologie, après rastérisation à l'aide de l'outil Conversion Tools.

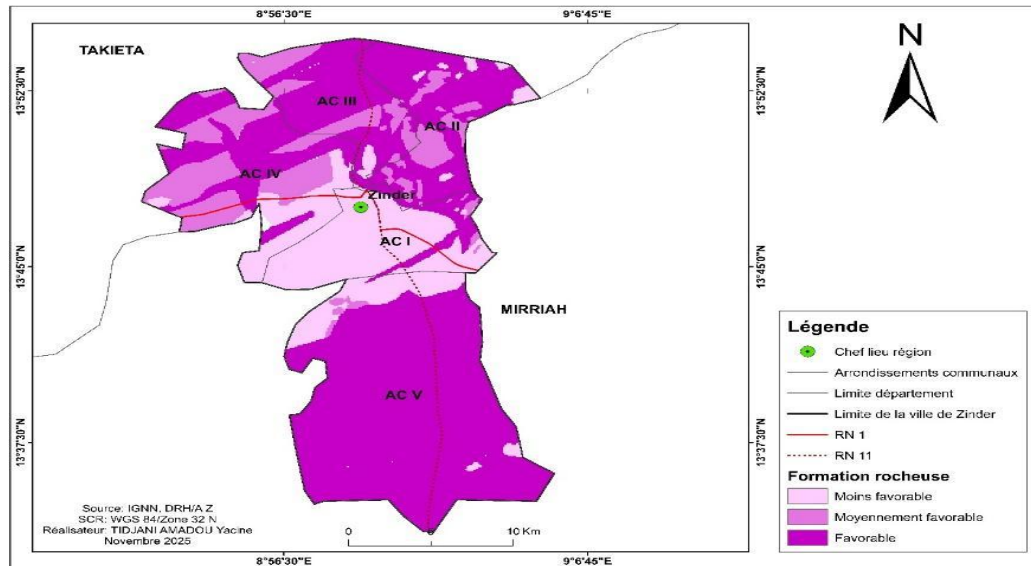


Figure 2 : Géologie reclassée de la ville de Zinder

La figure 2 illustre la géologie reclassée en trois classes, qui seront utilisées dans le cadre de l'analyse multicritère afin de déterminer les zones potentielles en eau souterraine de la ville de Zinder.

Couverture végétale

Bien que moins dense dans la ville de Zinder, la végétation fait partie des endroits stratégiques pour la recherche des eaux souterraines. La figure 3 met en évidence la couverture végétale de la ville de Zinder présentée aussi en trois classes.

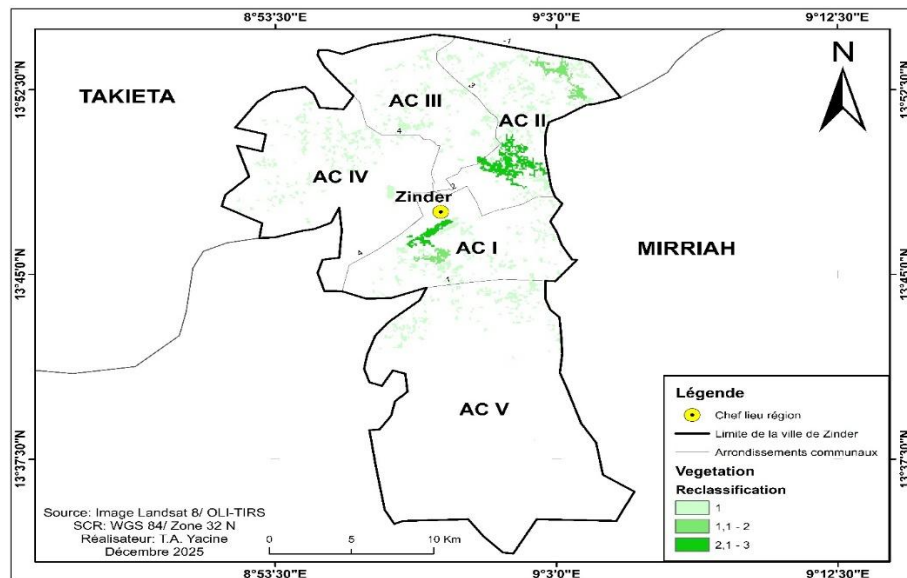


Figure 3 : Végétation reclassée de la ville de Zinder

La figure 3 illustre la couverture végétale extraite de l'occupation du sol, on constate plus de végétation dans la partie nord de la ville dans les arrondissements communaux (1, 2, 3 et 4) et moins de végétation dans l'AC V de la ville.

Densité des linéaments reclassifiée

La densité de linéaments a été reclassifiée en trois classes dans le but de l'analyse multicritère. La figure 4 montre la reclassification de la densité de linéaments de la ville de Zinder.

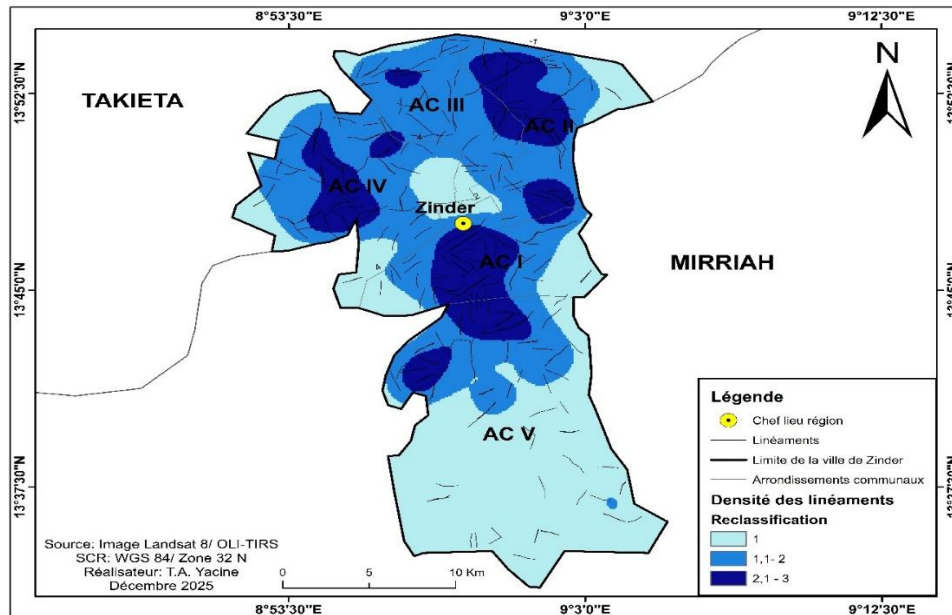


Figure 4 : Densité de linéaments reclassifiée de la ville de Zinder

La figure 4 représente le dense réseau de linéaments qui caractérise la ville de Zinder. Ces formations linéaires, qui sont essentiellement des failles et fractures du socle cristallin, se caractérisent par une direction prédominante NNE-SSW et NW-SE. La présence significative de fractures autour des Arrondissements Communaux (AC I à AC V), particulièrement marquée dans les AC I, III et IV, indique une forte activité de fracturation.

4.2.2. Zones d'infiltration

Les indices spectraux et la pente ont été reclassifiés en trois classes chacun pour pouvoir faire la superposition et faire ressortir les zones d'infiltration.

La figure 5 donne le résultat de la reclassification des zones d'infiltration qui constituent les principaux secteurs de recharge des aquifères. L'intégration de ces facteurs améliore la localisation des sites favorables à l'implantation des points d'eau.

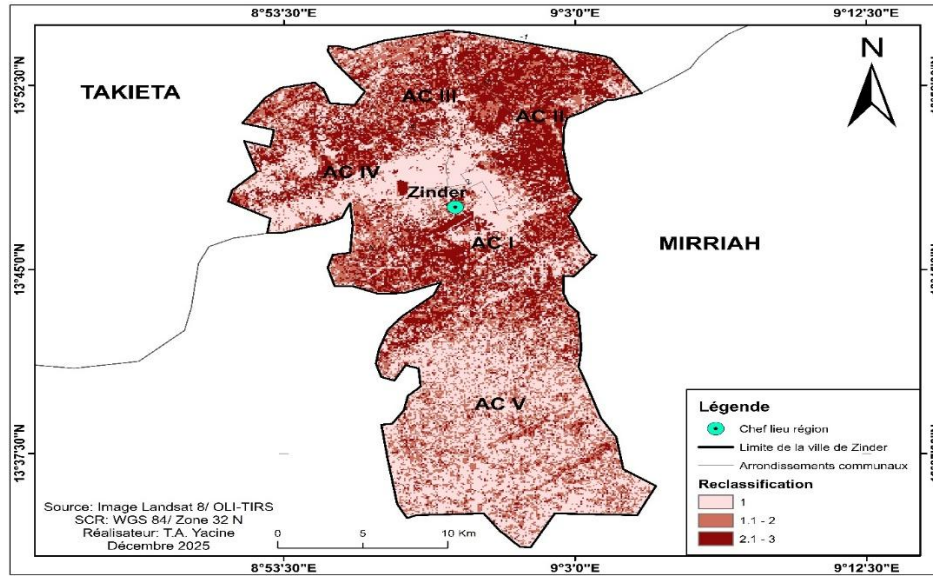


Figure 5 : Zones d'infiltration reclassifiées

L'analyse combinée des cartes de pédologie, d'occupation du sol et des zones d'infiltration (figure 5) de la ville de Zinder met en évidence le rôle déterminant de la nature des sols et de l'urbanisation dans la dynamique hydrologique urbaine. Les résultats montrent que les zones périphériques, notamment au sud (AC V), dominées par des formations sableuses, présentent une capacité d'infiltration moyenne à forte, favorable à la recharge des nappes phréatiques.

En revanche, le centre urbain de Zinder (AC I et AC II), caractérisé par une forte densité du bâti et des sols peu perméables ou hydromorphes, affiche une faible capacité d'infiltration, favorisant le ruissellement de surface et augmentant la vulnérabilité aux inondations en période de fortes précipitations. Les zones rocheuses et les sols hydromorphes localisés au nord et à l'ouest (AC III et AC IV) constituent également des contraintes majeures à l'infiltration.

Zones favorables d'aquifères

Sur la figure 6 sont représentées les zones d'aquifères favorables de la ville de Zinder ; cette représentation révèle trois zones distinctes, allant de la plus faibles à la plus élevée.

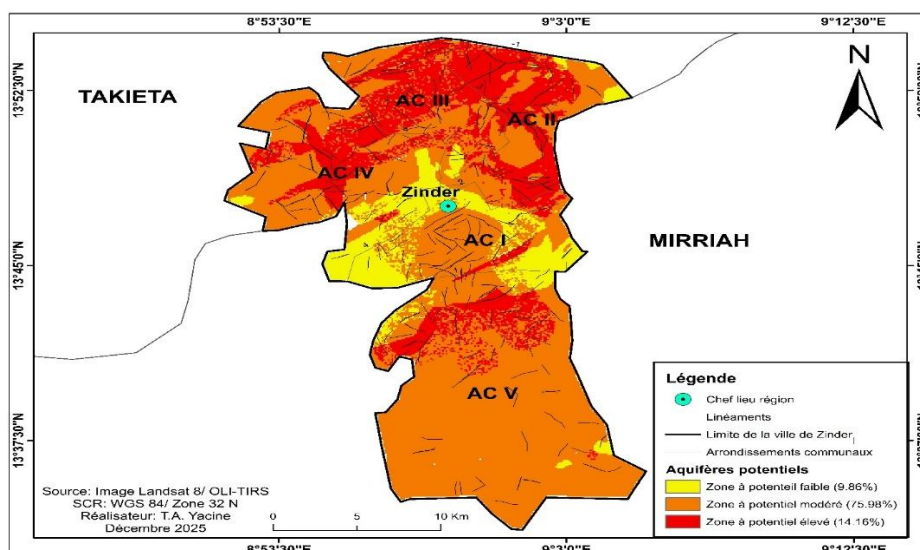


Figure 6 : Zones d'aquifères favorables de la ville de Zinder

L'analyse de la figure 6 montre une grande disparité spatiale du potentiel aquifère au sein de la ville de Zinder. L'approche géospatiale facilite l'optimisation de la recherche d'eau souterraine, diminue les risques associés aux forages non productifs et guide efficacement les décisions relatives à l'aménagement des ressources hydriques. Ainsi, on distingue :

Zones avec un potentiel modéré (75,98 %)

Elles ont une prédominance notable sur l'ensemble de la ville de Zinder, particulièrement dans les secteurs AC I et AC V. Cette prépondérance reflète des conditions hydrogéologiques moyennement propices, définies par une modération de la fracturation, une infiltration satisfaisante et des structures géologiques plutôt perméables. Ces zones sont des secteurs prioritaires avec certaines conditions pour les forages.

Zones à fort potentiel (14,16 %)

On les trouve surtout dans les zones AC II, AC III et AC IV, où une densité élevée de linéaments est remarquée. Il est probable que ces zones soient des régions fracturées ou de convergence structurale, qui favorisent le mouvement et l'accumulation des eaux souterraines. Ces sites sont les plus propices à l'établissement de forages à haute productivité.

Zones de faible potentiel (9,86 %)

Ces zones, qui sont faiblement représentées et éparpillées, sont liées à des formations de faible perméabilité, une infiltration limitée et une densité de linéaments faible. On ne les recommande pas particulièrement pour les forages, sauf après des recherches supplémentaires.

La figure 7 montre la validation des zones favorables aux aquifères par superposition des débits des forages existants dans la ville de Zinder.

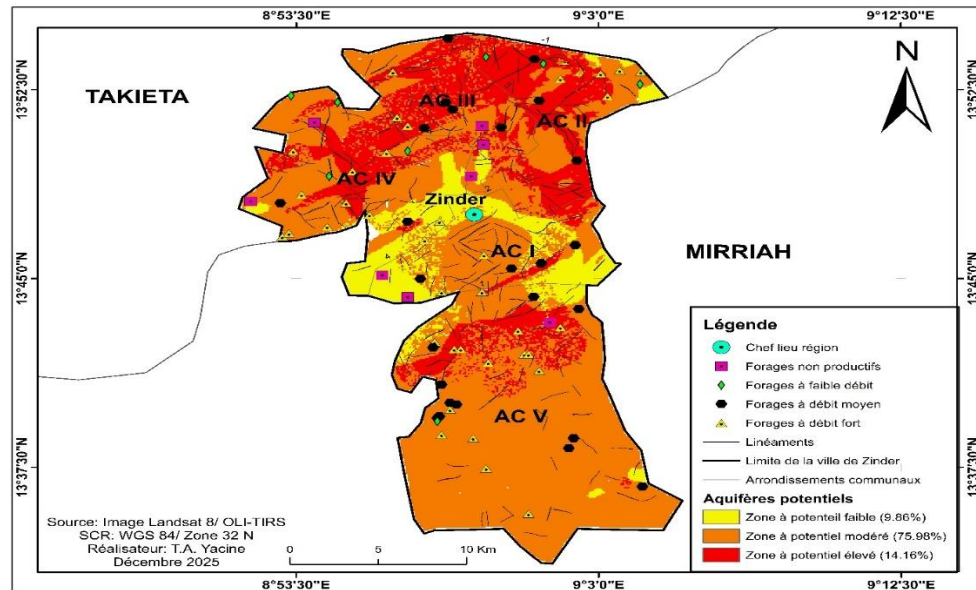


Figure 7 : Superposition des débits des forages et des zones favorables de la ville de Zinder

La validation de la carte des potentialités aquifères a été réalisée à partir de 78 forages, répartis selon leur débit. Les résultats montrent qu'environ 75 à 80 % des forages présentent une cohérence avec les classes de potentiel définies. Ce taux de validation élevé atteste de la fiabilité de la carte, malgré quelques discordances dues à l'hétérogénéité du milieu de socle.

DISCUSSION

Les zones potentielles d'aquifères favorables élaborées à partir d'une analyse multicritère intégrant la densité des linéaments, la couverture végétale, la géologie et les zones d'infiltration, toutes préalablement reclassifiées en classes de favorabilité. Cette approche est largement reconnue comme pertinente pour la cartographie du potentiel en eau souterraine, en particulier dans les contextes semi-arides et de socle cristallin, confirment les travaux de (Mallick *et al.*, 2021 ; Adiat *et al.*, 2022).

La dominance des zones à potentiel modéré et la distribution ponctuelle des zones à potentiel élevé observées sur la carte sont cohérentes avec les résultats d'études récentes basées sur les SIG et l'analyse multicritère pour la prospection des eaux souterraines de (Berhanu & Hatiye, 2020 ; Mogaji *et al.*, 2023). Par ailleurs, l'intégration de la végétation et des zones d'infiltration permet de mieux appréhender les processus de recharge, les surfaces végétalisées favorisant l'infiltration

et réduisant le ruissellement, les résultats obtenus concordent avec les études de (Naghbi *et al.*, 2020 ; Rahmati *et al.*, 2021).

La dominance des zones à potentiel modéré et la distribution ponctuelle des zones à potentiel élevé observées sur la carte sont cohérentes avec les résultats d'études récentes portant sur la prospection des eaux souterraines, basées sur les SIG et l'analyse multicritère de (Mallick *et al.*, 2021 ; Mogaji *et al.*, 2023).

La carte des zones potentielles d'aquifères met en évidence une prédominance de secteurs présentant un potentiel de modéré à élevé dans les zones AC I, AC II et AC IV, où se concentre la majorité des forages à débit moyen et fort. Cette concordance spatiale confirme la pertinence de l'analyse multicritère intégrant la géologie, la densité des linéaments, l'infiltration et la végétation. Les zones à potentiel élevé correspondent généralement à des formations fracturées et à forte connectivité structurale, favorables à la circulation et au stockage des eaux souterraines ce qui concorde avec le travail de (Sander, 2007). A l'inverse, les zones à potentiel faible sont associées à des secteurs peu fracturés et à faible recharge concordent avec les résultats de (Foster et Chilton, 2026).

CONCLUSION

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG), appuyés par des analyses statistiques, jouent un rôle important dans la cartographie des phénomènes géographiques. Ces outils permettent de visualiser et d'analyser les caractéristiques du milieu. Dans cette étude, ils ont été utilisés pour localiser les zones potentielles d'aquifères dans la ville de Zinder.

Les résultats obtenus visent à aider les décideurs dans la réalisation des infrastructures hydrauliques et à mieux orienter leurs actions. Ils présentent l'état des fractures, les zones d'infiltration ainsi que les formations géologiques favorables à l'accumulation des eaux souterraines, en cohérence avec les données de forages existantes intégrées dans l'analyse.

Bien que la ville de Zinder soit située en zone de socle, les résultats de cette étude contribuent à réduire les risques d'échec lors de l'implantation des ouvrages hydrauliques. L'analyse des zones potentielles en eau souterraine met en évidence une relation entre la densité de la végétation et la présence des fractures, qui constituent des zones favorables à l'accumulation des eaux souterraines dans le socle.

La présence des eaux souterraines dépend également des précipitations, car l'eau est principalement stockée dans les fractures du socle. Ainsi, une faible pluviométrie peut avoir un impact sur les quantités disponibles. Malgré la pertinence des résultats obtenus à l'échelle globale, il demeure nécessaire de mener des études géophysiques ciblées avant toute nouvelle implantation de forages afin d'améliorer la précision des interventions.

Enfin, la validation des résultats a été effectuée par superposition de la carte finale des zones favorables avec les débits mesurés dans les forages existants. Cette confrontation a permis de vérifier la cohérence entre les zones identifiées comme favorables et les observations sur le terrain. Les secteurs où les débits élevés coïncident avec des zones favorables confirment la pertinence de l'approche SIG, tandis que les écarts ont permis d'ajuster la pondération des critères et d'affiner l'interprétation hydrogéologique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adiat, K. A. N., Nawawi, M. N. M., & Abdullah, K. (2022). Assessing groundwater potential using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 39, 100981. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100981>.

Ali, S., Babaye, M. S., & Ousmane, B. (2022). Identification des zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques à l'aide des SIG et de la télédétection : cas du département de Téra (ouest du Niger). *Revue des Sciences de l'Eau et de l'Environnement*, 5(2), 45–60.

Babaye, M. S. (2012). Évaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). Université-Liège.

Bensouici, M. (2014). Étude de l'écoulement souterrain d'eau, Centre Universitaire de Mila Institut des Sciences et de Technologie Département de sciences et Techniques, 6272011.pdf.

Berhanu, B., & Hatiye, S. D. (2020). Identification of groundwater potential zones using GIS and remote sensing techniques: A case study of semi-arid regions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100356. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100356>.

Bonssara, I., Inoussa T., M., Tahibou P., and Robertson A., B. (2023). “Analyse géospatiale du potentiel en eau souterraine de la commune de Tanghin-Dassouri, Burkina Faso. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 42 (2023) 265 - 286 ISSN 1813-3290, <http://www.revist.ci>.

Cocker, F., Vodounou, J. B., & Yabi, J. (2020). Cartographie du potentiel en eau souterraine de la basse vallée de l'Ouémé, sud du Bénin (Afrique de l'Ouest). *La Houille Blanche*, 106(2), 74-85. <https://doi.org/10.1051/lhb/2020018>.

Esri. (2020). Editing and digitizing features in ArcMap. ArcGIS Desktop Documentation.

Foster, S., Chilton, J. (2026). Utilisation des eaux souterraines pour améliorer la sécurité d'approvisionnement en eau urbaine.

GERMES CONSULTING. (2014). Étude géophysique pour l'implantation d'un forage dans la commune rurale de Mehana.

Hassane, Y., T. ; Hamadou, Y. B. ; Moussa, I., A., K. ; Hamza, S. B. ; Hassane, B. ; Abdourhamane, T. A. ; Garba, Z. (2024). Impacts de l'exploitation minière aurifère sur les composantes biophysiques de l'environnement à Aouzegueur dans la commune rurale de Tabelot (Agadez, Nord-Niger). *International Journal of Innovation and Scientific Research* ISSN 2351-8014 Vol. 75 No. 2 Nov. 2024, pp. 171-186 © 2024 Innovative Space of Scientific Research Journals <http://www.ijisr.issr-journals.org/>.

Mallick, J., Singh, C. K., Al-Wadi, H., Ahmed, M., Rahman, A., & Shashtri, S. (2021). GIS-based groundwater potential zone delineation using multi-criteria decision-making techniques. *Hydrogeology Journal*, 29(4), 1247–1265. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02319-6>

Mogaji, K. A., Omosuyi, G. O., & Adelusi, A. O. (2023). Groundwater potential mapping in fractured basement terrain using integrated remote sensing and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 82, 112. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10716-4>

Naghibi, S. A., Hashemi, H., Pradhan, B., & Lee, S. (2020). Groundwater recharge potential mapping using GIS-based multi-criteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8192-4>.

Otchoumou, K. F. E., Bachir, S. M., Etienne, A. G., & Issiaka, S. (2012). Apport de la télédétection et des SIG dans l'identification des ressources en eau souterraine dans la région de Daoukro. <https://hal.science/hal-00771901v1>.

Rahmati, O., Samadi, M., Shahabi, H., Azareh, A., Rafiei-Sardooi, E., Alilou, H., & Pradhan, B. (2021). Groundwater potential mapping using machine learning and multi-criteria decision

analysis. *Science of the Total Environment*, 772, 145010.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145010>.

Sander, P. (2007). Lineaments in groundwater exploration: A review of applications and limitations. *Hydrogeology Journal*, 15(1), 71–74. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0138-9>.

UNICEF. (2023). Niger / Accès à l'eau potable: Le calvaire des femmes de Tiss. <https://www.aa.com.tr/fr/afrique/niger-acc%C3%A8s-%C3%A0-leau-potable-le-calvaire-des-femmes-de-tiss/2929563>.

Yao, A. B., Goula, B. T. A., Kane, A., Mangoua, O. M. J., & Kouassi, K. A. (2016). Cartographie du potentiel en eau souterraine du bassin versant de la Lobo (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire): Approche par analyse multicritère. *Hydrological Sciences Journal*, 1-12.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.932360>.