



Evaluating of the potential groundwater zones using GIS and remote sensing Case study of Sandougou sub-basin (Gambia Basin)

¹Cheikh Faye, ²Boubacar Solly, ³Sidy Dièye, ⁴Ababacar Fall

¹ Département de Géographie,
cheikh.faye@univ-zig.sn,
U.F.R. Sciences et Technologies,
Université Assane Seck de
Ziguinchor, Laboratoire de
Géomatique et d'Environnement
Sénégal

² Département de Géographie,
b.solly1087@zig.univ.sn
U.F.R. Sciences et Technologies,
Université Assane Seck de
Ziguinchor, Laboratoire de
Géomatique et d'Environnement
Sénégal

³ Département de Géographie,
dieyesidy@gmail.com
Faculté des lettres et Sciences
Humaines, Université Cheikh Anta
Diop de Dakar
Dakar-Fann, Sénégal

⁴ Département du Génie Civil,
afall@ept.sn, Ecole Polytechnique
de Thiès, Laboratoire des Sciences
et Techniques de l'Eau et de
l'Environnement (LaSTEE)
Thiès, Sénégal

ABSTRACT

Groundwater is an important natural resource for domestic, agricultural and industrial use. Today, due to climate change, population growth, advanced irrigation practices and industrial uses, the demand for groundwater has increased considerably, and needs to be assessed. This article aims to delimit the potential groundwater zones in the Sandougou basin using GIS and remote sensing. The multi-criteria decision analysis technique (MCDA) is used by integrating different thematic layers. The thematic layers of land cover, drainage density, linear density, soil, geology, geomorphology, terrain, slope and rain were prepared and used to make the map potential groundwater areas. Weights have been assigned and standardized to each thematic layer according to their characteristic and their relation to the groundwater recharge. Finally, the thematic maps were integrated by a tool for analyzing the weighted sum of overlays to develop the areas for prospecting for groundwater. According to this method, the basin is classified as excellent for 30.9% of the surface, very good for 27.8%, moderate for 20.5%, poor for 15.3% and very poor for 4.4% in term of groundwater potential. This analysis of the data demonstrates the importance of the use of GIS and remote sensing techniques in mapping the potential groundwater sector on a regional scale and suggests that similar techniques could be applied to other regions in this country.

Keywords:

Groundwater potential, Thematic layer, MCDA, Geospatial data, Sandougou sub-basin

Evaluation des zones potentielles d'eaux souterraines avec l'utilisation des SIG et de la télédétection

Cas du sous-bassin de la Sandougou (bassin de la Gambie)

¹Cheikh Faye, ²Boubacar Solly, ³Sidy Dièye, ⁴Ababacar Fall

¹ Département de Géographie,
cheikh.faye@univ-zig.sn
U.F.R. Sciences et Technologies,
Université Assane Seck de
Ziguinchor, Laboratoire de
Géomatique et d'Environnement
Sénégal

² Département de Géographie,
b.solly1087@zig.univ.sn
U.F.R. Sciences et Technologies,
Université Assane Seck de
Ziguinchor, Laboratoire de
Géomatique et d'Environnement
Sénégal

³ Département de Géographie,
dieyesidy@gmail.com Faculté des
lettres et Sciences Humaines,
Université Cheikh Anta Diop de
Dakar, Dakar-Fann, Sénégal

⁴ Département du Génie Civil,
afall@ept.sn
Ecole Polytechnique de Thiès,
Laboratoire des Sciences et
Techniques de l'Eau et de
l'Environnement (LaSTEE)
Thiès, Sénégal

Résumé

Les eaux souterraines sont une ressource naturelle importante pour l'utilisation domestique, agricole et industrielle. Aujourd'hui, en raison du changement climatique, de l'accroissement de la population, des pratiques d'irrigation avancées et des utilisations industrielles, la demande en eaux souterraines a considérablement augmenté, et nécessite leur évaluation. Cet article vise à délimiter les zones potentielles des eaux souterraines dans le bassin de la Sandougou en utilisant le SIG et la télédétection. La technique d'analyse décisionnelle multicritère (MCDA) est utilisée en intégrant différentes couches thématiques. Les couches thématiques de la couverture terrestre, de la densité de drainage, de la densité de linéairement, du sol, de la géologie, de la géomorphologie, du MNT, de la pente et de la pluie ont été combinées pour réaliser la carte des zones potentielles en eaux souterraines. Des poids ont été attribués et normalisés à chaque couche thématique en fonction de leur caractéristique et de leur relation avec la recharge des eaux souterraines. Enfin, les cartes thématiques ont été intégrées par un outil d'analyse de la somme pondérée des superpositions pour développer les zones de prospection des eaux souterraines. D'après cette méthode, le bassin est classé comme excellent pour 30,9% de la surface, très bon pour 27,8%, modéré pour 20,5%, pauvre pour 15,3% et très pauvre pour 4,4% en termes de potentiel en eaux souterraines. Cette analyse des données démontre l'importance de l'utilisation des SIG et des techniques de télédétection dans la cartographie des secteurs potentiels en eaux souterraines à l'échelle régionale et suggère que des techniques similaires pourraient être appliquées à d'autres régions du pays.

Keywords:

Potentiel en eaux souterraines, Couche thématique, MCDA, Données géospatiales, Sous-bassin de la Sandougou

1. Introduction

Les eaux souterraines sont une ressource naturelle importante pour l'utilisation domestique, agricole et industrielle. La demande en eaux souterraines dans le monde a considérablement augmenté en raison de l'accroissement de la population, des pratiques d'irrigation avancées et des utilisations industrielles (Jha *et al.*, 2010 ; Anduaem et Demeke, 2019) dans un contexte de changement climatique. En Afrique, les eaux souterraines sont la principale source d'eau potable et son utilisation pour l'irrigation devrait augmenter considérablement pour lutter contre l'insécurité alimentaire croissante (Edmunds, 2008; MacDonald *et al.*, 2012). L'occurrence et le mouvement des eaux souterraines dans une zone sont régis par plusieurs facteurs tels que la lithologie, les structures géologiques, le type de sol, les linéaments, la pente, le schéma de drainage, la géomorphologie, l'utilisation et la couverture des terres et les relations entre ces facteurs (Jaiswal *et al.*, 2003 ; Doll et Fiedler, 2008; Jha *et al.*, 2010 ; Chowdhury *et al.*, 2010). Plusieurs chercheurs (Saraf et Choudhury, 1998; Ganapuram *et al.*, 2009; Al-Adamat *et al.*, 2003 ; Saha *et al.*, 2010; Anduaem et Demeke, 2019 ; Rajasekhar *et al.*, 2019) ont utilisé le SIG pour délimiter les zones potentielles d'eaux souterraines dans leurs domaines d'intérêt.

L'approche intégrée des techniques de télédétection, de système d'information géographique (SIG) et d'analyse décisionnelle multicritères (MCDA) a été utilisée pour identifier les zones potentielles d'eaux souterraines et les sites de recharge artificielle favorables (Jenifer et Jha, 2017 ; Anduaem et Demeke, 2019). De nombreux chercheurs ont trouvé dans la MCDA un outil efficace pour la gestion des ressources en eau et de l'environnement (Machiwal *et al.*, 2011 ; Pourghasemiet *al.*, 2012 ; Chandio *et al.*, 2013; Althuwaynee *et al.*, 2014). Certains chercheurs ont également signalé que l'analyse multicritère basée sur les SIG est également utile pour cartographier les zones de recharge des eaux souterraines (Chowdhury *et al.*, 2010; Jha *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2017). Le processus d'analyse hiérarchique (AHP) a été utilisé par plusieurs chercheurs pour calculer l'importance relative des paramètres thématiques (Hajkowicz et Higgins, 2008; Murthy et Mamo, 2009; Chowdhury *et al.*, 2010).

Au Sénégal, le potentiel en ressources en eau (eaux de surface et souterraines) est important, et la disponibilité en eau renouvelable est évaluée aujourd'hui à environ 4747 m³/habitant/an (CONGAD, 2009). Les estimations indiquent qu'environ 80% de la population sénégalaise a accès à un approvisionnement en eau potable en 2015 (MHAS, 2015). Toutefois, les Nations Unies classent le pays dans la catégorie des pays pauvres en eau, avec moins de 1000 m³ par habitant. Ainsi, la question de l'eau est devenue une des préoccupations nationales compte tenu de la série d'enjeux auxquels est confronté le secteur (Ministère de l'Hydraulique/DGPRE, 2007). La crise de l'eau s'explique à la fois par la pénurie absolue de la disponibilité physique, la pauvreté et les politiques de gestion de l'eau inadaptées. En général, le Sénégal a un potentiel en ressources en eau important mais sa répartition inégale provoque souvent des inondations catastrophiques et de graves sécheresses qui entraînent des pertes de récoltes, du bétail, des problèmes de santé publique et une dégradation de l'environnement (Faye *et al.*, 2019).

Au Sénégal, l'accès à l'eau constitue un handicap majeur pour le monde rural. En effet, les populations sont confrontées à la fois à la rareté des points d'eau potable, à la pénibilité de

l'exhaure et au transport. La région de Tambacounda, qui couvre 95.3% de la superficie du bassin de la Sandougou, est confrontée à de réelles difficultés d'approvisionnement en eau et d'assainissement. Le taux de 51% au niveau régional, contraste avec le faible taux d'accès à l'eau (4%) de certaines communes rurales ; tandis que le taux d'assainissement régional de 17% est inférieur à la moyenne nationale (ANSD, 2010). Alors que la région se caractérise par une indisponibilité d'une ressource en eau de qualité, l'augmentation de la demande en eau aussi bien pour le bétail que les humains, justifie l'intérêt de caractériser les zones potentielles en eaux souterraines.

La cartographie du potentiel des eaux souterraines dans le bassin de la Sandougou aura un effet important dans la région de Tambacounda ainsi que dans le pays. Comme bassin versant, la Sandougou est le dernier grand affluent du fleuve Gambie (rive droite) et draine une bonne partie de la région de Tambacounda sur 113358,1 km². C'est pourquoi la cartographie des eaux souterraines permettra d'améliorer la gestion durable des ressources en eaux souterraines dans cette partie du pays. Dans la présente étude, la méthode MCDA utilisée pour développer les zones potentielles des eaux souterraines pourrait être utile aux décideurs, aux responsables politiques et aux planificateurs des ressources en eau pour une utilisation efficace et durable de la ressource en eaux souterraines (Andualem et Demeke, 2019).

Les principaux objectifs de cette étude sont de : développer des couches thématiques pour le développement de zones potentielles d'eaux souterraines, identifier et délimiter des zones potentielles d'eaux souterraines appropriées par l'intégration de différentes couches thématiques, préparer la variabilité spatiale des zones d'eaux souterraines, et démontrer l'apport de la télédétection et des SIG dans la connaissance des eaux souterraines.

2. Zone d'étude

La Sandougou, dernier grand affluent de la rive droite du fleuve Gambie, a un bassin versant de 11 900 km² et est située entre les latitudes 13°27 et 14°36 Nord et les longitudes 12°42 et 14°32 Ouest. Le bassin versant a une forme ovale grossièrement orientée Nord et Sud-ouest. Il est partagé entre l'Etat du Sénégal où il prend sa source à environ 75 m d'altitude dans le département de Bakel à l'Est, et la Gambie où il se jette dans le bief maritime du fleuve Gambie, après un parcours d'environ 200 km (Sow, 2007). Cependant, la majeure partie du bassin se situe en territoire sénégalais (Figure 1). Au plan administratif, le bassin versant de la Sandougou est à cheval sur 5 départements (Goudiry, Bakel, Koupentoum, Ranérou et Tambacounda).

Le bassin versant de la Sandougou s'étend sur une région dont les altitudes diminuent considérablement du Nord-est vers le Sud-ouest. Cette décroissance des altitudes permet de découper le bassin en deux domaines: le cours supérieur où les altitudes varient entre 57 et 96 m et qui correspond au domaine des contreforts septentrionaux du Fouta-Djalou ; la moyenne et basse Sandougou où les altitudes sont inférieures à 57 m et qui permettent à la plaine de s'étaler largement (Zade, 2011). Dans l'ensemble, le bassin versant est caractérisé par un relief plat entrecoupé par de légères dépressions qui sont généralement des vallées fossiles du système de la rivière Sandougou, et de quelques mares, entre autres. Par ailleurs, il dispose d'un important potentiel hydrographique qui provient essentiellement d'un réseau hydrographique relativement dense avec de larges ramifications.

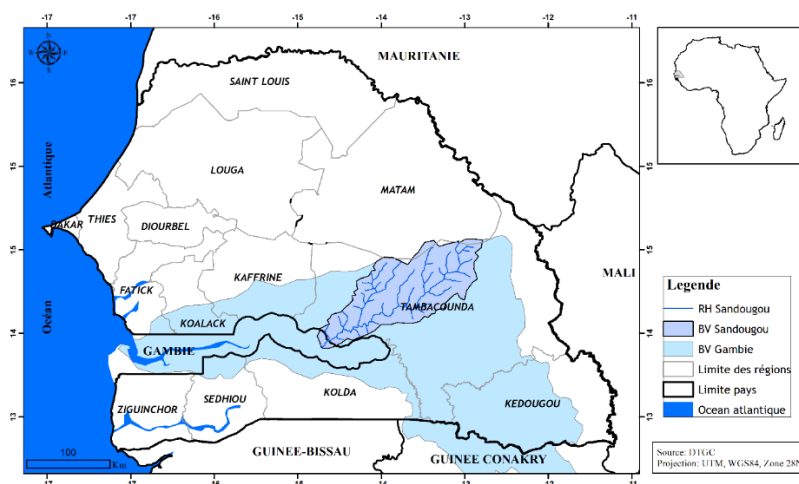


Fig. 1. Localisation du bassin de la Sandougou au Sénégal et dans le bassin de la Gambie

Ce réseau hydrographique est constitué essentiellement de la rivière Sandougou et de ses principaux affluents que sont Koussanar, Mamacounda, Badiara et Kounkala. Le régime hydrologique des cours d'eau du bassin est marqué par une période de hautes eaux pendant l'hivernage et une période de basses eaux pendant la saison sèche (Faye, 2009). Outre le réseau hydrographique, il existe un bon maillage du bassin par des mares et marigots qui représentent une source importante d'eau de surface pour l'alimentation du bétail et dans une moindre mesure pour l'agriculture. Ces mares sont alimentées par les précipitations, la Sandougou et ses affluents en période de crue et ne tarissent qu'aux mois de janvier et février.

3. Données et méthodes

3.1. Données

Pour évaluer l'indice du potentiel des eaux souterraines (GWPI), deux types de données sont utilisés: des couches vectorielles et des images satellitaires. Les données vectorielles sont composées des couches géologiques, géomorphologiques, et pédologiques. Les données géologiques sont issues des données GEOTER du Centre de Suivi Ecologique (CSE). Les données géomorphologiques sont issues de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE). Les données pédologiques sont issues du projet USAID et PNAT de 1986. Les images DEM sont acquises sur le site <https://search.asf.alaska.edu/> de Alaska Satellite Facility. Elles sont fournies par ALOS PALSAR avec une résolution spatiale de 12,5 m. Trois scènes (F0250, F0260 et F0270) pour un total de treize (13) images ont été nécessaires pour couvrir le bassin. Quant aux images satellitaires utilisées, elles proviennent de la mission Landsat dernière génération (capteur OLI) et sont acquises le 23 décembre 2019. Deux scènes ont été nécessaires pour la couverture du bassin. Il s'agit des scènes p203r050 et p203r051. Ces images dotées d'une résolution spatiale de 30 m sont très pertinentes pour cartographier l'occupation et l'utilisation des sols à l'échelle du bassin. Elles ont été téléchargées sur le site <https://earthexplorer.usgs.gov>.

3.2. Méthodes de réalisation des cartes thématiques

Pour produire la carte des sols, la carte pédologique et celle géomorphologique, les données shapefiles ont fait l'objet d'une extraction sur la base des limites du bassin, suivi d'une mise en page automatique sur Arc Gis 10.5. Pour produire la carte des pentes à partir du DEM (à partir des

images ALOS PALSAR avec une résolution spatiale de 12,5 m), nous avons également extrait la zone d'étude en utilisant les limites du bassin. Le même produit extrait a servi pour réaliser la carte de la densité de linéaments et celle de la densité de drainage. L'extension *Spatial Analyst* d'ArcGis a permis de faire l'ensemble des traitements cartographiques.

Pour produire la carte d'occupation des sols, les images satellitaires Landsat ont fait l'objet d'un certain nombre de traitements sur Idrisi TerrSet. Les différentes bandes ont été d'abord mosaïquées. Par la suite, nous avons procédé à la classification en utilisant la méthode non supervisée par emboîtement (Andrieu et Mering, 2008 ; Solly *et al.*, 2020). C'est une méthode qui a l'avantage de regrouper les pixels d'une image en classes spectrales homogènes suivant leurs signatures et de leur assigner une signification thématique (Caloz et Collet, 2001). Elle s'est faite en plusieurs étapes que sont : une première classification avec l'algorithme des nuées dynamiques (K-means) sur 10 classes, l'interprétation des signatures spectrales des classes résultantes suivies du reclassement selon une nomenclature bien adaptée à la géographie du terrain (eau, végétation, zones de cultures, et zones d'habitats), la création de masques thématiques, la classification emboîtée sur les masques, et enfin le reclassement. L'interprétation des histogrammes des classes s'est faite en fonction des valeurs numériques des pixels et de la réflectance de la surface des objets dans les différents canaux spectraux. La validation des résultats s'est faite à l'aide d'un survol aérien sur *Google Earth pro*, de points GPS relevés sur le terrain, et des cartes d'occupation des sols existantes.

3.3. Caractéristiques des cartes thématiques

3.3.1. Géologie

Les caractéristiques géologiques ou lithologiques de la zone d'étude sont indiquées sur la figure 2. La lithologie des sédiments lacustres reçoit une valeur d'influence élevée du potentiel des eaux souterraines, tout le contraire d'autres groupes lithologiques de nature colonnaire, massive et compacte. Le bassin de la Sandougou est traversé par trois couches géologiques, à savoir l'alternance de marnes et de calcaires jaunes (14,7% de la surface du bassin), les marnes grises à intercalations calcaires (41,3%) et les calcaires et marnes à nummulites (44%).

3.3.2. Géomorphologie

La géomorphologie d'une région est un facteur important utilisé pour évaluer le potentiel et la prospective des eaux souterraines, car elle contrôle leur mouvement sous la surface. Dans le paysage du bassin de la Sandougou, il existe 5 types de reliefs (Figure 3). La majeure partie du bassin est couverte de plateaux et buttes résiduelles (51,8 % de la surface du bassin) auxquels s'ajoutent successivement les versants, pentes et glacis d'épandages (27,7%), les terrasses colluvio-alluviales et vallons fonctionnels (18,5%), le complexe alluvial indifférencié (1,9%) et les vallées mortes (0,2%).

3.3.3. Pédologie

L'infiltration et la perméabilité de l'eau par les sols dépendent directement de leur texture qui influe sur l'identification du GWPI. Si les sols à texture argileuse qui ont une mauvaise propriété de drainage ont été considérés comme une excellente perspective pour les eaux souterraines, en revanche, les sols ayant une caractéristique de drainage de puits sont pauvres en stockage d'eau

souterraine. Dans le paysage du bassin de la Sandougou, il existe 5 types de sols (Figure 4) : les lithosols (50,9% de la surface du bassin), les sols peu évolués (27,7%), les sols ferrugineux tropicaux (19%), les sols hydromorphes (2,1%) et les régosols (0,3%).

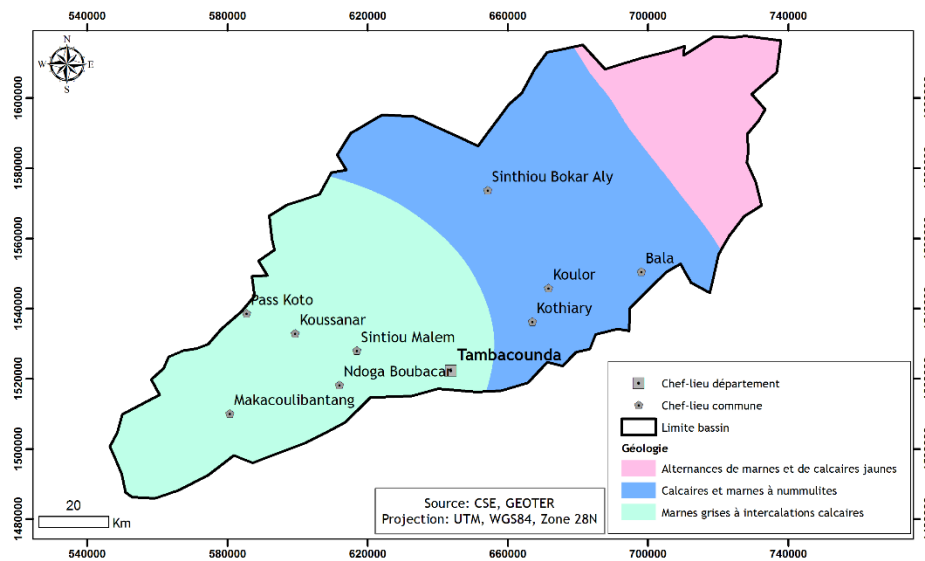


Fig. 2. Couches géologiques du bassin de la Sandougou

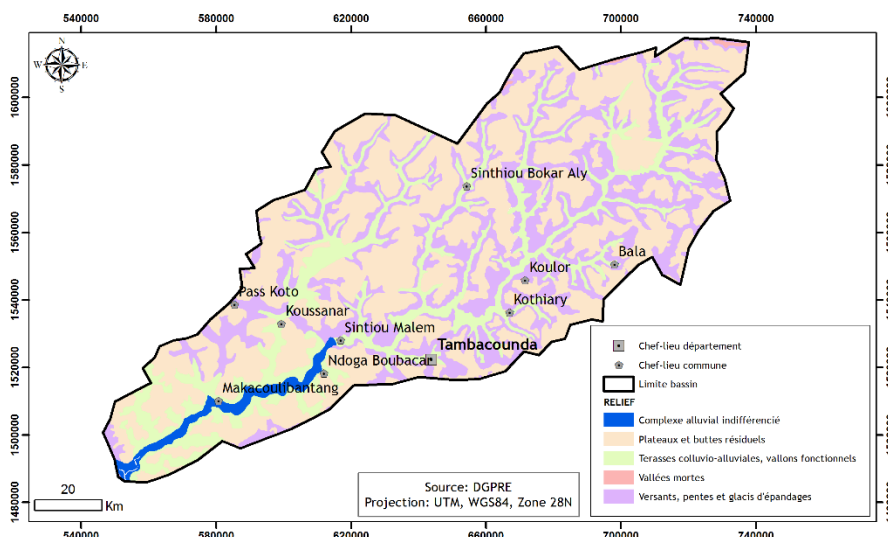


Fig. 3. Géomorphologie du bassin de la Sandougou

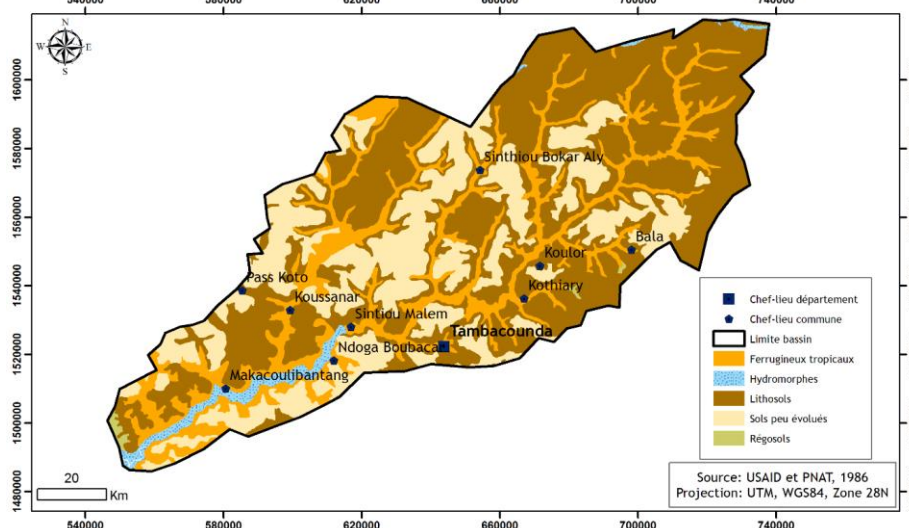


Fig. 4. Types de sols dans le bassin de la Sandougou

3.3.4. Modèle Numérique de Terrain et Pentés

La carte d'élévation de la zone d'étude reflète directement la robustesse du terrain, qui a un rôle majeur dans l'identification du potentiel en eaux souterraines. La zone, ayant une altitude plus basse (zones plates), a tendance à retenir l'eau plus longtemps, ce qui induit une plus grande infiltration. Une grande quantité de ruissellement et une moindre quantité d'infiltration sont associées aux zones à forte élévation (Godebo, 2005). Dans le bassin de la Sandougou, les altitudes diminuent considérablement du Nord-est vers le Sud-ouest. Cette situation le divise en deux : le cours supérieur, et la moyenne et basse Sandougou (Figures 5 et 6).

Dans le cours supérieur, les altitudes varient entre 57 et 96 m et correspondent au domaine des contreforts septentrionaux du Fouta-Djalon. Les pentes y sont très fortes et donnent des vallées encaissées (avec des valeurs qui avoisinent 34,2%). Au sortir de cette zone, on s'approche des plateaux (200 m d'altitude) aux pentes relativement faibles. Dans la moyenne et la basse Sandougou, les altitudes sont inférieures à 57 m et permettent à la plaine de s'étaler largement. Dans l'ensemble, le bassin versant est caractérisé par un relief plat (73,4% de la surface du bassin est constitué de pentes comprises entre 0 et 0,88%) entrecoupé par de légères dépressions.

3.3.5. Densité de linéaments

La densité des couches linéaires ou densité de linéament de la superficie du bassin de la Sandougou a été réalisée à partir du MNT avec l'outil « Line density » de l'extension *Spatial Analyst* d'ArcGis. Cette étude a utilisé la densité de linéament pour le ciblage des eaux souterraines. Les couches représentent la longueur totale des linéaments dans une unité de surface (Yeh *et al.*, 2016). Dans cette étude, la densité des linéaments a été divisée en 5 classes (Figure 7).

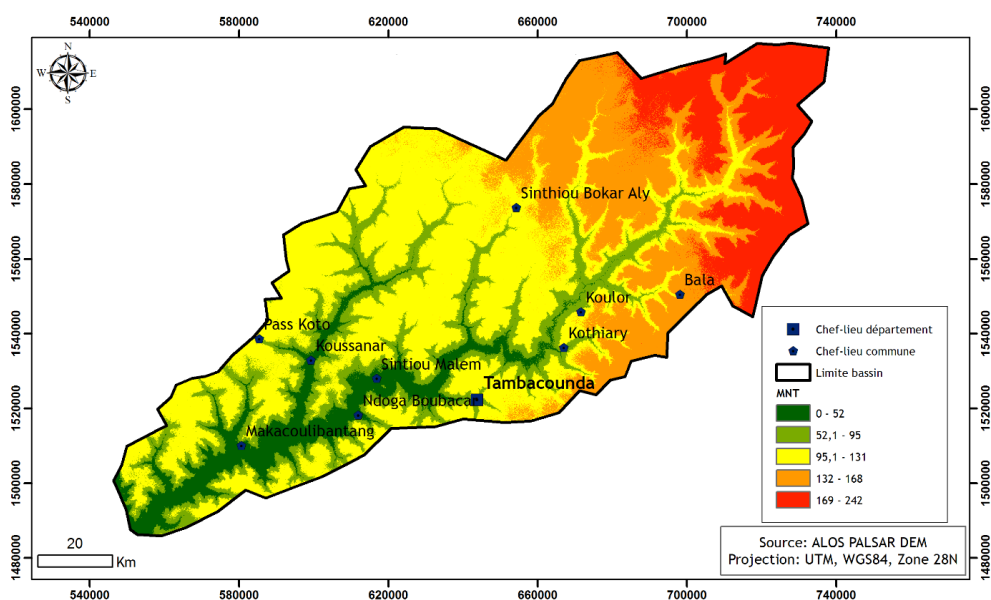


Fig. 5. Modèle numérique de terrain du bassin de la Sandougou

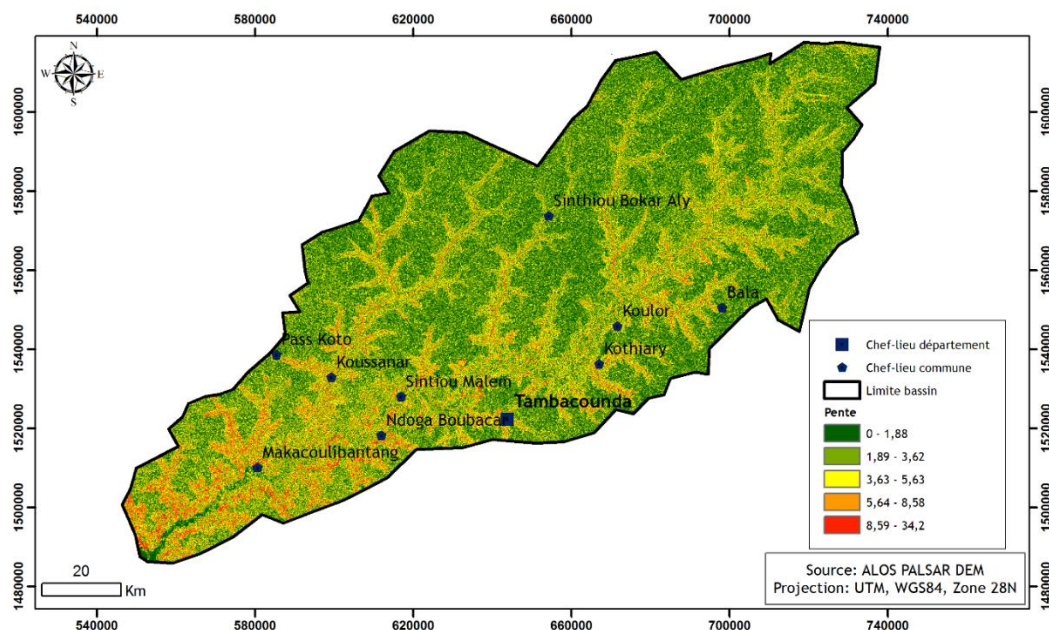


Fig. 6. Nature des pentes dans le bassin de la Sandougou

Les linéaments avec des densités de 0,51 à 1,18 km/km² dominaient la zone d'étude avec 4635 km² (38,9%). Ils sont suivis par les linéaments avec des densités allant de 0 à 0,51 km/km² qui représentent 29,5% du paysage du bassin. La densité du linéament est directement proportionnelle au potentiel en eaux souterraines. Les zones ayant une densité linéamentaire comprise entre 0,2 et 0,25 km/km² qui ont été considérées comme d'excellentes zones de prospection d'eaux souterraines (Andualem et Demeke, 2019) ne couvrent que 0,2 % de la superficie du bassin. Des pondérations appropriées ont été attribuées à chaque classe de pente.

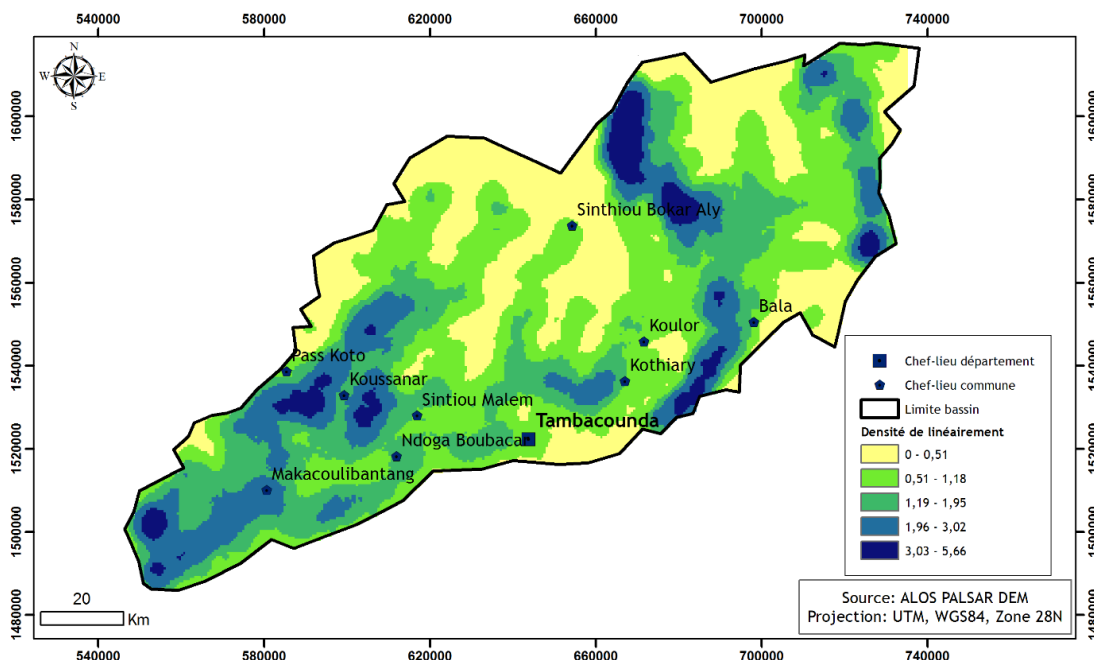


Fig. 7. Densité des couches linéaires dans le bassin de la Sandougou

3.3.6. Densité de drainage

La densité de drainage (km/km²) exprime la proximité de l'espacement des canaux des cours d'eau, fournissant ainsi une mesure quantitative de la longueur moyenne des canaux des cours d'eau de

l'ensemble du bassin (Strahler, 1964; Singh *et al.*, 2014). Elle a une relation inverse avec la perméabilité des aquifères et joue un rôle essentiel dans la distribution des eaux de ruissellement et le niveau d'infiltration (Andualem et Demeke, 2019). Dans le cadre du bassin de la Sandougou, elle a été produite à partir du modèle numérique de terrain dans la plate-forme ArcGIS. Les résultats ont montré que plus de 88% de la superficie du bassin a une densité de drainage supérieure 10km/km² alors qu'environ 48,7% et 20,6% se trouvaient respectivement dans les classes de densité de drainage élevé (12,8-14,2km/km²) et très élevé (14,3-14.1km/km²)(Figure 8).

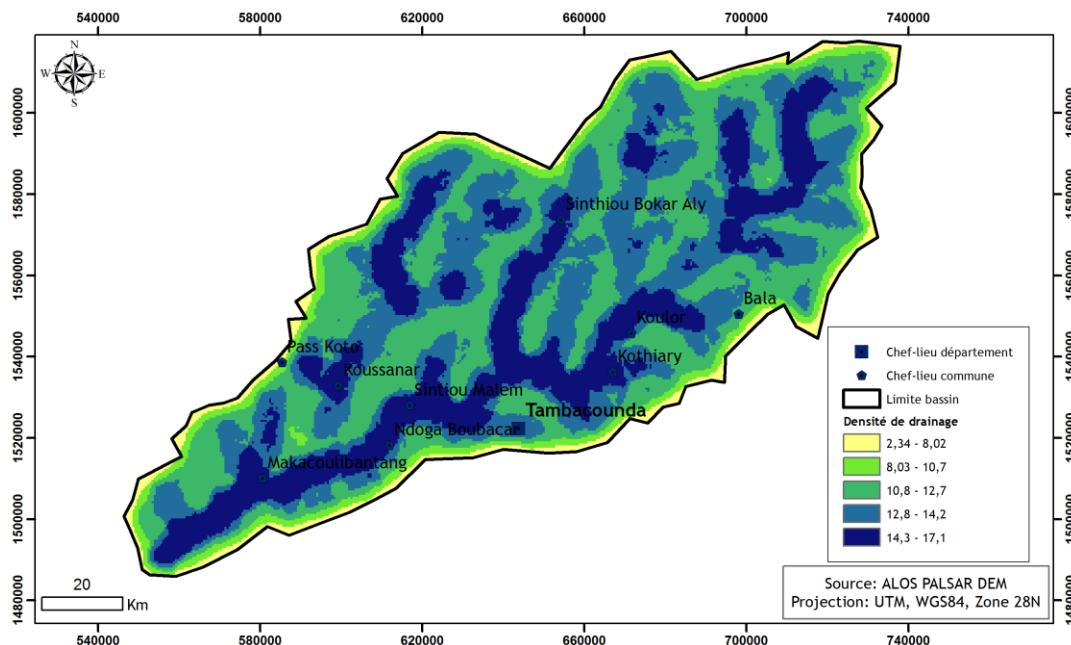


Fig. 8. Densité de drainage dans le bassin de la Sandougou

3.3.7. Occupation des sols

La carte de l'occupation des sols a été réalisée à partir des images satellitaires *Landsat* acquises le 23 décembre 2019 à partir de la plateforme USGS. Elles ont été classées à l'aide de l'outil de télédétection *Idrisi TerrSet*.

L'utilisation et les changements de couverture terrestre sont l'une des principales activités induites par l'homme qui altèrent la présence et le développement des ressources en eau souterraine (Patra *et al.*, 2019). Le bassin de la Sandougou comprend 4 types d'occupation des sols, à savoir les terres cultivées, les zones d'habitat, la végétation et l'eau. Le paysage du bassin est dominé par la végétation qui couvre une surface de 10234 km² (soit 85,8% de la surface du bassin). Les zones de cultures correspondent au second couvert dominant avec 1637 km² (soit 13,7%). Les zones d'habitation avec 42 km² (soit 0,35%) et le réseau hydrographique avec 7,9 km² (soit 0,07%) constituent les classes d'occupation des sols les plus faibles.

3.3.8. Pluviométrie

Les précipitations constituent une composante importante du cycle de l'eau et jouent un rôle majeur dans la recharge des nappes souterraines. La quantité et la distribution spatio-temporelle des précipitations ont largement influencé l'hydrologie et les conditions hydrogéologiques. Bien que l'intensité des précipitations et la combinaison avec d'autres conditions favorables aident à

identifier le GWPI, la possibilité d'avoir plus d'eaux souterraines est élevée lorsque les précipitations sont élevées, et faible lorsqu'elles sont faibles (Patra *et al.*, 2019).

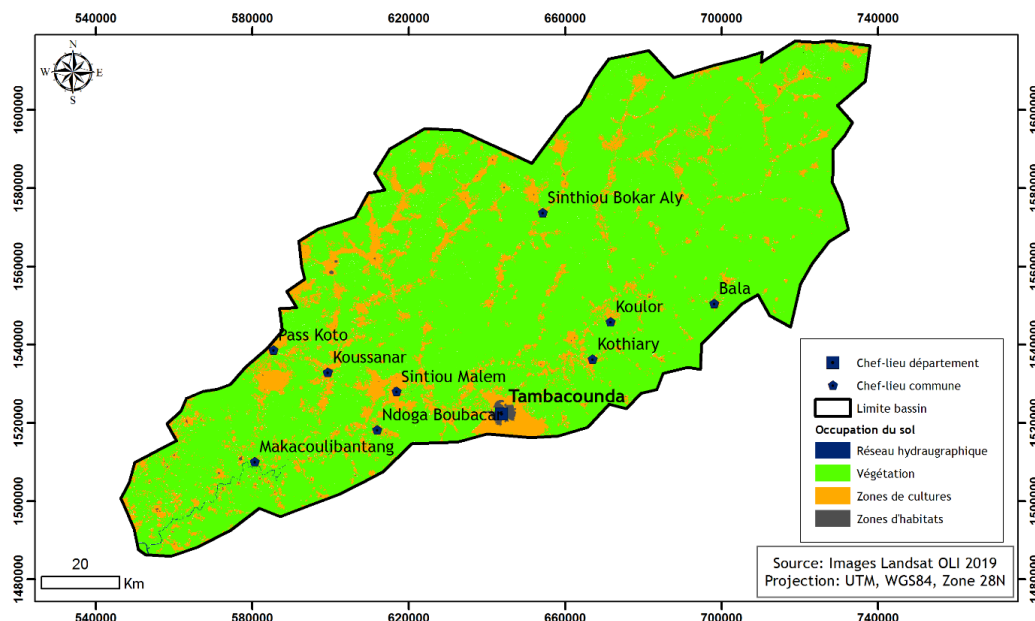


Fig. 9. Occupation des sols dans le bassin de la Sandougou

Les précipitations varient non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps. Par conséquent, il est nécessaire de déterminer leur influence pour identifier le GWPI. Dans le bassin de la Sandougou, la pluviométrie connaît un gradient marqué par une diminution du Nord-est au Sud-ouest (Figure 10). Elle connaît également une importante variation à l'échelle annuelle, allant de 803 mm dans la partie Sud-est du bassin (dans le domaine nord soudanien) à 587 mm dans la partie Nord-est (dans les limites sud du domaine sahélien). La pluviométrie est relativement bonne du fait de la position du bassin entre les isohyètes 500 (au nord) et 1000 mm (au sud).

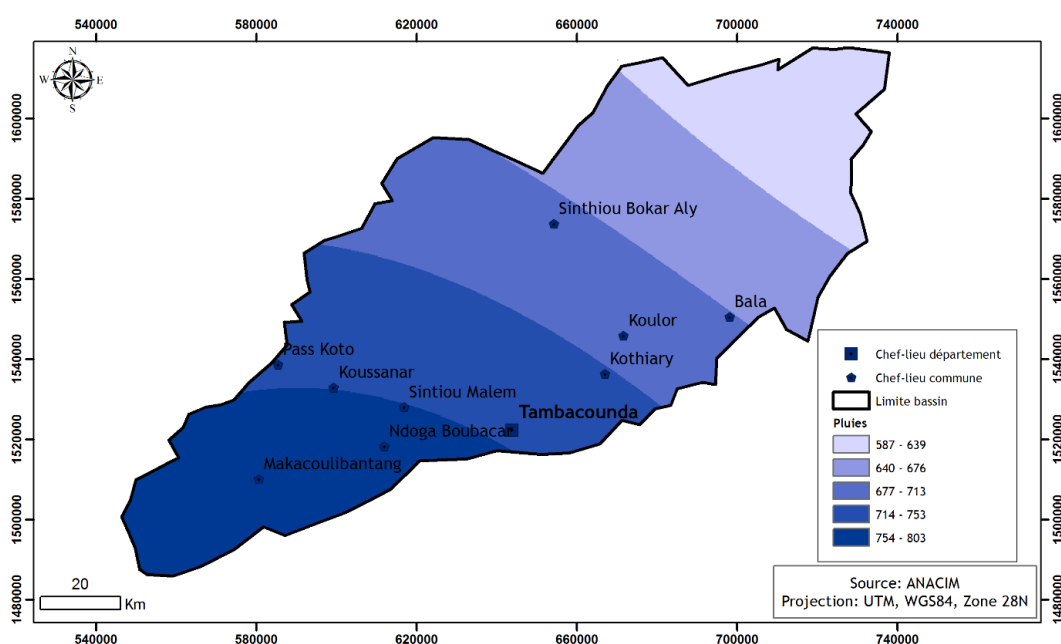


Fig. 10. Variation de la pluviométrie dans le bassin de la Sandougou

3.4. Assignation de poids

Une analyse décisionnelle multicritère a été utilisée pour déterminer les poids respectifs des cartes thématiques déterminantes (Tableau 1). Les facteurs de conditionnement des eaux souterraines ont été pondérés sur la base des connaissances des experts et de l'analyse documentaire de plusieurs chercheurs (Ibrahim-Bathis et Ahmed, 2016 ; Yeh *et al.*, 2016 ; Naghibi *et al.*, 2017 ; Andualem et Demeke, 2019). L'outil "WeightedSum Overlay" disponible sur *Spatial Analyst* a été utilisé pour superposer les cartes thématiques.

N°	Thème	Base de la catégorisation	Poidsassigné
1	Géologie	Type de roche, caractère d'altération, joints, fractures, etc.	7
2	Pluviométrie	Quantité et distribution spatio-temporelle	7
3	Pente	Pourcentage de la pente	5
4	Géomorphologie	Type de terrain	4.5
5	Densité de linéaments	Valeurlinéaire	4
6	Densité de drainage	Valeur de la densité de drainage	3.5
7	Occupation du sol	Type, statut et état de la couverture terrestre	3
8	Type de sol	Perméabilité, porosité et texture	2.5

Tableau 1. Critères d'attribution de poids des cartes thématiques

La comparaison par paire entre couches thématiques a été obtenue sur la base des méthodes employées par plusieurs chercheurs (Chowdhury *et al.*, 2010 ; Machiwal *et al.*, 2011; Sahoo *et al.*, 2015 ; Andualem et Demeke, 2019) et présentée dans le Tableau 2.

	GG	Pmm	Pente	GM	LD	DD	Sol	LC	Moyennegéo métrique	Poidsnor malisé
GG	7/7	7/7	7/5	7/4.5	7/4	7/3.5	7/2.5	7/3	1.72	0.19
Pmm	7/7	7/7	7/5	7/4.5	7/4	7/3.5	7/2.5	7/3	1.72	0.19
Pente	5/7	5/7	5/5	5/4.5	5/4	5/3.5	5/2.5	5/3	1.23	0.14
GM	4.5/7	4.5/7	4.5/5	4.5/4.5	4.5/4	4.5/3.5	4.5/2.5	4.5/3	1.11	0.12
LD	4/7	4/7	4/5	4/4.5	4/4	4/3.5	4/2.5	4/3	0.98	0.11
DD	3.5/7	3.5/7	3.5/5	3.5/4.5	3.5/4	3.5/3.5	3.5/2.5	3.5/3	0.86	0.10
Sol	2.5/7	2.5/7	2.5/5	2.5/4.5	2.5/4	2.5/3.5	2.5/2.5	2.5/3	0.61	0.07
LC	3/7	3/7	3/5	3/4.5	3/4	3/3.5	3/2.5	3/3	0.74	0.08
Total de la colonne									8.97	

Tableau 2. Comparaison par paires entre les couches thématiques

GG = Géologie, Pmm= Pluviométrie, GM = Géomorphologie, LD = Densité des couches Linéaires, DD = Densité de Drainage, LC = Occupation du sol

Les poids normalisés des différents thèmes et de leurs différentes couches ont été calculés à l'aide de la méthode AHP. Les paires de critères Ci (dans la ligne) et Cj (dans la colonne) ont été considérées sur la base de : 1) quel critère était important, Ci ou Cj et 2) dans quelle mesure ledit critère est plus important par rapport au critère de moindre importance. Les pondérations normalisées ont été déterminées en divisant chaque Ci (valeurs de la ligne) par le total de la colonne (Tableau 2).

Thème	Dossier/classe	Poidsas signé	Moyennegéo métrique	Poidsnorm alisé
Couverture des terres	Végétation	6	2.16	0.28
	Zone d'habitat	1	0.36	0.05
	Zone de cultures	7	2.53	0.33
	Eau	7.5	2.71	0.35
Densité de drainage	[2,34 -8,0]	7	3.05	0.39
	[8,03 -10,07]	5	2.18	0.28

(km/km ²)	[10,08 -12,7]	3	1.31	0.17
	[12,8 -14,2]	2	0.87	0.11
	[14,3 -17,1]	1	0.44	0.06
Texture du sol	FerrugineuxTropicaux	7	1.37	0.25
	Sols Hydromorphes	7.5	1.46	0.26
	Lithosols	6	1.17	0.21
	Sols peuévolués	5	0.98	0.18
	Régosols	3	0.59	0.11
	[0-0,88]	7	1.88	0.30
Pente (%)	[1,89-3,62]	6	1.61	0.26
	[3,63-5,63]	5	1.34	0.22
	[5,64-8,58]	3	0.81	0.13
	[8,59-34,2]	2	0.54	0.09
Géomorphologie	Complexe alluvial indifférencié	7	3.98	0.44
	Plateaux et buttes résiduels	2	1.14	0.13
	Terrasses colluvio-alluviales, vallons fonctionnels	5	2.84	0.31
	Valléesmortes	1	0.57	0.06
Géologie	Versants, pentes et glaciers d'épandages	1	0.57	0.06
	Alternances de marnes et de calcaires jaunes	7	1.48	0.33
	PartieGambie	3	0.63	0.29
	Marnes grises à intercalations calcaires	6	1.26	0.29
Densité du linéament (km/km ²)	Calcaires et marnes à nummulites	5	1.05	0.24
	[0-0,51]	3	0.59	0.11
	[0,51-1,18]	5	0.98	0.18
	[1,19-1,95]	6	1.17	0.21
	[1,96-3,02]	7	1.37	0.25
Pluviométrie (mm)	[3,03-5,66]	7.5	1.46	0.26
	[587-639]	4	0.71	0.14
	[640-676]	5	0.89	0.17
	[677-713]	6	1.07	0.20
	[714-753]	7	1.25	0.24
	[754-803]	7.5	1.34	0.25

Tableau 3. Poids des caractéristiques thématiques en fonction du niveau de la contribution des eaux souterraines du bassin de la Sandougou

Dans cette étude, le rapport de cohérence (CR) est de 0,029 ; ce rapport reflète un niveau raisonnable de cohérence dans la phase de comparaison par paires. Par conséquent, on peut voir que les modèles AHP appliqués dans cette étude ont montré une assez bonne précision dans la prédiction spatiale de la probabilité en eaux souterraines.

Des poids ont été attribués en fonction des caractéristiques du thème et de sa relation avec la contribution des eaux souterraines. La moyenne géométrique et les poids normalisés (Tableau 3) ont été élaborés sur la base du poids attribué à chaque caractéristique et de la comparaison par paires entre les classes de caractéristiques. Les zones présentant une forte densité de linéaments ont été caractérisées comme des zones de forte recharge des eaux souterraines (Yeh *et al.*, 2016; Naghibi *et al.*, 2017; Rajaveni *et al.* ; 2017 ; Andualem et Demeke, 2019). Les zones à forte densité de drainage se sont vu attribuer un poids très faible (Rahmati *et al.*, 2015; Ibrahim-Bathis et Ahmed, 2016). Les zones à faible pente et plates ont été considérées comme prioritaires pour la recharge et le stockage des eaux souterraines, car elles ont eu plus de temps de concentration pour rester à la surface du sol et percoler dans le sous-sol. Alors que les pentes raides favorisent l'écoulement des précipitations sous forme de ruissellement plutôt que leur percolation dans le

sous-sol. Elles sont donc classées dans la catégorie des zones à très faible potentiel d'eaux souterraines (Rajaveni *et al.*, 2017).

3.5. Développement de la carte du potentiel des eaux souterraines

La carte du potentiel des eaux souterraines a été élaborée en superposant les couches thématiques déterminantes qui contribuent aux eaux souterraines. Les zones de prospection des eaux souterraines ont été évaluées sur la base de l'indice du potentiel des eaux souterraines (GWPI) calculé à partir de l'intégration de toutes les couches thématiques influençant les eaux souterraines. L'outil "analyse de superposition pondérée" (weighted overlay analysis) a été utilisé pour calculer les valeurs de l'indice de potentiel des eaux souterraines en appliquant l'équation proposée par Malczewski (1999) :

$$GWPI = \sum_{w=1}^m \sum_{j=1}^n (W_j \times X_i)$$

Où W_j est le poids normalisé de la j ème couche thématique, X_i est le poids normalisé de la i ème caractéristique de la couche thématique, m est le nombre total de couches thématiques, et n est le nombre total de caractéristiques d'un thème donné.

Les valeurs du GWPI ont été utilisées pour savoir si une zone est excellente, très bonne, modérée, mauvaise ou très mauvaise en terme de potentiel en eaux souterraines (Jha *et al.*, 2010 ; Chowdhury *et al.*, 2010 ; Sahoo *et al.*, 2015).

3.6. Validation des cartes des eaux souterraines

Pour la validation de la carte du potentiel en eaux souterraines élaborée à l'aide de cartes thématiques (Naghibi *et al.*, 2016), les cartes de débit exploitable, de niveau statique et de profondeur des puits ont été constituées et superposées aux cartes de prospection des eaux souterraines développées. Les données issues de la station hydrogéologique de la région de Tambacounda (débit exploitable, niveau statique et profondeur des puits) et sont obtenues auprès de la direction Régionale de l'Hydraulique de Tambacounda.

4. Resultats et discussions

4.1. Zones de prospection des eaux souterraines

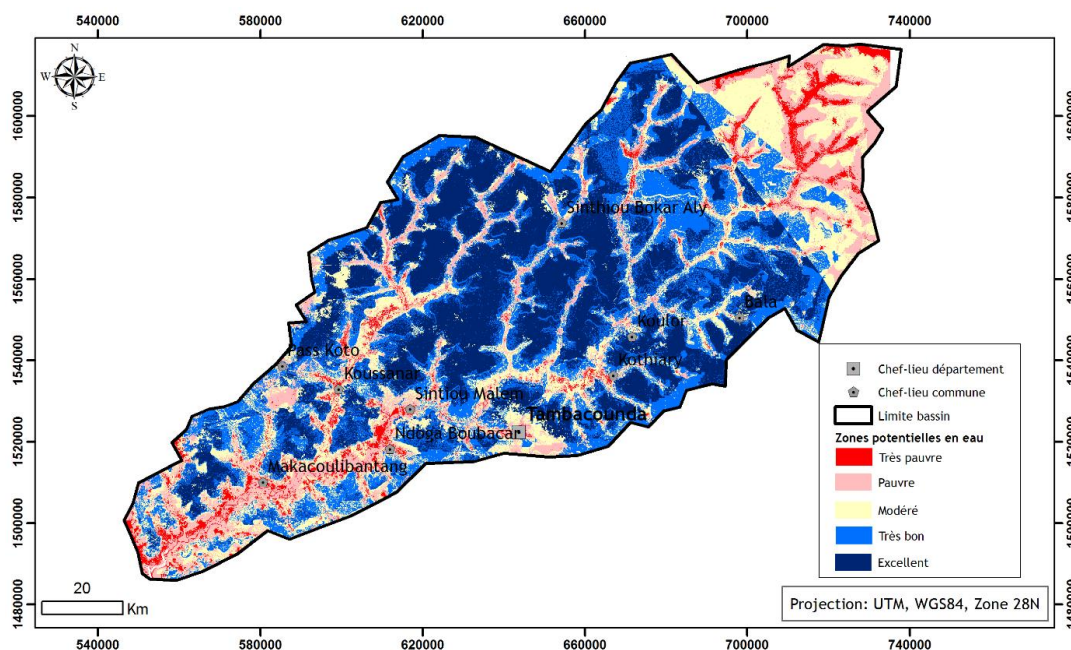
La carte de prospection des eaux souterraines de la zone d'étude a montré que les parties en aval avaient un potentiel élevé (meilleure zone de prospection) en raison de la pente plate, qui entraîne un taux d'infiltration plus élevé. La carte de l'indice de potentiel des eaux souterraines du bassin de la Sandougou a été préparée en utilisant une décision multicritère (Figure 11). Sur la base des valeurs de l'indice de potentiel des eaux souterraines, les zones de prospection ont été classées en cinq groupes (Tableau 4) en utilisant la méthode de classification des cassures naturelles de Jenks de l'environnement ArcGis.

N°	GWPI	Indices de prospection des eaux souterraines	Superficie (km ²)	Pourcentage
1	0.11–0.16	Très pauvre	530	4,4
2	0.16–0.19	Pauvre	1829	15,3
3	0.19–0.22	Modéré	2440	20,5
4	0.22–0.25	Très bon	3312	27,8
5	0.25–0.31	Excellent	3689	30,9

Tableau 4. Zones de prospection des eaux souterraines du paysage du bassin de la Sandougou

Dans le bassin de la Sandougou, les zones de potentiel des eaux souterraines excellent et très bon, avec respectivement une surface de 3689 km² (30,9%) et de 3312 km² (27,8%), occupent plus de la moitié de la surface du bassin. Elles sont suivies par la zone de potentiel des eaux souterraines modéré avec une surface de 2440 km² (20,5%). Les zones de potentiel des eaux souterraines pauvre (1829 km² soit 15,3%) et très pauvre (530 km² soit 4,4%) viennent en dernière position (le 1% restant étant constitué de vide).

La carte de prospection des eaux souterraines indique que les zones en aval du bassin ont un potentiel d'eaux souterraines plus élevé que les zones en amont. Cela est dû à un terrain plat avec une très forte tendance à l'infiltration de l'eau et à la nature des sédiments de la lithologie. En plus du poids théorique relativement élevé, la géologie a des valeurs d'évaluation élevées dans presque toutes les sous-zones (Patra *et al.*, 2019). Le potentiel d'eaux souterraines plus élevé de la partie aval est principalement dû à la présence de la plaine d'inondation actuelle et les zones de plaine inondable plus anciennes autour du système fluvial où le terrain (plat, pente douce, non consolidée) qui est le plus approprié pour le stockage des eaux souterraines. Quant aux parties septentrionales du bassin, elles présentent un très faible potentiel en eaux souterraines, alors que la faible potentialité en eau le long des cours d'eau s'explique par le caractère dynamique de l'eau. Du fait que l'eau s'écoule, elle n'a donc pas le temps de stagner et de s'infiltrer pour alimenter la nappe, tout le contraire des parties qui en sont dépourvues.

**Fig. 11. Zones potentielles en eau dans le bassin de la Sandougou**

4.2. Validation de la carte des eaux souterraines

Les résultats obtenus de la prospection des eaux souterraines ont été comparés avec les données de la profondeur de la nappe sous la surface du sol, du débit exploitable et du niveau statique de la nappe des puits et forages exploités dans le bassin (Figure 12). Les cartes de la profondeur de la nappe, du débit exploitable et du niveau statique de la nappe des puits et forages sont réalisées en utilisant la méthode d'interpolation par krigeage.

Pour la carte du niveau statique, l'analyse montre que les niveaux statiques sont plus ou moins liés au réseau de drainage, et sont, suivant la classification, de nature faible et moyenne dans le bassin. En effet, les zones qui ont les forts niveaux statiques et les plus élevés (31 à 43 m) occupent 11,7 % du domaine sont situées dans des zones de drainage intense. Ces zones se situent au Nord-est au tour de Paos Koto, au Nord et au Nord-est à Goudiry et au Sud-ouest à Makacoulibatang. Les niveaux statiques faibles (18 à 30 m) qui constituent la classe dominante avec 80,3 % de la superficie du bassin, se trouvent essentiellement au Sud du bassin (Tambacounda, Ndogo Babacar et Sinthiou Malem).

L'analyse de la carte des débits exploitables montre que, suivant la classification, les débits sont de nature moyenne et forte dans le bassin. Les débits moyens (42 à 52 m³/s) sont dominants sur le bassin avec 47,9 % de la superficie. Ces débits sont localisés un peu partout dans le bassin, mais plus particulièrement au Sud-ouest, au Centre et au Nord-est. Les débits les plus faibles (26 à 35 m³/s) avec 8,8 % de la surface du bassin se situent au Sud autour de Makacoulibatang. Les très forts débits (53 à 62 m³/s) occupent 35,4 % et se localisent à l'extrême Nord-est du bassin et au tour de Tambacounda.

Quant à la carte des profondeurs de forages, elle montre, suivant la classification, des profondeurs de nature forte et très forte. En effet, près de 54,3 % de la zone (Centre, Sud et Sud-ouest du bassin) présente des profondeurs de forages moyennes avec des valeurs comprises entre 209 et 278 m. Cependant, les profondeurs les plus faibles (143 à 208 m) représentent environ 15,6 % des superficies du bassin et sont rencontrés un peu partout dans le bassin (en allant du Nord-est au Sud-ouest). Les plus fortes profondeurs (279 à 343 m) sont situées au Nord-est à Goudiry et au Nord et occupent 30,1 % du bassin.

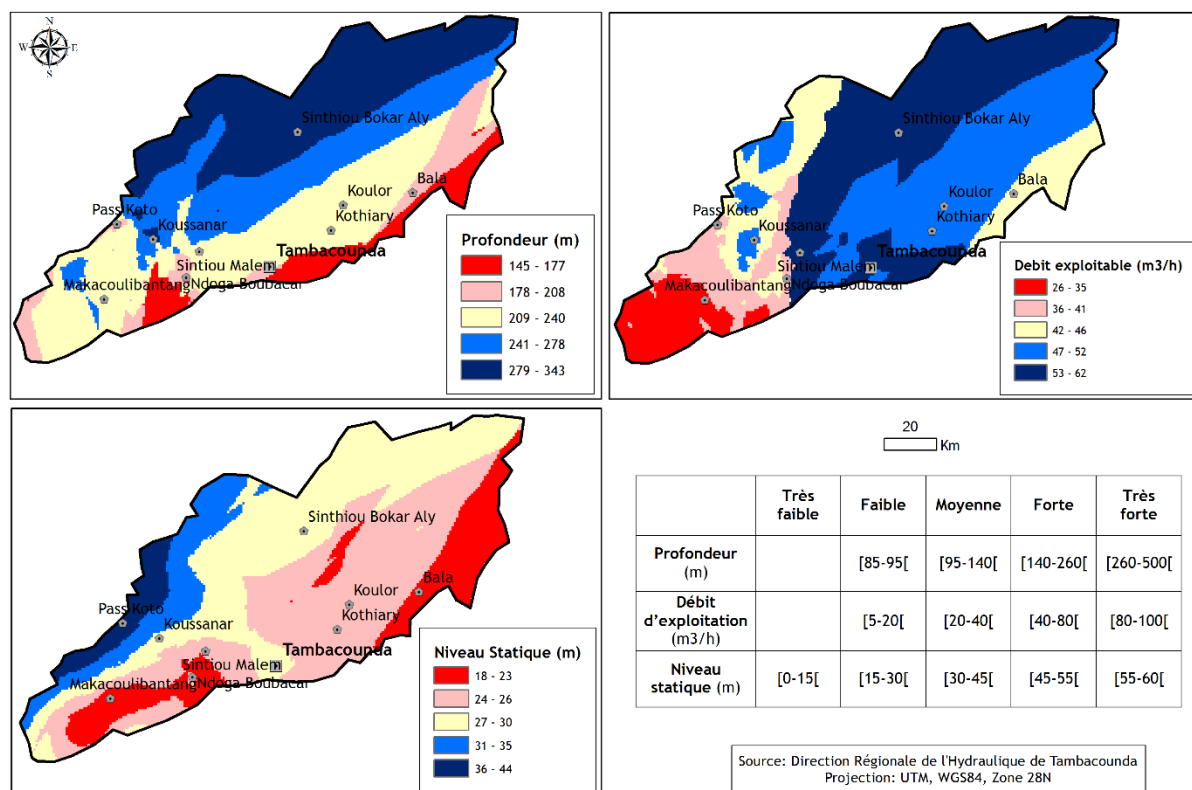


Fig. 12. Profondeur de la nappe, débit exploitable et niveau statique de la nappes des forages exploités dans le bassin de la Sandougou

Les résultats obtenus de la prospection des eaux souterraines ont aussi été comparés avec les données de disponibilité, d'accessibilité, d'exploitabilité et de potentialité des ressources en eaux souterraines dans le bassin de la Sandougou (Figure 13). La réalisation de la carte de disponibilité en eau souterraine a tenu compte des paramètres tels la densité de drainage et le niveau statique.

La carte d'accessibilité est le résultat de la synthèse des facteurs profondeur du forage et du niveau statique. L'exploitabilité des ressources en eau est guidée par le débit de l'eau que l'on peut tirer et le niveau piézométrique (niveau statique de la nappe dans notre cas). La réalisation de la carte de la potentialité en eau souterraine est faite avec le niveau statique et les cartes de disponibilité, d'accessibilité et d'exploitabilité. Dans l'ensemble, le bassin présente une bonne disponibilité en ressources en eau souterraine. Les classes de disponibilité bonne et excellente caractérisent les zones favorables à l'implantation des forages. Elles traduisent une bonne alimentation des nappes.

Le bassin de la Sandougou présente aussi dans l'ensemble une bonne accessibilité en eau souterraine avec les classes d'accessibilité bonne et excellente qui dominent sur le bassin. Cela signifie que dans ces zones, les profondeurs des forages sont moyennes et faibles, ce qui pourrait entraîner un grand pourcentage de succès au niveau des forages. Pour l'exploitabilité des ressources en eau, les classes excellente et bonne occupent les secteurs périphériques et se localisent au Nord-est (Bala, Koulor) et au Sud-ouest à Makacoulibatang et constituent des zones favorables à l'hydraulique urbaine et à l'agriculture motorisée.

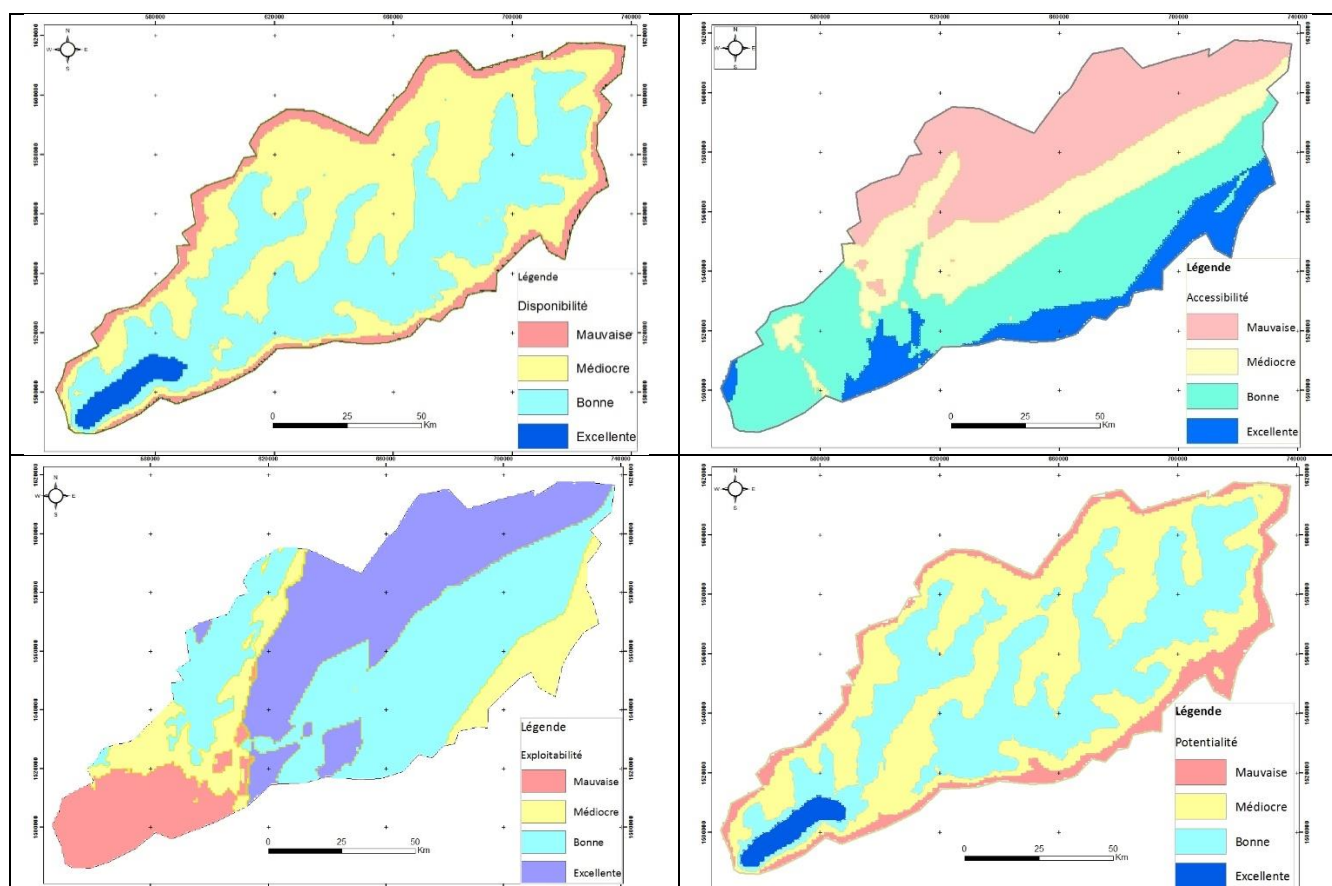


Fig. 13. Disponibilité, Accessibilité, Exploitableté et Potentialité des ressources en eaux souterraines dans le bassin de la Sandougou

Les zones à bon et excellent indice de potentialité sont circonscrites en différents chefs-lieux (Tambacounda, Makacoulibatang, Koulour, Bala...), au Sud-ouest et au Nord-est du bassin. Ces zones sont indiquées pour la recherche et l'implantation des sites de forage et prédisent des débits d'exploitation assez importants.

De façon générale, les parties aval et sud du paysage se trouvent dans des conditions d'eaux souterraines meilleures que celles en amont. Cela indique que les eaux souterraines pourraient être l'un des outils de gestion durable de l'eau dans la région, qui peut être utilisé pour différentes activités impliquant l'exploitation des ressources en eau. Pour la validation quantitative de la prospection des eaux souterraines, la superposition avec les cartes de la profondeur de la nappe, du débit exploitable et du niveau statique de la nappe des puits et forages, montre des potentialités en eau souterraine variables. Les zones à indice de potentialité très pauvre (530 km² soit 4,4% du domaine) et pauvre (1829 km² soit 15,3%) sont réparties de manière régulière sur l'ensemble du bassin. Ces zones se caractérisent par de fortes profondeurs d'ouvrages, de forts niveaux statiques et des débits faibles. Les zones à indice de potentialité d'eaux souterraines modéré (2440 km² soit 20,5%) qui sont bien réparties dans le bassin se caractérisent par des profondeurs d'ouvrages, des niveaux statiques et des débits moyens. Quant aux zones à excellent (3689 km² soit 30,9%) et très bon (3312 km² soit 27,8%) indice de potentialité d'eaux souterraines, elles sont plus importantes et sont circonscrites en différents chefs-lieux (Tambacounda, Makacoulibatang, Koulour, Bala...), au Sud-ouest et au Nord-est du bassin. Ces zones sont indiquées pour la recherche et l'implantation des sites de forage et prédisent des débits d'exploitation assez importants.

5. Conclusion

Les eaux souterraines sont devenues une ressource vitale face à la forte croissance de la demande en eau en milieu urbain et rural. Afin de soutenir le développement agricole et socio-économique à long terme dans le bassin de la Sandougou, la télédétection et le SIG ont été intégrés pour évaluer les zones potentielles d'eaux souterraines en utilisant les différentes cartes thématiques. Le poids des couches thématiques a été attribué en fonction de leurs caractéristiques pour la contribution des eaux souterraines. Celles-ci ont été superposées et intégrées pour le développement des zones potentielles d'eaux souterraines. Ainsi, la carte de prospection des eaux souterraines a indiqué que les zones en aval du bassin (particulièrement sur la façade Nord et Sud) ont un potentiel en eaux souterraines plus élevé que les zones en amont. Dans ces zones en aval, la pente très plate (très faible pourcentage de pente), la lithologie très poreuse (constituée de sédiments favorables à un taux d'infiltration élevé) et le sol argileux (capable de contenir une grande quantité d'eau) favorisent un potentiel en eaux de ruissellement important.

Du fait que la plupart des zones du bassin ont des conditions physiques optimales, le bassin a été évalué avec une superficie (7001 km² soit 58,7%) dotée d'un potentiel excellent à très bon en eaux souterraines alors que le potentiel en eaux souterraines très pauvre à pauvre représente 19,8% du bassin (2359 km²). Les cartes de prospection des eaux souterraines ont été validées avec les cartes de la profondeur de la nappe, du débit exploitable et du niveau statique de la nappe des puits et forages, ce qui indique une bonne capacité de prédiction de la méthode AHP. Par conséquent, les activités d'exploitation des eaux souterraines peuvent être réalisées dans ces zones de prospection d'eaux souterraines élevées au niveau du bassin pour augmenter la productivité des ouvrages hydrauliques.

Cette étude est très importante pour une utilisation durable des ressources en eau souterraine, notamment pour les activités de développement. Elle peut être utilisée pour augmenter la recharge des nappes en adoptant une gestion appropriée de même que pour l'évaluation et la planification des ressources en eau, car indiquant les zones potentielles de développement. Son importance réside principalement dans sa capacité à fournir une base solide pour la planification d'une gestion durable des eaux souterraines à l'échelle du bassin versant. Etant donné que la méthodologie adoptée dans cette étude est basée sur des conditions logiques et qu'elle est de nature générique, elle peut être appliquée dans d'autres parties du Sénégal ou à l'étranger avec des adaptations appropriées. Cette étude montre, en dehors de la conception de politiques et d'institutions adéquates pour l'utilisation et une exploitation judicieuses des ressources en eaux souterraines, la nécessité d'une approche collective impliquant les organisations gouvernementales, des ONG et des populations. A ce titre, l'intégration du GWPI, des politiques et des institutions est fondamentale et peut aider à éliminer les imperfections dans l'utilisation des eaux souterraines. Cela appelle nécessairement une prise en compte, dans le processus de planification, des aspects liés à la décentralisation et au pilotage participatif pour une gestion durable et efficace des ressources en eau.

6. Acknowledgment

Nous remercions vivement les différents auteurs qui ont participé aux différentes phases de la réalisation de l'article, depuis la mise en projet jusqu'à la conception des cartes et la rédaction de l'article.

7. References

- Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (2010). Situation économique et sociale de la région de Tambacounda. *Rapport final*, 137 p.
- Al-Adamat? R. A., Foster, I.D.; Baban, S.M. (2003). Groundwater vulnerability and riskmapping for the Basalticaquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remotesensing and DRASTIC. *AppliedGeography*, 23 (4), pp. 303–324.
- Althuwaynee, O.F.; Pradhan, B.; Park, H.J., Lee J.H (2014). A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslides susceptibility mapping. *Catena*, 114, pp. 21–36.
- Andrieu, J. & Mering, C. (2008). Cartographie par télédétection des changements de la couverture végétale sur la bande littorale ouest-africaine : exemple des rivières du sud du delta du Saloum (Sénégal) au rio Gêba (Guinée-Bissau), *Télédétection*, n° 2, vol. 8, pp. 93-118.
- Andualem, T. G.; Demeke, G. G. (2019). Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 24, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100610>
- Caloz, R. & Collet, C. (2001). *Précis de télédétection. Système d'information géographique et traitements numériques d'images*, Presse de l'Université de Québec/AUPELF-UREF, Sainte-Foy, vol. 3, 386 p.
- Chandio, I.A.; Matori, A.N.B.; WanYusof, K. B.; Talpur, M.A.H.; Balogun, A.L.; Lawal, D.U. (2013). GIS-based analytic hierarchy process as a multi criteria decision analysis instrument: arcview. *Arab. J. Geosci.* 6 (8), pp. 3059–3066.
- Chowdhury, A.; Jha, M.K.; Chowdary, V.M. (2010). Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur District, West Bengal using RS, GIS, and MCDM techniques. *Environ. Earth Sci.* 59 (6), pp. 1209–1222.
- CONGAD, (2009). *Livre bleu « L'eau, la vie, le développement humain » Rapport pays : Sénégal*, Document de consultation fourni par SENAGROSOL CONSULT, 72 p.
- Doll, P. and Fiedler, K. (2008). Global-scale modelling of groundwater recharge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, pp. 863–885.
- Edmunds, W. M. (2008). Groundwater in Africa—palaeowater, climate change and modern recharge. *Applied Groundwater Studies in Africa (IAH Selected Papers on Hydrogeology vol 13)* ed S M A Adelana and A M MacDonald (Leiden: CRC Press/Balkema), pp. 305–36
- Faye, C.; Gomis, E.N.; Dieye, S. (2019). Current situation and sustainable development of water resources in Senegal. *Ecological Engineering and Environment Protection*, 1, pp. 5-16.
- Faye, I. (2009). Monographie du bassin versant du Sandougou. Mémoire de Maitrise, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 123 p.

- Ganapuram,S.;VijayaKumar, G.T.;Murali Krishna, I.V.;Kahya, E.; Demirel, M.C.(2009).Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Adv. Eng. Softw.* 40, pp. 506–518.
- Godebo, T.R. & (2005). Application of Remote Sensing and GIS for Geological Investigation and Groundwater Potential Zone Identification, Southeastern Ethiopian Plateau, Bale Mountains and the Surrounding Areas. Addis A Baba University
- Hajkowicz, S. &Higgins, A. (2008). A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *Eur. J. Oper. Res.*, 184 (1), pp. 255–265.
- Ibrahim-Bathis, K. & Ahmed, S.A. (2016). Geospatial technology for delineating groundwater potential zones in Doddahalla watershed of Chitradurga district. India. *The Egyptian J. Remote Sens. Space Sci.*, 19 (2), pp. 223–234.
- Jaiswal, R.K.; Mukherjee, S.; Krishnamurthy, J.; Saxen, R. (2003). Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development—an approach. *Int. J. Remote Sens.* 24 (5), pp. 993–1008.
- Jenifer, M.A. &Jha, M.K. (2017). Comparison of Analytic Hierarchy process, Catastrophe and Entropy techniques for evaluating groundwater prospect of hard-rock aquifer systems. *J. Hydrol. (Amst)*, 548, pp. 605–624.
- Jha, M.K.; Chowdary, V.M.; Chowdhury, A. (2010). Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system, and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeol. J.* 18 (7), pp. 1713–1728.
- Jha, M.K.; Chowdary, V.M.; Kulkarni, Y., Mal, B.C. (2014). Rainwater harvesting planning using geospatial techniques and multi criteria decision analysis. *Resour. Conserv. Recycl.*, 83, pp. 96–111.
- MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. É. Ó. and Taylor, R. G. (2012). Quantitative maps of groundwater resources in Africa, *Environmental Research Letters*, 7(2), 7 024009, pp. 1-7.
- Machiwal, D.;Jha, M.K.; Mal, B.C. (2011). Assessment of groundwater potential in a semi-arid region of India using remote sensing, GIS and MCDM techniques. *Water Resour. Manag.*, 25 (5), pp. 1359–1386.
- Malczewski, J. (1999). GIS And Multi criteria Decision Analysis. John Wiley and Sons.
- Ministère de l’Hydraulique et de l’Assainissement du Sénégal (MHAS) (2015).*Parvenir aux ODD pour l’eau, l’assainissement et l’hygiène Aperçu de la situation au Sénégal: eau, assainissement et hygiène*, 8 p.
- Ministère de l’Hydraulique/DGPRE (2007). *Plan d’Action de Gestion intégrée des ressources en eau du Sénégal*.Global Water Partnership West Africa, 61 p.
- Murthy, K.S.R. & Mamo, A.G. (2009). Multi-criteria decision evaluation in groundwater zones identification in Moyale-Teltelesubbasin, South Ethiopia. *Int. J. Remote Sens.*, 30 (11), pp. 2729–2740.
- Naghibi; S.A., Moghaddam, D.D.; Kalantar, B.; Pradhan, B.; Kisi, O. (2017). A comparative assessment of GIS-based data mining models and a novel ensemble model in groundwater well potential mapping. *J. Hydrol. (Amst)*, 548, pp. 471–483.
- Naghibi, S.A.;Pourghasemi, H.R.; Dixon, B. (2016).GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environ. Monit. Assess.*, 188 (1), pp. 44.

- Patra, S.; Mishra, P.; Mahapatra, S. C.(2019).Delineation of groundwater potential zone for sustainable development: A case study from Ganga Alluvial Plain covering Hooghly district of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process. *Journal of Cleaner Production*, 172 (2018), pp. 2485-2502.
- Pourtaghi, Z.S.; Pourghasemi, H.R. (2014). GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province Iran. *Hydrogeol. J.* <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1089-6>.
- Rahmati, O.; Samani, A.N.; Mahdavi, M.; Pourghasemi, H.R.; Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arab. J. Geosci.*, 8 (9), pp. 7059–7071.
- Rajasekhar, M.; SudarsanaRaju, G.; Sreenivasulu, Y.; SiddiRaju, R. (2019). Delineation of groundwater potential zones in semi-arid region of Jilledubanderu river basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India using fuzzy logic, AHP and integrated fuzzy-AHP approaches, *HydroResearch*. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.11.006>.
- Rajaveni, S.P.; Brindha, K.; Elango, L. (2017).Geological and geomorphological controls on groundwater occurrence in a hard rock region. *Appl. Water Sci.*, 7 (3), pp. 1377–1389.
- Saha, D.; Dhar, Y.R.; Vittala, S.S. (2010).Delineation of groundwater development potential zones in parts of marginal Ganga Alluvial Plain in South Bihar, *Eastern India. Environ. Monit. Assess.* 165, 179–191.
- Sahoo, S.; Jha, M.K.; Kumar, N.; Chowdary, V.M. (2015). Evaluation of GIS-based multi criteria decision analysis and probabilistic modeling for exploring groundwater prospects. *Environ. Earth Sci.*, 74 (3), pp. 2223–2246.
- Saraf, A.K. & Choudhury, P.R. (1998). Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *Int. J. Remote Sens.* 19 (10), pp. 1825–1841.
- Singh, L.K.; Jha, M.K.; Chowdary, V.M. (2017). Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply. *J. Clean. Prod.*, 142, pp. 1436–1456.
- Solly, B.; Dièye, E.H.B.; Mballo, I.; Sy, O.; Sané, T.; Thior, M. (2020). Dynamique spatio-temporelle des paysages forestiers dans le Sud du Sénégal : cas du département de Vélingara. *Physio-Géo*, vol. 15, p. 41-67, <https://doi.org/10.4000/physio-geo.10634>
- Sow, A. A. (2007). *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé*, Thèse doctorat d'Etat Es lettres et sciences humaines, UCAD, FLSH, Département de Géographie, 1232 p.
- Yeh, H.F.; Cheng, Y.S.; Lin, H.I.; Lee, C.H. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River. Taiwan. *Sust. Environ. Res.*, 26 (1), pp. 33–43.
- Zade, S. G. P. (2011). *Caractérisation hydrologique des sous-bassins de la Sandougou en vue de la définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés*. Mémoire de master spécialisé en GIRE, 2iE, 73 p.

7. Key terms and definitions

Potentiel en eaux souterraines : sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol.accessibles et exploitables par l'homme en cas de besoin.

Couche thématique : illustre la répartition spatiale des données relatives à un ou plusieurs thèmes particuliers des secteurs géographiques choisis, de nature qualitative (p. ex. , principaux types de fermes) ou quantitative (p. ex. , variation en pourcentage de la population).

MCDA: qui signifie la technique d'analyse de décision multicritère est une pproche intégrée des techniques de télédétection, de système d'information géographique et d'analyse décisionnelle multicritères nutilisée en intégrant différentes couches thématiques.

Données géospaciales : comprennent l'ensemble des données géométriques (position et forme des objets), des attributs (caractéristiques des objets) et des métadonnées (information sur la nature des données).