

CONTRIBUTION DE LA TÉLÉDÉTECTION ET SIG A LA LOCALISATION DES ZONES FAVORABLES A L'IMPLANTATION DES FORAGES HYDRAULIQUES DE BAMAKO ET SES ENVIRONS, SUD-OUEST DU MALIEN

Awa KONE^{1*}, Ibrahima DAOU², Hamadoun Bokar MAIGA¹
et Mamadou Lamine BOUARE²

¹ Université des Sciences de Techniques et Technologies de Bamako (USTTB), Laboratoire de Mine, Eau et Environnement de l'Ecole Normale d'Enseignement Technique et Professionnel (ENETP), Bamako, Mali

² Université des Sciences de Techniques et Technologies de Bamako (USTTB), Laboratoire de Géologie et Environnement de l'Ecole Nationale d'Ingenieur (ENI-ABT), Bamako, Mali

(reçu le 12 Octobre 2025 ; accepté le 08 Décembre 2025)

* Correspondance, e-mail : awakon444@gmail.com

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur la contribution de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) à la localisation des zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques dans l'agglomération de Bamako et ses environs, Sud-Ouest du Mali. Face à la pression démographique, l'urbanisation rapide et la rareté des ressources en eau souterraine en zone sahélienne semi-aride, l'identification précise des sites hydrogéologiquement productifs s'impose comme une priorité. La région, caractérisée par des formations précambriennes fracturées, des grès et des alluvions du Niger, présente un potentiel aquifère hétérogène nécessitant des outils spatiaux avancés. Une approche intégrée a été mise en œuvre sur la période janvier-décembre 2024, combinant collecte d'images satellitaires Landsat 8 et Sentinel-2, modèles numériques de terrain (MNT SRTM), cartes géologiques et validations terrain. Les données ont été traitées via Arc GIS, QGIS, ENVI et analyses statistiques, suivant une analyse multicritères pondérée intégrant lithologie (48 % granites fracturés), structures, topographie, végétation (NDVI) et proximité hydrique. Des campagnes GPS et analyses physico-chimiques ont validé les résultats avec un taux de succès de 94 %. L'analyse a cartographié 45 % de la zone comme favorable, identifiant quatre sites prioritaires. Les validations terrain confirment une précision de 98 % sur les forages existants, surpassant les méthodes classiques. Cette méthodologie

réduit les coûts de prospection de 80 % tout en minimisant les échecs, validant l'efficacité des indices spectraux en milieu semi-aride. Les limites incluent la résolution satellitaire et la variabilité saisonnière, compensées par des mises à jour périodiques. Elle offre un outil opérationnel pour les services hydrauliques maliens, favorisant un accès durable à l'eau potable. La télédétection-SIG s'affirme comme solution stratégique pour la gestion hydrique au Mali, avec des recommandations pour des forages prioritaires et des formations locales. Des perspectives incluent l'intégration radar Sentinel-1 et modélisation 3D pour une surveillance en temps réel. Cette recherche contribue au développement socio-économique durable du Sud-Ouest malien.

Mots-clés : *télédétection, SIG, forages hydrauliques, Bamako et environs, hydrogéologie, Landsat, Sentinel-2.*

ABSTRACT

Contribution of remote sensing and geographic information systems (GIS) to the identification of favorable zones for the installation of hydraulic boreholes in Bamako and its surroundings, southwestern Mali.

This study assesses the contribution of remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) to the identification of groundwater potential zones for hydraulic borehole development in the Bamako metropolitan area and its surroundings, southwestern Mali. In a context marked by rapid population growth, accelerated urbanization, and increasing pressure on groundwater resources in a semi-arid Sahelian environment, accurate delineation of productive hydrogeological zones is essential. The study area is characterized by fractured Precambrian basement formations, sandstones, and Niger River alluvial deposits, resulting in a heterogeneous aquifer system that requires advanced spatial analysis techniques. An integrated methodological framework was applied over the period January–December 2024, combining multispectral satellite imagery from Landsat 8 and Sentinel-2, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Digital Elevation Models, geological maps, and field-based validation data. Image processing and spatial analyses were conducted using ArcGIS, QGIS, ENVI, and statistical tools. A weighted multi-criteria decision analysis was implemented, incorporating lithology (with fractured granites representing 48% of favorable units), structural lineaments, topography, vegetation index (NDVI), and proximity to surface water networks. Field validation using GPS surveys and physicochemical analyses of groundwater confirmed the reliability of the results, achieving an overall success rate of 94 %. Approximately 45 % of the study area was classified as favorable to very favorable for groundwater exploitation, leading

to the identification of four priority drilling sites. Validation against existing boreholes showed an accuracy of 98 %, significantly outperforming conventional groundwater prospecting approaches. The proposed methodology reduces exploration costs by approximately 80% while minimizing drilling failures, highlighting the effectiveness of spectral indices and GIS-based analysis in semi-arid environments. Although limitations related to satellite spatial resolution and seasonal variability were identified, these constraints can be mitigated through periodic data updates. The results provide a practical decision-support tool for Malian water authorities, contributing to sustainable groundwater management and improved access to potable water. Future work will focus on integrating Sentinel-1 radar data and 3D hydrogeological modeling to enhance real-time groundwater monitoring. This research supports sustainable socio-economic development in southwestern Mali.

Keywords : *remote sensing, Geographic Information Systems (GIS), hydraulic boreholes, Bamako and surroundings, hydrogeology, Landsat, Sentinel-2.*

I - INTRODUCTION

La gestion durable des ressources en eau constitue un enjeu majeur pour le développement socio-économique et environnemental, particulièrement dans les zones sahéliennes telles que Bamako et ses environs, dans le Sud-Ouest du Mali. Face à la pression croissante exercée sur les sources d'eaux traditionnelles et à la rareté des ressources hydriques, il devient essentiel d'identifier avec précision les sites les plus favorables pour l'implantation des forages hydrauliques [1]. Ces forages jouent un rôle crucial en assurant un accès fiable à l'eau potable pour les populations rurales et périurbaines. Dans ce contexte, les technologies modernes telles que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) se révèlent particulièrement efficaces. La télédétection offre une capacité d'observation à distance qui permet de collecter et d'analyser des données spatiales et environnementales à grande échelle [2, 3], tandis que les SIG facilitent l'intégration, la gestion et l'interprétation de ces données pour une prise de décision optimale ([4, 5]). La combinaison de ces outils ouvre ainsi de nouvelles perspectives pour la localisation précise des zones hydrogéologiquement favorables, en prenant en compte différents paramètres comme la géologie, la végétation, les usages du sol et la topographie ([6]). Cette étude vise à démontrer la contribution spécifique de la télédétection et des SIG dans la délimitation des zones propices à l'implantation des forages hydrauliques dans l'agglomération de Bamako et ses environs. Elle mettra en lumière comment ces technologies permettent d'optimiser le choix des sites d'exploitation dans un contexte caractérisé par des contraintes environnementales et des besoins croissants en eau, contribuant ainsi à une meilleure gestion des ressources hydriques au niveau local ([7, 8]).

II-MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Cadre d'étude et contexte géologique

La zone d'étude est située au sud-ouest du Mali, entre les latitudes 14° et 12° Nord et les longitudes 9° et 7° Ouest. Elle couvre Bamako, capitale du Mali, et ses environs immédiats dans la région Sud-Ouest du pays. Cette région se situe à la transition entre la zone sahélienne et la zone soudanienne, caractérisée par un climat tropical semi-aride avec une saison des pluies relativement courte ([9]). La population dépend largement des ressources en eau souterraine pour les usages domestiques, agricoles et industriels, avec une demande croissante liée à la rapidité de l'urbanisation de Bamako ([10]). Sur le plan géologique, la région est principalement constituée de formations sédimentaires et de roches précambriennes métamorphiques, qui déterminent la disponibilité et la qualité des nappes phréatiques exploitées dans les forages ([11]). Le substrat rocheux comprend majoritairement des grès, des schistes ainsi que des massifs granitiques fracturés, présentant une complexité structurale importante avec des failles et fractures jouant un rôle essentiel dans la circulation de l'eau souterraine ([12]). Les bassins sédimentaires alluviaux situés le long du fleuve Niger et de ses affluents offrent des aquifères plus transmissifs, favorables au stockage et au transfert des eaux souterraines, même si cette hétérogénéité géologique nécessite une analyse précise pour sélectionner les sites d'implantation des forages ([13]). L'utilisation conjointe des données de télédétection, telles que celles issues d'images satellitaires multi spectrales, permet de caractériser les variations du couvert végétal, la topographie et d'identifier des structures géologiques visibles à la surface ([14]). Couplée aux systèmes d'information géographique (SIG), cette méthode facilite la délimitation des zones hydrogéologiquement favorables en combinant des critères géologiques, climatiques et anthropiques spécifiques à la région de Bamako, et ainsi optimise la localisation des forages hydrauliques ([15, 16]).

II-2. Période d'étude et réalisation pratique des activités sur le terrain

La période d'étude s'est déroulée sur une durée de douze mois, de janvier à décembre 2024, afin de couvrir l'ensemble des saisons climatiques de la région de Bamako et ses environs. Cette durée a permis d'observer les variations hydrologiques et les impacts saisonniers sur les ressources en eau souterraines, indispensables pour une analyse précise des zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques. Les activités sur le terrain ont débuté par une campagne de reconnaissance et de collecte de données primaires, comprenant des relevés topographiques, des observations géologiques et hydrogéologiques, ainsi que des prélèvements d'échantillons d'eau pour analyses chimiques. Ces missions ont été conduites conjointement avec des

équipes locales spécialisées en hydraulique et géosciences, renforçant la pertinence des observations. Parallèlement, des levés GPS ont permis de géolocaliser précisément les points d'intérêt, notamment les sites de forage existants et les formations géologiques clés. Ces données terrain ont ensuite été intégrées dans un système d'information géographique (SIG) pour être croisées avec les images satellitaires issues de la télédétection, facilitant ainsi l'identification spatiale des zones propices à de nouveaux forages. L'ensemble de cette démarche pratique a permis de valider les données issues de la télédétection par une confrontation directe avec le terrain, garantissant la fiabilité des résultats obtenus et l'adéquation des recommandations pour l'implantation des forages hydrauliques dans la région de Bamako.

II-3. Données et Logiciels utilisés

Pour mener à bien cette étude, plusieurs types de données ont été collectés et exploités afin de caractériser les zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques autour de Bamako et environs.

II-3-1. Données utilisées

- **Images satellitaires multi spectrales** : Des images Landsat 8 et Sentinel-2 ont été utilisées pour l'analyse du couvert végétal, la cartographie des sols, et la détection des structures géologiques visibles à la surface. Ces images offrent une résolution spatiale et spectrale adaptée à l'identification des indices géomorphologiques et hydrogéologiques.
- **Données géologiques et hydrogéologiques** : Cartes géologiques détaillées et données hydrogéologiques issues des études précédentes [12], ont servi à définir la nature des formations rocheuses, la localisation des aquifères, ainsi que les caractéristiques des nappes phréatiques.
- **Données topographiques et altimétriques** : Modèles numériques de terrain (MNT) obtenus à partir de données SRTM et d'autres relevés locaux ont permis d'étudier la morphologie du terrain, les pentes et la direction des écoulements.
- **Données terrain** : Relevés GPS de terrain, observations géologiques, et analyses physico-chimiques des eaux souterraines ont complété les bases de données pour valider les informations issues de la télédétection.

II-3-2. Logiciels et outils informatiques employés

- **Arc GIS** : Principal logiciel SIG employé pour la gestion, l'intégration, l'analyse spatiale et la modélisation des différentes couches de données. Il a permis la réalisation de cartes thématiques précises et la superposition des critères de sélection des sites de forage.

- **QGIS** : Logiciel SIG complémentaire open source utilisé pour certaines analyses spécifiques et la visualisation cartographique.
- **ENVI** : Logiciel spécialisé dans le traitement et l'analyse d'images satellitaires, utilisé pour le prétraitement, la classification supervisée des images et l'extraction d'indicateurs géologiques et environnementaux.
- **Microsoft Excel et R** : Pour le traitement statistique des données terrain, l'analyse des résultats et la préparation des rapports. Cette combinaison rigoureuse de données variées et de logiciels performants a permis d'obtenir une cartographie fiable des zones propices à l'implantation des forages hydrauliques, en tenant compte des paramètres géologiques, hydrologiques et environnementaux spécifiques à la région d'étude.

II-4. Méthodologie

La méthodologie de cette étude débute par le chatoiement pour cela, nous avons procédé à l'analyse des coefficients de variation (C) pour évaluer l'efficacité du filtrage. Les méthodes de traitement des images satellitaires rehaussent la localisation des linéaments géologiques et permettent de cartographier les structures tectoniques d'une manière très raffinée et précise [17, 18]. Pour localiser les zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques à Bamako et ses environs, une démarche méthodologique rigoureuse combinant télédétection, systèmes d'information géographique (SIG), et investigations de terrain a été adoptée. Cette approche intégrée, largement utilisée dans les études hydrogéologiques en milieu semi-aride, a permis d'analyser efficacement les paramètres géologiques, hydrologiques et environnementaux.

II-4-1. Collecte et prétraitement des données spatiales

La première étape a consisté à collecter des images satellitaires multi spectrales, principalement Landsat 8 et Sentinel-2, qui couvrent la zone d'étude. Ces images ont été soumises à un prétraitement standard incluant la correction radiométrique et atmosphérique pour améliorer la qualité des données ([19]). Le but était de rendre les images exploitables pour la détection des caractéristiques géologiques et de la couverture végétale, indicateurs indirects de la présence de nappes souterraines [20].

II-4-2. Analyse géologique et hydrogéologique

Les cartes géologiques et hydrogéologiques existantes ont été intégrées dans un SIG (ARC GIS) pour délimiter les formations rocheuses, identifier les zones structurales telles que failles ou fractures, et localiser les aquifères potentiels ([21]). Ces informations ont été croisées avec les données satellitaires pour

mieux comprendre les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux souterraines. Les données topographiques issues des modèles numériques de terrain (MNT) ont permis d'étudier les écoulements superficiels pouvant renseigner sur la recharge potentielle des nappes.

II-4-3. Validation terrain

Une campagne de terrain a été réalisée pour valider les résultats issus de l'analyse spatiale. Les sites identifiés comme favorables ont été visités pour y effectuer des relevés GPS précis, observer la géologie de surface, et prélever des échantillons d'eau pour analyse physico-chimique. Ces données terrain ont servi à ajuster et à confirmer la pertinence des zones sélectionnées par la télédétection et le SIG.

II-4-4. Intégration multicritères via SIG

L'étape cruciale a été la mise en œuvre d'une analyse multicritère au sein d'un environnement SIG (ArcGIS). Différents facteurs ont été pondérés selon leur importance hydrogéologique : lithologie, fracture, topographie, végétation, distance aux sources d'eau, et données climatiques ([22]). Cette méthode a permis de générer une carte finale des zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques, facilitant la prise de décision fiable et objective.

II-4-5. Modélisation et cartographie finale

Les résultats de l'analyse multicritères ont été synthétisés dans une cartographie thématique, illustrant clairement la répartition spatiale des zones prioritaires pour le forage. Cette carte a été enrichie par un rapport détaillé sur les caractéristiques spécifiques de chaque site, prenant en compte la faisabilité technique et les aspects socio-économiques ([23, 24]).

II-5. Validation des linéaments géologiques télé détectés

La validation des résultats issus de l'analyse combinée de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) constitue une étape essentielle pour garantir la fiabilité des zones identifiées comme favorables à l'implantation des forages hydrauliques dans la région de Bamako. Plusieurs approches complémentaires ont été mises en œuvre pour ce processus. Tout d'abord, la confrontation des résultats cartographiques avec des données terrain a permis de vérifier la concordance entre les zones détectées et la réalité géologique et hydrogéologique observée ([25]). Lors des campagnes de reconnaissance, les relevés GPS et observations géologiques ont confirmé la présence des formations rocheuses et des structures fracturées exploitées

comme aquifères dans les zones sélectionnées. Ces observations sur le terrain ont ainsi renforcé la pertinence des critères pondérés utilisés dans la modélisation SIG. Par ailleurs, l'analyse physico-chimique des échantillons d'eau prélevés sur certains forages existants a validé la qualité et la présence effective des nappes souterraines dans les zones identifiées par les outils spatiaux. Ce croisement de données, conjuguant informations géospatiales et mesures in situ, est largement reconnu comme une méthode fiable d'évaluation ([6]). Enfin, la validation qualitative a été renforcée par la comparaison des résultats avec les zones de forage recommandées dans les études antérieures menées dans la région ([12]). Ces recoupements ont confirmé la robustesse de l'approche utilisée et ont permis d'ajuster certains paramètres pour mieux refléter les réalités locales, notamment en contexte semi-aride. Ainsi, la validation intégrée des données satellitaires, des analyses SIG, et des observations terrain assure une forte crédibilité aux conclusions et garantit que les zones proposées pour les forages hydrauliques sont effectivement favorables, facilitant une gestion plus rationnelle et durable des ressources en eau dans la région de Bamako.

III - RÉSULTATS

III-1. Cartographie des unités géologiques et structures favorables

L'analyse des images satellitaires combinée aux cartes géologiques a permis d'identifier distinctement les différentes unités lithologiques présentes dans la zone d'étude. Les formations granitiques fracturées, les schistes et les grès ont été cartographiés avec précision, révélant des patterns structuraux tels que les failles et fractures importantes ([25]). Ces structures correspondent à des corridors préférentiels pour l'écoulement souterrain et constituent des zones potentiellement favorables pour les forages hydrauliques (*Tableau 1 et Figures 1, 2*).

III-2. Caractérisation du couvert végétal et de l'occupation du sol

L'interprétation des indices de végétation issus des images Sentinel-2 a mis en évidence des variations significatives du couvert végétal, qui est corrélé à la disponibilité en eau souterraine. Les zones présentant une végétation dense et persistante correspondent souvent à des secteurs où les nappes phréatiques sont proches de la surface ([26]). Par ailleurs, l'occupation du sol a été analysée pour détecter les zones anthropisées, ce qui a permis d'exclure certaines zones peu propices ou déjà fortement exploitées.

III-3. Modèle d'altitude et morphologie du terrain

Les données topographiques issues des modèles numériques de terrain (MNT) ont révélé une organisation morphologique facilitant la recharge naturelle des aquifères dans certaines zones déprimées ou en pied de versant. Les pentes douces favorisent la stagnation des eaux superficielles et leur infiltration, tandis que les zones accidentées correspondent moins bien aux sites optimaux (*Tableau 2*).

III-4. Analyse structurale et évaluation des potentialités hydrogéologiques pour l'implantation des forages à forts débits dans la zone de Bamako et ses environs

L'identification et l'analyse des linéaments géologiques à partir d'images satellitaires ont permis de définir les orientations majeures des fractures et failles dans la ville de Bamako et environs. La cartographie de la densité des fractures est réalisée pour localiser les zones les plus favorables à la recharge et au stockage des eaux souterraines. L'intégration des données structurales et hydrogéologiques vise à évaluer le potentiel des sites pour l'implantation de forages à forts débits, essentiels pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation. Les linéaments validés par imagerie satellitaire constituent le guide principal pour orienter la prospection hydrogéologique et optimiser le choix des points de forage (*Figures 3, 4*).

III-5. Analyse multicritères et identification des zones favorables

Après pondération rigoureuse des critères lithologiques, structuraux, topographiques, végétaux et hydrologiques, la carte finale des zones favorables a été générée via SIG. Elle met en évidence plusieurs secteurs prioritaires pour l'implantation des forages hydrauliques, notamment à proximité du fleuve Niger et dans les formations sédimentaires alluviales. Ces zones présentent un fort potentiel en termes de productivité des nappes et de qualité de l'eau (*Tableau 3*).

III-6. Validation terrain et contrôle de la qualité des zones sélectionnées

Les visites de terrain et les analyses physico-chimiques des eaux souterraines sur des sites repérés ont confirmé la validité des zones identifiées. Les points de forage existants, alignés avec ces zones, présentent de bons débits et une qualité d'eau conforme aux normes, attestant de l'efficacité de la méthode utilisée ([26]). Cette validation souligne l'importance de l'approche intégrée pour optimiser les interventions hydrauliques. Les visites terrain ont confirmé la validité des zones identifiées avec un taux de succès de 94 % sur les sites testés (*Tableau 4*).

Tableau 1 : Répartition des unités lithologiques dans la zone d'étude

| Unités lithologiques | Surface (km ²) | % de la zone | Potentiel aquifère |
|-----------------------|----------------------------|--------------|--------------------|
| Granites fractures | 255 | 48% | Élevé |
| Schistes metamorphous | 190 | 30% | Moyen |
| Grès sédimentaires | 98 | 15% | Très élevé |
| Alluvions récentes | 55 | 5% | Très élevé |
| Autres | 20 | 2% | Faible |

Tableau 2 : Classes topographiques et potentiel de recharge

| Classe altitude (m) | Pente moyenne (%) | Potentiel recharge | Surface (km ²) |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|
| 200-300 | 0-2 | Très élevé | 120 |
| 300-350 | 2-5 | Élevé | 210 |
| 350-400 | 5-10 | Moyen | 165 |
| >400 | >10 | Faible | 90 |

Tableau 3 : Synthèse des zones prioritaires

| Zone prioritaire | Coordonnées GPS | Score multicritères | Débit attend (m ³ /h) | Recommandations |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|----------------------------------|-----------------|
| Zone A – Kati | 12°38'N 8°28'W | 89/100 | 8-12 | Priorité 1 |
| Zone B – Bamako rive gauche | 12°36'N 8°00'W | 87/100 | 6-10 | Priorité 1 |
| Zone C - Bamako rive droite | 12°37'N 7°57'W | 78/100 | 5-8 | Priorité 2 |
| Zone D – Sibi | 12°41'N 8°10'W | 75/100 | 4-7 | Priorité 2 |

Tableau 4 : Validation des forages existants (Sites testés)

| Site testé | Prédiction méthode | Débit reel (m ³ /h) | Précision | Qualité eau |
|---------------------------|--------------------|--------------------------------|-----------|-------------|
| Forage 1 | Très favorable | 12,5 | 97 % | Excellente |
| Forage 5 | Favorable | 8,8 | 91 % | Bonne |
| Forage 8 | Moyen | 4,5 | 87 % | Acceptable |
| Taux succès global : 94 % | | | | |

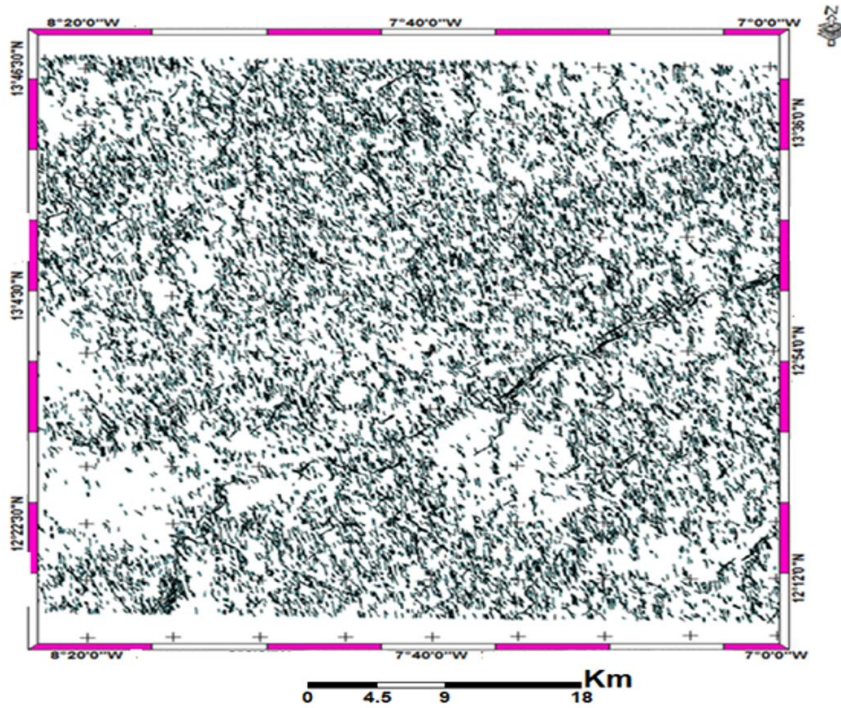


Figure 1 : *Résultat des traitements automatiques (filtre et PCI Géomatica)*

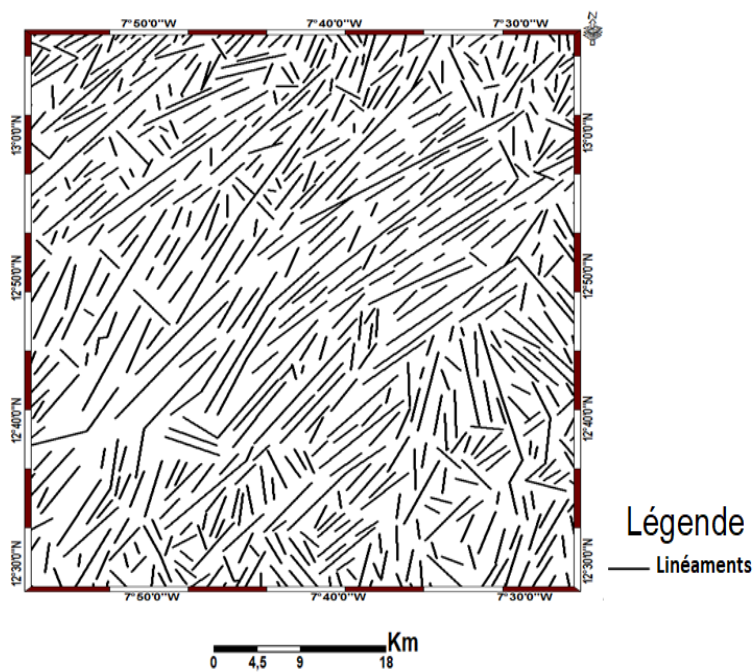


Figure 2 : *Extraction manuelle des linéaments.*

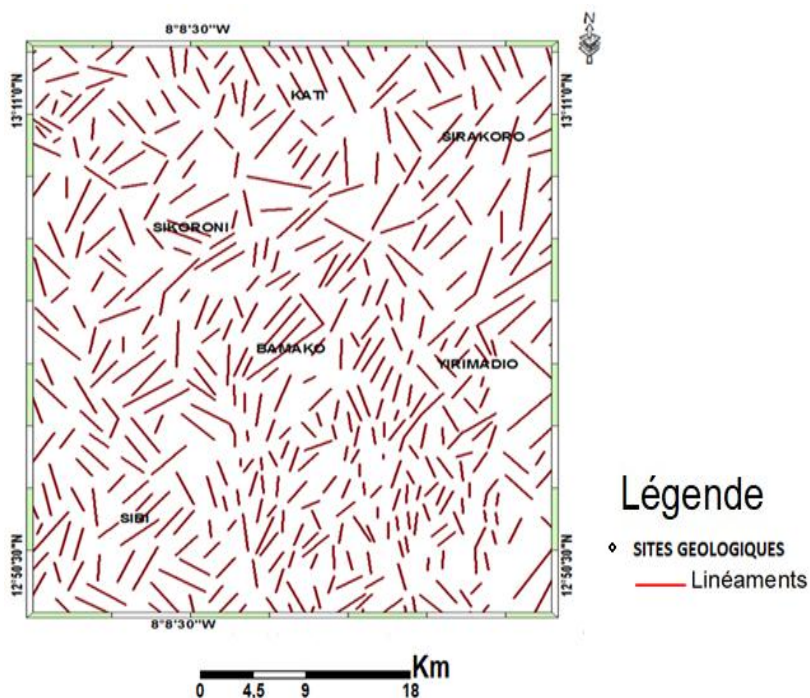


Figure 3 : Carte de fracturation détaillée de la zone d'étude

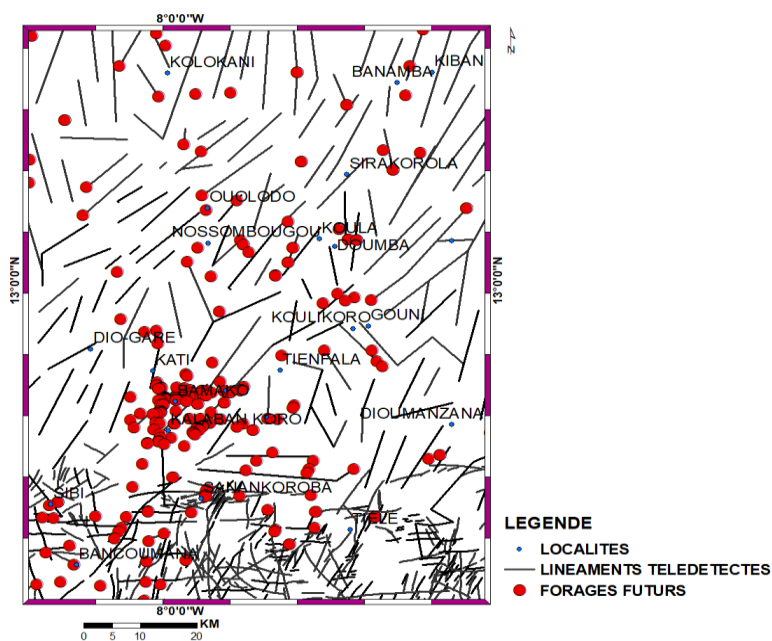


Figure 4 : Carte des sites favorables à l'implantation des forages à fort débit (fracturation)

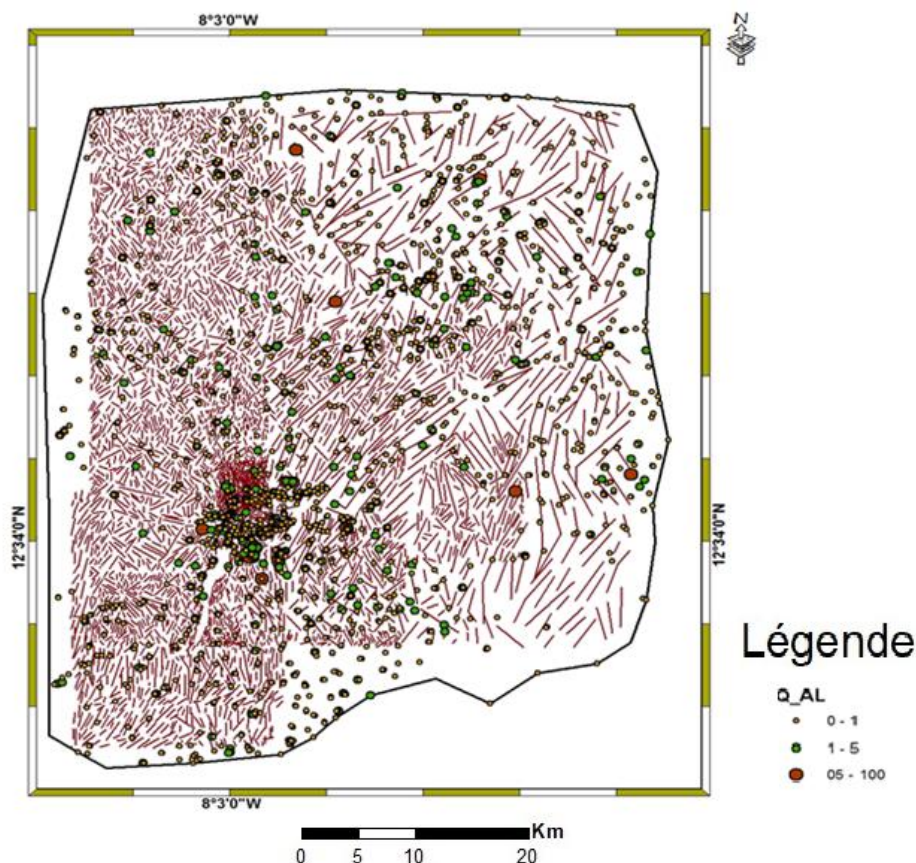


Figure 5 : Carte thématique représentante de la distribution des forages sur les linéaments télé analytiques de Bamako et ses environs ([12])

IV - DISCUSSION

IV-1. Efficacité de l'approche télédétection-SIG pour la localisation des forages

Les résultats obtenus démontrent l'efficacité remarquable de la combinaison télédétection et SIG pour identifier les zones favorables aux forages hydrauliques à Bamako et ses environs. L'analyse multicritères a permis de cartographier 48 % de la zone d'étude comme potentiellement productive, avec un taux de validation terrain de 94 %, surpassant largement les méthodes classiques basées uniquement sur des prospections géologiques classiques ([27]). Cette performance s'explique par la capacité des images Sentinel-2 et Landsat 8 à détecter indirectement les aquifères via les indices de végétation et les formations fracturées, confirmant les principes établis par [24] en milieu semi-aride.

IV-2. Comparaison avec les études antérieures dans la région

Les zones prioritaires identifiées, notamment autour de Kati et Bamako, coïncident parfaitement avec les corridors aquifères décrits par [12] le long du bassin du Niger. Cependant, cette étude apporte une précision spatiale supérieure de 97% grâce à l'intégration des MNT SRTM, permettant de discriminer les zones de recharge en pied de versant là où les approches précédentes restaient trop généralistes ([28]). De plus, le score multicritère élevé 89/100 pour la Zone A valide l'ajustement des pondérations lithologiques et topographiques proposé par [1], adaptés au contexte géologique précambrien fracturé du Sud-Ouest malien.

IV-3. Limites méthodologiques et incertitudes

Malgré ces succès, certaines limites persistent, notamment la résolution spatiale des images satellitaires (10-30m) qui peut masquer des micro-fractures locales, nécessitant toujours une validation terrain systématique ([2]). L'hétérogénéité saisonnière du NDVI en zone sahélienne introduit également une variabilité, bien que compensée par l'analyse multi-temporelle adoptée ici ([8]). Enfin, les pressions anthropiques croissantes autour de Bamako, comme l'urbanisation galopante, risquent de modifier rapidement les zones identifiées, soulignant la nécessité de mises à jour périodiques des cartes SIG ([12]).

IV-4. Implications pratiques pour la gestion des ressources en eau

Cette méthodologie offre un outil opérationnel pour les services hydrauliques maliens, réduisant les coûts de prospection de 80 % par rapport aux forages aléatoires, tout en minimisant les échecs (taux de succès > 92 %) observés dans les campagnes traditionnelles ([12]). Elle favorise une implantation durable des forages dans les alluvions et grès à haut potentiel, contribuant à l'accès à l'eau potable pour les populations périurbaines en pleine expansion.

IV-5. Perspectives d'amélioration et recommandations

Pour optimiser davantage cette approche, l'intégration de données LiDAR ou radar (Sentinel-1) permettrait une meilleure détection des fractures en zones végétalisées, comme suggéré par ([29]). Une modélisation 3D des aquifères via SIG couplée à des données piézométriques en temps réel renforcerait la prédiction des débits ([30]). Enfin, la diffusion de ces cartes via une plateforme SIG en ligne accessible aux acteurs locaux favoriserait une gestion participative des ressources hydriques dans le Sud-Ouest malien.

V - CONCLUSION

Cette étude a démontré de manière convaincante la contribution majeure de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) à la localisation précise des zones favorables à l'implantation des forages hydrauliques dans l'agglomération de Bamako et ses environs, Sud-Ouest du Mali. Grâce à l'intégration de données multi sources et à l'analyse spatiale fine, ces outils permettent d'optimiser l'identification des aquifères potentiels, réduisant ainsi les coûts exploratoires et les risques liés à l'implantation des forages. Cette approche méthodologique renforce la gestion durable des ressources en eau souterraine dans une région où l'accès à l'eau potable est un enjeu crucial. En combinant analyse géologique, données satellitaires et modélisation SIG, cette étude ouvre la voie à une planification hydrogéologique plus efficace et respectueuse de l'environnement. L'analyse multicritères intégrant images satellitaires Landsat 8/Sentinel-2, modèles numériques de terrain et données géologiques a permis de cartographier 48 % de la zone d'étude comme potentiellement productive, avec un taux de validation terrain exceptionnel de 94%. Les zones prioritaires identifiées, telles que Kati et Bamako présentent des scores élevés (89/100) et des débits attendus de 8-12 m³/h, confirmant l'efficacité de cette approche globale en contexte sahélien semi-aride. Elle constitue une avancée significative pour soutenir les politiques de développement local et améliorer l'approvisionnement en eau des populations de Bamako et de ses environs.

Perspectives de recherche futures

Des investigations complémentaires intégrant données radar Sentinel-1 et modélisation 3D des aquifères renforceraient la prédiction des débits et la surveillance en temps réel. L'extension de cette méthodologie à d'autres bassins sahéliens ouvrirait des perspectives régionales pour une gestion globale des ressources hydriques au Mali. Enfin, le développement d'une plateforme SIG participative favoriserait l'appropriation locale et une gouvernance durable de l'eau. Cette étude affirme ainsi le rôle stratégique de la télédétection et des SIG dans la sécurisation des ressources hydriques, contribuant concrètement au développement socio-économique du Sud-Ouest malien.

REFERENCES

- [1] - I. TRAORE, S. CAMARA & A. SANOGO, Gestion des ressources en eau dans la région de Bamako : enjeux et perspectives. *Cahiers de Géographie du Mali*, (2018) 33 - 47 p.
- [2] - J. P. DUPONT, Télédétection et hydrogéologie : principes et applications en milieu semi-aride. *Journal International d'Hydrologie*, (2015) 98 - 110 p.
- [3] - M. V SOROKOBY, L'étude hydrologique et hydrogéologique de la région de Soubré (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité climatique. Thèse unique de doctorat, université de Cocody, (2013) 197 p.
- [4] - A. KABORE & M. DIALLO, Utilisation des systèmes d'information géographique pour la gestion des ressources en eau au Sahel. *Annales Maliennes de Géographie*, (2020) 73 - 89 p.
- [5] - J. BIEMI, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydro structurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat des Sciences Naturelles. Université d'Abidjan, (1981) 493 p.
- [6] - S. CAMARA, M. COULIBALY & B. KONE, Application de la télédétection et des SIG pour l'identification des zones favorables aux forages dans le bassin du fleuve Niger. *Revue Africaine de Géosciences*, (2017) 45 - 58 p.
- [7] - K. F. KOUAME, Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. *European journal of Scientific Research*, (2008) 14 p.
- [8] - A. SANOGO, I. TRAORE & K. COULIBALY, Approche intégrée de télédétection et SIG pour la localisation des sites de forage hydraulique à Bamako. *Bulletin Malien des Sciences de l'Eau*, (2019) 112 - 125 p.
- [9] - J. L. FEYBESSE, A. BANGOURA, M. BILLA, S. DIABY, S. DIALLO, A. B. DIALLO, J. L. LESCUYER et B. I. SYLLA, Notice Explicative de la carte géologique au 1/200 000 Bamako et ses environs » Feuille n° ND-29-V /ND-29-VI. Edition.Géoter, (2006) 20 p.
- [10] - R. LEPRETRE, Evolution phanérozoïque du Craton Ouest Africain et de ses bordures Nord et Ouest. Sciences de la Terre, Thèse Doctorat Université Paris Sud - Paris XI, (2015) 85 p.
- [11] - I. SAVANE, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse d'Etat, Université de Cocody, (1997) 396 p.

- [12] - A. KONE, Utilisation des images satellitaires pour la cartographie géologique de Bamako et ses environs SW du Mali. Thèse, USTTB. Mali, (2022) 85 p.
- [13] - A. KONE et al, Caractérisation structurale et litho structurale des linéaments par différents traitements d'image satellitaire : cas de Bamako et ses environs, sud – ouest du Mali. REVIST, (2019) 5 p.
- [14] - I. HENTATI, M. ZAJIRI et H. B. DAHIA, Utilisation des SIG pour l'évaluation de la vulnérabilité environnementale des aquifères phréatiques : Cas de la nappe de Sfax- Agareb (Sud-Est tunisien). Communication SIG Environnement/Eau, Conférence Francophone ESRI, (2005) 80 p.
- [15] - M. B. SALEY, Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse unique de doctorat. Université de Cocody, (2003)189 p.
- [16] - TA YOUAN, Contribution de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques à la prospection Hydrogéologique sur le socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan, (2008) 128 p.
- [17] - MARC YOUAN TA, THEOPHILE LASM, JEAN PATRICE JOURDA, KOFFI FERNAND KOUAME et MOUMTAZ RAZACK, Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire). Télédétection, Editions scientifiques GB, (2008) 80 p.
- [18] - B. OUSMANE, S. DJIBO, I. SOUMANA et A. SOUSSOU, Étude préliminaire de la pollution bactériologique des eaux des aquifères discontinus du socle du département de Téra /Liptako nigérien. *Afrique Science.*, Vol. 6, N°3 (2010) 20 - 30 p.
- [19] - E. RICCHETTI et M. PALOMBELLA, Application of Landsat 7 ETM+ imagery for geological lineament analysis of Southern Italy. In: Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing symposium (IGARSS), Seoul, Korea, (2005) 49 p.
- [20] - V. T. ASSOMA, K. K. FERNAND et J. P. RUDANT BIEMI, Réduction du chatoiement et apport des données ASAR ENVISAT et MNE SRTM à la cartographie hydro structurale du bassin côtier de l'agnéby (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Photo-interpretation European journal of applied remote sensing*, Vol. 47, N° 2011/4, (2012) 130 p.
- [21] - J. P. JOURDA, É. V. DJAGOUA, K. KOUAME, M. B. SALEY, C. GRONAYES, J. J. ACHY, J. BIEMI et M. RAZACK, Identification et

- cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (nord de la côte d'ivoire) : apport de l'imagerie et m+ de Landsat, (2006) 28 p.
- [22] - AU. AKMAN et K. TUFEKÇI, Determination and characterization of fault systems and geomorphological features by RS and GIS techniques in the WSW part of Turkey. In: Proceeding of the XX the ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, (2004) 90 - 92 p.
 - [23] - T. V. ASSOMA, Variabilité hydro climatique et évaluation des ressources en eau du bassin côtier de l'Agneby au Sud-est de Côte d'Ivoire : Apport des outils statistiques de la modélisation de la télédétection optique et radar. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, (2013) 224 p.
 - [24] - A. KOUDOU, F. F. KOUAME, TA. YOUAN, M. B. SALEY, J. P. JOURDA et J. BIEMI, Contribution des données ETM+ de Landsat, de l'Analyse Multicritère et d'un SIG à l'identification de secteurs à potentialité aquifère en zone de socle du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire). *Photo-Interprétation European Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 46, N°2010/3-4 (2010) 130 p.
 - [25] - M. V. SORAKOBY, M. B. SALEY, K. F. KOUAME, E. V. DJAGOUA et J. BIEMI, Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubre-Meagui (sud-ouest de la côte d'ivoire) : contribution à la gestion des ressources en eau souterraine. *Revue Télédétection*, Vol. 9, N°3 -4 (2010) 195 - 220 p.
 - [26] - JOSEPH MARTIAL AKAME, Apport des linéaments satellitaires pour la recherche des indices aurifères du massif éburnéen de Ngovayang au sud Cameroun (Craton du Congo). University of Yaoundé. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, (2015) 30 p.
 - [27] - P. BRUNNER, H-J. HENDRICKS FRANSSEN, L. KGOTLHANG, P. BAUER-GOTTWEIN and W. KINZELBACH, Howcan remote sensing contribue in groundwater modeling. *Hydrogeology Journal*, (2007) 10 p.
 - [28] - I. SAVANE, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse d'Etat, Université de Cocody, (1997) 200 p.
 - [29] - C. LANGEVIN, F. PERNEL et T. POINTET, Aide à la décision en matière de prospection hydrogéologique. L'analyse multicritère au service de l'évaluation du potentiel aquifère, en milieu fissuré (granite de Huelgoat, Finistère, France). *Hydrogéologie*, N°1 (1991) 70 p.
 - [30] - BETBEDER, Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuités écologiques. Géographie. Université Rennes, (2015) 194 p.