

Hierarchisation Multicritère, Validation Méthodologique Et Dynamique Spatiale De L'urbanisation Durable A Antsirabe

RAVELONIRINA Harimbola Sahondra¹, TOVONIRINA Mamiharizo Jackie¹, RAKOTOSON Andriatiana Tolontsoa¹, RAJAONARISON Eddie Franck¹

¹Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université Antananarivo

Auteur Correspondant : RAVELONIRINA Harimbola Sahondra



Résumé: Cette étude propose une analyse multicritère et une priorisation spatiale du potentiel minier Cette étude analyse l'aptitude à l'urbanisation durable d'Antsirabe à partir d'une approche intégrée SIG–AHP combinant hiérarchisation multicritère, validation méthodologique et lecture spatiale des pressions territoriales à l'horizon 2035. La pondération AHP montre une domination nette de la protection de l'aquifère, avec 61,8 % du poids décisionnel, devant la réduction de l'érosion (19,8 %), l'acceptabilité sociale (13,0 %) et l'accessibilité logistique (5,4 %). La cohérence de la matrice de comparaison est jugée satisfaisante, avec un indice CI de 0,048 et un ratio CR de 0,072, inférieur au seuil de 0,10. Les projections mettent en évidence une menace de 50 à 70 ha sur les zones de recharge et une perte potentielle de 150 à 200 ha de terres agricoles et de recharge dans le scénario tendanciel. Le reclassement SIG confirme la prépondérance du facteur hydrogéologique : le score pondéré de l'aquifère passe de 0,618 en situation défavorable à 3,090 en situation favorable. Ces résultats soulignent la nécessité d'orienter l'expansion urbaine d'Antsirabe vers les secteurs les moins vulnérables afin de préserver durablement les fonctions hydrologiques, agricoles et territoriales.

Mots-clés : AHP-SIG (61,8 %) ; Aquifère (3,090) ; Cohérence (CR = 0,072) ; Recharge (50–70 ha) ; Urbanisation 2035 (150–200 ha).

Abstract: This study assesses the suitability of Antsirabe for sustainable urban development using an integrated GIS–AHP approach that combines multicriteria prioritization, methodological validation, and spatial analysis of territorial pressures projected to 2035. The AHP weighting reveals a clear predominance of aquifer protection, accounting for 61.8% of the total decision weight, followed by erosion mitigation (19.8%), social acceptability (13.0%), and logistical accessibility (5.4%). The pairwise comparison matrix shows satisfactory consistency, with a Consistency Index (CI) of 0.048 and a Consistency Ratio (CR) of 0.072, below the 0.10 threshold. The projections indicate a potential threat of 50–70 ha to groundwater recharge areas and a possible loss of 150–200 ha of agricultural land and recharge zones under the business-as-usual scenario. GIS reclassification further confirms the predominance of the hydrogeological factor: the weighted aquifer score increases from 0.618 under unfavorable conditions to 3.090 under favorable conditions. These findings highlight the need to direct Antsirabe's urban expansion toward the least vulnerable areas in order to sustainably preserve hydrological, agricultural, and territorial functions.

Keywords: GIS–AHP (61.8%); Aquifer (3.090); Consistency (CR = 0.072); Recharge (50–70 ha); Urbanization 2035 (150–200 ha).

1. INTRODUCTION

L'urbanisation rapide accroît les pressions sur les ressources naturelles, les terres agricoles et les systèmes hydrologiques, tout en renforçant l'exposition aux risques d'inondation dans les villes en expansion [1]. À Madagascar, le RGPH-3 met en évidence l'importance démographique et territoriale des pôles urbains régionaux, dont Antsirabe constitue un centre majeur de Vakinankaratra [2]. Dans ce contexte, la planification urbaine nécessite des outils capables d'intégrer simultanément les contraintes physiques, environnementales et socioéconomiques. Le couplage des systèmes d'information géographique et de

l'analyse multicritère constitue à cet égard une approche reconnue pour l'aide à la décision spatiale [3]. La méthode AHP permet notamment de hiérarchiser les critères par comparaison par paires et d'en vérifier la cohérence [4]. Parallèlement, les approches inspirées de la « ville-éponge » privilégient l'infiltration, la rétention des eaux pluviales et la réduction du ruissellement urbain [5]. Cette étude mobilise ainsi une approche SIG–AHP afin d'orienter durablement l'urbanisation d'Antsirabe à l'horizon 2035.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Matériels utilisés

L'analyse spatiale repose sur un ensemble de données raster et vectorielles intégrées dans un environnement SIG. Le relief a été caractérisé à partir d'un modèle numérique de terrain SRTM d'environ 30 m de résolution spatiale, complété par les produits ALOS PALSAR à résolution plus fine lorsque disponibles, afin de dériver les pentes et d'appuyer l'analyse hydrologique [6], [7]. Les changements d'occupation et d'utilisation des sols ont été étudiés à partir d'images Sentinel-2, dont les bandes principales atteignent 10 m de résolution, ainsi que d'images Landsat à 30 m, permettant une analyse diachronique de l'expansion urbaine [8], [9]. Ces données ont été complétées par les couches vectorielles relatives aux limites administratives, au réseau routier, à l'hydrographie, aux zones de recharge et aux contraintes environnementales. La modélisation hydraulique des zones inondables a été réalisée avec HEC-RAS, outil permettant les simulations hydrauliques unidimensionnelles et bidimensionnelles [10]. L'ensemble des informations a ensuite été harmonisé, reclassé et combiné selon l'approche SIG–AHP afin d'établir les niveaux d'aptitude à l'urbanisation durable.

2.2 Méthodes adoptées

La démarche méthodologique repose sur l'intégration des données raster et vectorielles dans un environnement SIG. Les variables physiques et territoriales ont été harmonisées, puis reclassées sur une échelle commune d'aptitude de 1 à 5, tandis que les zones soumises à des contraintes absolues, notamment les secteurs hydrologiquement sensibles, les fortes pentes et les zones d'aléa élevé, ont reçu une valeur d'exclusion égale à 0. La dynamique d'extension urbaine à l'horizon 2035 a été appréhendée par le modèle CA–Markov. Les chaînes de Markov permettent d'estimer les probabilités de transition entre classes d'occupation du sol, tandis que les automates cellulaires assurent leur allocation spatiale en fonction du voisinage et des conditions de transition [11]. Cette approche est couramment utilisée pour simuler l'évolution spatiale de l'urbanisation. L'aptitude à l'urbanisation a ensuite été évaluée par le couplage SIG–AHP. Les critères ont été comparés par paires afin d'établir leurs poids relatifs, puis leur cohérence a été contrôlée avant leur intégration spatiale [12]. Les couches standardisées ont été combinées selon une logique de combinaison linéaire pondérée, permettant de produire un indice synthétique d'aptitude territoriale [13]. L'aléa d'inondation a été analysé par modélisation hydraulique 2D sous HEC-RAS, fondée sur le modèle de terrain, le maillage de calcul et la propagation des écoulements afin de délimiter les zones exposées et d'estimer les hauteurs d'eau [14]. Enfin, les résultats ont été interprétés selon le principe de la ville-éponge, privilégiant les infrastructures vertes et bleues, les surfaces perméables, l'infiltration et la rétention des eaux pluviales [15].

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Hiérarchisation spatiale et décisionnelle des facteurs d'urbanisation durable à Antsirabe

La figure suivante met en relation le contexte territorial de la région Vakinankaratra et la hiérarchisation des critères retenus dans l'analyse multicritère par la méthode AHP. La carte localise Antsirabe I et Antsirabe II au sein du système régional de districts, de routes et de réseaux hydrographiques, tandis que le graphique traduit quantitativement l'importance relative des facteurs guidant l'aptitude à l'urbanisation durable.

Hierarchisation des facteurs d'urbanisation durable à Antsirabe

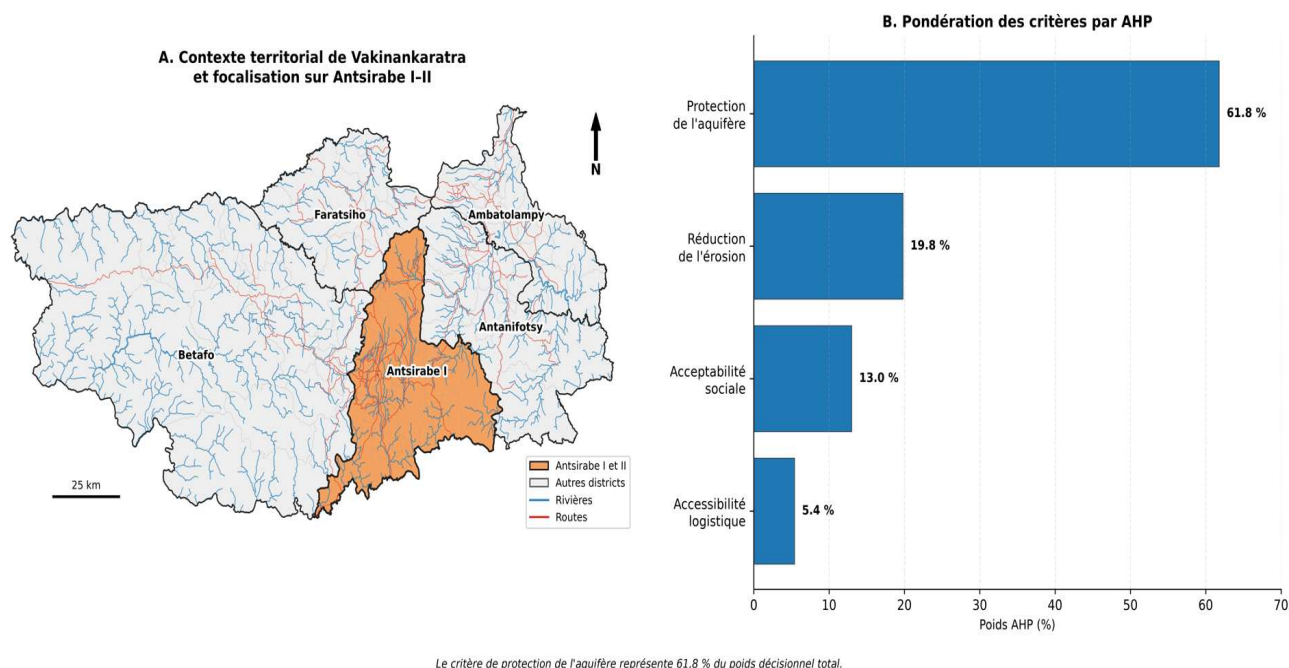


Figure 1: Hierarchisation spatiale et décisionnelle des facteurs d'urbanisation durable à Antsirabe

Interprétation

Les résultats montrent une nette prédominance de la protection de l'aquifère, qui concentre 61,8 % du poids décisionnel total. Ce critère représente à lui seul davantage que l'ensemble des trois autres facteurs réunis, dont le poids cumulé atteint 38,2 %, traduisant le caractère prioritaire de la préservation des ressources en eau dans l'orientation de l'expansion urbaine. La réduction de l'érosion constitue le deuxième déterminant avec 19,8 %, confirmant l'importance des contraintes topographiques et de la stabilité des sols. L'acceptabilité sociale représente 13,0 %, alors que l'accessibilité logistique ne contribue qu'à hauteur de 5,4 %. La protection de l'aquifère pèse ainsi environ trois fois plus que la réduction de l'érosion et plus de onze fois davantage que l'accessibilité. Sur le plan spatial, Antsirabe I et Antsirabe II apparaissent au cœur d'un territoire traversé par des réseaux routiers et hydrographiques relativement structurants. Cette configuration souligne la nécessité d'articuler le développement urbain avec la protection des fonctions hydrologiques du territoire. La forte pondération accordée à l'aquifère indique ainsi que la proximité des infrastructures ne doit pas constituer, à elle seule, un facteur suffisant pour autoriser l'urbanisation. L'expansion future doit prioritairement être orientée vers les secteurs compatibles avec la protection des ressources en eau et la limitation de l'érosion, ce qui confirme une logique d'aménagement fondée d'abord sur les contraintes environnementales, puis sur les considérations sociales et d'accessibilité.

3.2 Validation de la cohérence de la matrice AHP appliquée à l'aptitude à l'urbanisation durable

La figure ci-dessous présente la matrice de comparaison par paires utilisée pour hiérarchiser les critères de l'analyse AHP ainsi que les indicateurs permettant d'en vérifier la cohérence. Elle met en évidence l'intensité des préférences accordées respectivement à la protection de l'aquifère, à la réduction de l'érosion, à l'acceptabilité sociale et à l'accessibilité, tout en contrôlant la fiabilité globale des jugements.

Validation méthodologique de l'analyse hiérarchique AHP

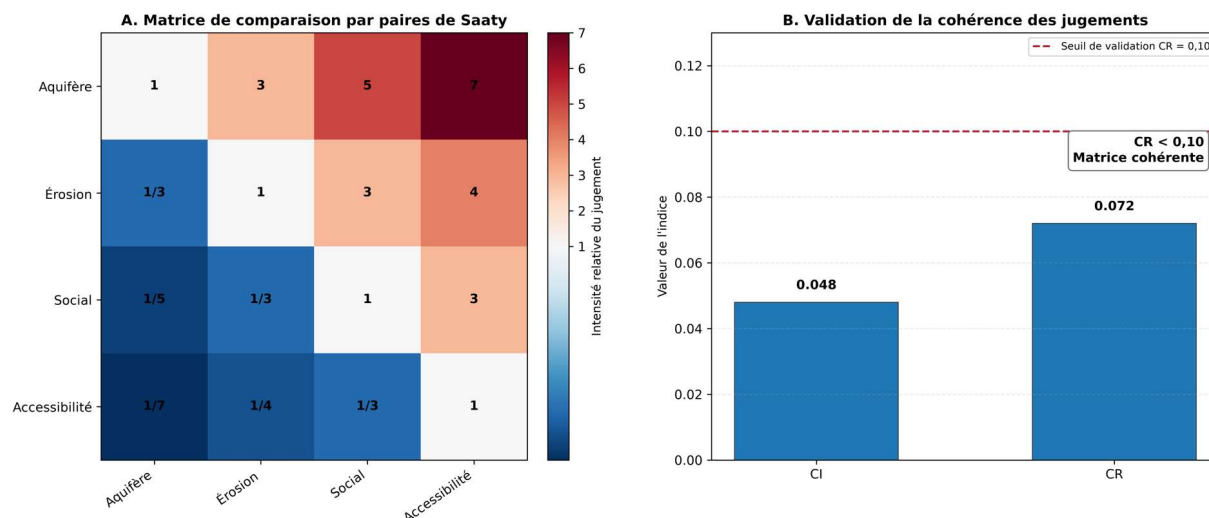


Figure 2: Validation de la cohérence de la matrice AHP appliquée à l'aptitude à l'urbanisation durable

Interprétation

La matrice traduit une priorité nette accordée à la protection de l'aquifère. Ce critère est jugé trois fois plus important que l'érosion, cinq fois plus important que le facteur social et sept fois plus important que l'accessibilité. L'érosion conserve une position intermédiaire, avec une importance trois fois supérieure au critère social et quatre fois supérieure à l'accessibilité. Le facteur social est lui-même évalué trois fois plus important que l'accessibilité. Cette organisation confirme une hiérarchie décisionnelle dominée par les contraintes environnementales et hydrologiques. La cohérence des comparaisons est confirmée par un indice de cohérence de $CI = 0,048$ et un ratio de cohérence de $CR = 0,072$. Ce dernier demeure inférieur au seuil conventionnel de 0,10, ce qui indique que les jugements comparatifs présentent un niveau de cohérence acceptable. La matrice peut donc être considérée comme suffisamment stable pour établir les pondérations utilisées dans la construction de la carte d'aptitude à l'urbanisation durable. Cette validation renforce la robustesse méthodologique de l'analyse multicritère et justifie l'intégration des poids AHP dans la procédure de décision spatiale.

3.3 Pression territoriale et vulnérabilité des espaces stratégiques à l'horizon 2035

La figure ci-dessous met en relation le contexte hydrographique et infrastructurel de Vakinankaratra avec les principaux impacts territoriaux projetés à l'horizon 2035. La carte localise Antsirabe I et Antsirabe II au sein du réseau régional de districts, de routes et de rivières, tandis que le graphique quantifie les surfaces potentiellement affectées par la progression de l'urbanisation.

Pression territoriale et enjeux du scénario 2035

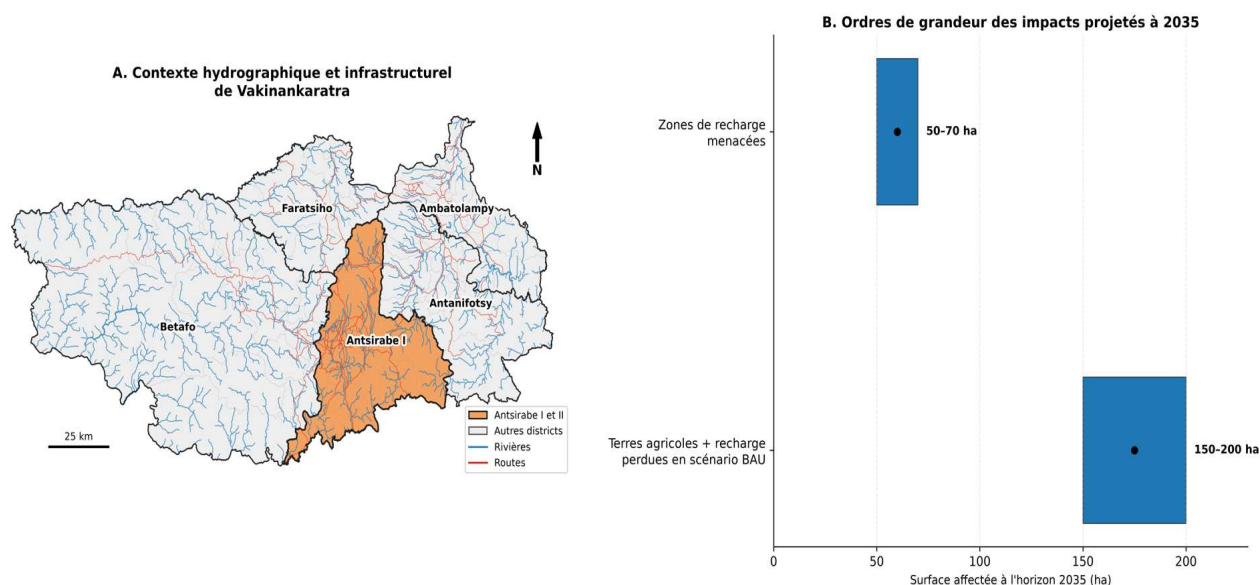


Figure 3: Pression territoriale et vulnérabilité des espaces stratégiques à l'horizon 2035

Interprétation

Les projections montrent que les zones de recharge menacées pourraient représenter environ 50 à 70 ha d'ici 2035. Cette emprise, bien que plus limitée en superficie, concerne des secteurs stratégiques pour le fonctionnement hydrologique et l'alimentation de l'aquifère. Leur artificialisation progressive pourrait donc produire des effets disproportionnés sur l'infiltration, la régulation des écoulements et la disponibilité future de la ressource en eau. Le scénario tendanciel de type Business-as-Usual apparaît plus préoccupant à l'échelle territoriale, avec une perte estimée entre 150 et 200 ha de terres agricoles et de zones de recharge. Cette valeur est environ trois fois supérieure à l'emprise des seules zones de recharge directement menacées, ce qui traduit une extension du conflit d'usage au-delà de la seule ressource hydrique. La dynamique d'urbanisation risque ainsi d'affecter simultanément les fonctions agricoles, hydrologiques et écologiques des espaces périphériques d'Antsirabe. La concentration des infrastructures et des réseaux hydrographiques autour d'Antsirabe I et II renforce enfin la sensibilité de ce secteur. Ces résultats montrent que le scénario 2035 ne constitue pas seulement un enjeu d'expansion urbaine, mais également un problème de préservation des espaces fonctionnels. Ils justifient ainsi la mise en place d'un zonage d'aptitude capable de limiter l'urbanisation dans les secteurs de recharge et de réorienter la croissance vers les espaces présentant les contraintes environnementales les plus faibles.

3.4 Influence du reclassement spatial des critères sur l'aptitude à l'urbanisation durable

La figure ci-dessous met en relation la localisation d'Antsirabe I et Antsirabe II dans la région Vakinankaratra avec l'effet du reclassement SIG sur les scores partiels d'aptitude. Elle permet d'évaluer la contribution respective de la protection de l'aquifère, des pentes et de la proximité des réseaux selon que les conditions territoriales sont défavorables ou favorables.

Influence du reclassement SIG sur l'aptitude à l'urbanisation

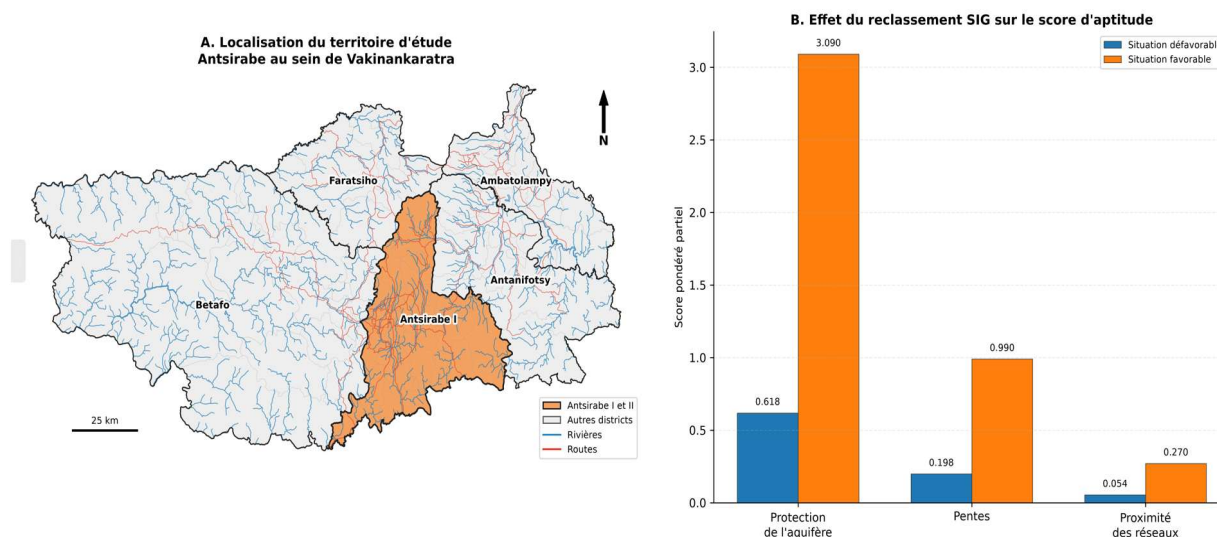


Figure 4 : Influence du reclassement spatial des critères sur l'aptitude à l'urbanisation durable

Interprétation

Les résultats montrent que la protection de l'aquifère exerce l'influence la plus forte sur le score final. Dans une situation défavorable, son score pondéré atteint 0,618, contre 3,090 dans une situation favorable, soit une multiplication par cinq. Cette amplitude traduit le rôle déterminant de la préservation des zones de recharge dans la définition des secteurs pouvant accueillir l'urbanisation. Le critère de pente présente également un contraste net, avec un score passant de 0,198 en situation défavorable à 0,990 en situation favorable. Les faibles pentes renforcent ainsi sensiblement l'aptitude à l'urbanisation, tandis que les pentes fortes constituent une contrainte importante en raison des risques d'érosion, d'instabilité et de ruissellement accru. La proximité des réseaux contribue plus modestement au score global. Sa valeur évolue de 0,054 à 0,270 entre les situations défavorable et favorable. Cette contribution plus faible confirme que l'accessibilité aux infrastructures, bien qu'importante pour l'organisation urbaine, reste secondaire par rapport aux contraintes hydrologiques et topographiques. L'ensemble des écarts observés montre que le reclassement SIG privilégie clairement les secteurs combinant faible sensibilité hydrologique, topographie favorable et bonne accessibilité. La structure des scores confirme ainsi que l'aptitude à l'urbanisation d'Antsirabe repose avant tout sur la protection de l'aquifère, ce qui justifie une orientation du développement vers les espaces les moins vulnérables sur le plan environnemental.

4. DISCUSSION

Les résultats montrent que l'urbanisation durable d'Antsirabe dépend avant tout de la prise en compte des contraintes hydrologiques. Le poids attribué à la protection de l'aquifère, soit 61,8 %, traduit son rôle central dans l'orientation spatiale du développement urbain, loin devant l'érosion (19,8 %), l'acceptabilité sociale (13,0 %) et l'accessibilité (5,4 %). La cohérence satisfaisante de la matrice AHP, avec un CR de 0,072, renforce la crédibilité de cette hiérarchisation. Les projections à l'horizon 2035 soulignent également l'urgence d'une planification maîtrisée, avec 50 à 70 ha de zones de recharge menacées et jusqu'à 150 à 200 ha de terres agricoles et hydrologiquement sensibles susceptibles d'être affectées dans un scénario tendanciel. Le reclassement SIG confirme cette priorité environnementale, puisque le score lié à l'aquifère varie de 0,618 à 3,090 selon le niveau de compatibilité spatiale. Ces résultats suggèrent que l'expansion urbaine doit être orientée vers les secteurs à faible vulnérabilité hydrologique et topographique, tandis que les zones de recharge, les secteurs inondables et les espaces sensibles doivent être strictement protégés.

5. CONCLUSION

Cette étude montre que l'urbanisation durable d'Antsirabe doit être guidée prioritairement par la protection des fonctions hydrologiques et la réduction des contraintes physiques. La méthode SIG-AHP a permis de hiérarchiser les facteurs d'aptitude, avec une prédominance de la protection de l'aquifère à 61,8 %, tout en confirmant la cohérence de la décision par un CR de 0,072. Les projections à l'horizon 2035 mettent en évidence des pertes potentielles importantes, notamment 50 à 70 ha de zones de recharge et jusqu'à 150 à 200 ha de terres agricoles et sensibles. Ces résultats confirment la nécessité de limiter l'urbanisation dans les secteurs vulnérables et de privilégier les zones présentant de meilleures conditions hydrologiques, topographiques et infrastructurelles. L'approche proposée constitue ainsi un outil d'aide à la décision pour orienter une croissance urbaine plus résiliente et compatible avec la préservation des ressources naturelles.

Référence

- [1] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Chapter 6: Cities, Settlements and Key Infrastructure. Cambridge University Press, 2022.
- [2] INSTAT. Atlas démographique du Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH-3) de 2018. Institut National de la Statistique, Madagascar, 2023.
- [3] Malczewski, J. "GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature." *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726, 2006.
- [4] Saaty, T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York, 1980.
- [5] Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. "Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and 'sponge cities' strategy." *Environmental Science & Policy*, 80, 132–143, 2018.
- [6] U.S. Geological Survey (USGS). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Earth Resources Observation and Science Center, résolution spatiale d'environ 30 m.
- [7] Alaska Satellite Facility (ASF). ALOS PALSAR Products – Radiometrically Terrain Corrected Products. ASF DAAC, University of Alaska Fairbanks.
- [8] European Space Agency (ESA). Sentinel-2: Facts and Figures. Copernicus Earth Observation Programme, résolutions spatiales de 10, 20 et 60 m.
- [9] U.S. Geological Survey (USGS). Landsat Collection 2 Surface Reflectance. Earth Resources Observation and Science Center, résolution spatiale de 30 m.
- [10] U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS: River Analysis System. Logiciel de modélisation hydraulique 1D et 2D.
- [11] Guan, D., Li, H., Inohae, T., Su, W., Nagaie, T., & Hokao, K. (2011). Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling*, 222, 3761–3772. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.09.009>.
- [12] Elghazouly, H. G., Elnaggar, A. M., Ayaad, S. M., & Nassar, E. T. (2024). Framework for integrating multi-criteria decision analysis and geographic information system (MCDA-GIS) for improving slums interventions policies in Cairo, Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 86, 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.11.059>.
- [13] Jiang, H., & Eastman, J. R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173–184. <https://doi.org/10.1080/136588100240903>.
- [14] U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. (2024). HEC-RAS 2D User's Manual, Version 6.6. Hydrologic Engineering Center, Davis, California.

-
- [15] Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W., Wang, X. C., Ren, N., Li, G., Ding, J., & Liang, H. (2019). Implementation of a specific urban water management – Sponge City. *Science of the Total Environment*, 652, 147–162.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168>.