

Étude de la dynamique des eaux souterraines et de l'occupation des sols dans le département de Sinématiali (région du Poro, nord de la Côte d'Ivoire)

De Lasme Omer Zephir

Toure Lamine

Kouakou Koffi Abdelaziz

Coulibaly Issouf

Département Géosciences, Unité de Formation et de Recherche (UFR)
Sciences Biologiques, Université Peleforo Gon Coulibaly (UPGC),
Korhogo, Côte d'Ivoire

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n15p264](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n15p264)

Submitted: 30 January 2026

Accepted: 10 May 2026

Published: 31 May 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

De Lasme, O.Z., Toure, L., Kouakou, K.A., & Coulibaly, I. (2026). *Étude de la dynamique des eaux souterraines et de l'occupation des sols dans le département de Sinématiali (région du Poro, nord de la Côte d'Ivoire)*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (15), 264.

<https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n15p264>

Résumé

Les migrations des populations sont fortement dépendantes de la quantité et de la qualité de l'eau disponible et facilement exploitable pour couvrir les besoins hydriques. Cette étude vise à identifier la relation entre la dynamique des eaux souterraines et l'occupation des sols, afin de mieux maîtriser l'urbanisation. La réalisation de cette étude s'est appuyée sur l'utilisation de bases de données de fiches techniques de forage et d'images satellitaires Landsat 4 (images TM acquises le 13/11/1988, comportant sept bandes spectrales, soit six bandes multispectrales et une bande infrarouge thermique) et Landsat 8 (images OLI/TIRS acquises le 11/01/2022 qui comportent onze bandes spectrales, soit une bande panchromatique, huit bandes multispectrales et deux bandes infrarouges). La classification des types d'aquifères a été effectuée sur la base de la profondeur de la nappe captée et de la structure de son environnement encaissant. Le sens d'écoulement fut identifié à partir de la carte piézométrique, établie à partir des premières arrivées d'eau dans les horizons fissurés. Les aquifères exploités dans la zone de Sinématiali peuvent être classés en altérites (57 %), horizons fissurés (30

%) et fractures profondes hydrauliquement actives (13 %). L'infiltration des eaux vers les aquifères superficiels s'effectue en empruntant les fractures de direction préférentielle N45. Dans les horizons fissurés et les fractures profondes, les eaux souterraines se dirigent vers le lit des eaux de surface. C'est ainsi que les forages implantés sur le chemin de circulation souterraine ont assuré de gros débits d'eau potable pour l'alimentation des populations établies en surface. De 1988 à 2022, les proportions d'habitats et de sols nus sont respectivement passées de 9 % à 30 % du territoire pour les zones urbaines et de 2 % à 8 % pour les sols nus témoignant de la réalité urbaine a augmenté significativement dans les zones où l'eau souterraine est disponible et tend à s'accumuler dans les horizons fissurés représentés en 2D et 3D. Les résultats de cette étude sont susceptibles de mieux guider l'urbanisation galopante et surtout d'optimiser la gestion des ressources en eau disponibles et exploitables.

Mots-clés: Côte d'Ivoire, Sinématiali, Eaux souterraines, Urbanisation, Carte piézométrique, Occupation du sol

Study of Groundwater Dynamics and Land Use in the Department of Sinematiali (Poro region, North of Cote d'Ivoire)

De Lasme Omer Zephir

Toure Lamine

Kouakou Koffi Abdelaziz

Coulibaly Issouf

Département Géosciences, Unité de Formation et de Recherche (UFR)
Sciences Biologiques, Université Peleforo Gon Coulibaly (UPGC),
Korhogo, Côte d'Ivoire

Abstract

Population migration is highly dependent on the quantity and quality of water available and easily exploitable to meet water needs. This study aims to identify the relationship between groundwater dynamics and land use, with the aim of gaining better control over urbanization. This study was conducted using databases of drilling logs and Landsat 4 satellite imagery (TM images acquired on November 13, 1988, containing seven spectral bands, six multispectral bands, and one thermal infrared band) and Landsat 8 (OLI/TIRS images acquired on January 11, 2022, containing eleven spectral bands, one panchromatic band, eight multispectral bands, and two infrared bands). The

classification of aquifer types was based on the depth of the first water table and the structure of its surrounding environment. The direction of flow was identified by drawing up a piezometric map showing the first water inflows into the fissured horizons. The aquifers exploited in the Sinématiali area can be classified as weathered materials (57%), fractured horizons (30%), and deep hydraulically active fractures (13%). Water infiltration into the shallow aquifers occurs through fractures with a preferential direction of N45. Into fissured layers and deep fractures, groundwater flows toward the surface waterbed. This explains why boreholes located along the underground flow path have delivered great yields to supply drinking water to people living on the ground. From 1998 to 2022, the proportion of human settlements and bare land has increased from 9% to 30% of the total area for urban areas and from 2% to 8% for bare land, reflecting that urban reality increased significantly in areas where groundwater is available and moves to accumulate in fissured layers represented through 2D and 3D views. The results of this study are likely to provide better guidance for rapid urbanization and, above all, optimize the management of available and exploitable water resources.

Keywords: Groundwater, Urbanization, Hydraulic head mapping, Land cover, Sinematiali

1. Introduction

Les besoins en eau augmentent considérablement dans le temps. Cette augmentation touche plusieurs domaines, notamment l'agriculture, l'industrie, l'élevage... Les aquifères situés en grande profondeur, sous un recouvrement d'altérites, sont généralement à l'abri des fluctuations saisonnières. Pour ces raisons sécuritaires, l'approvisionnement en eau potable est de plus en plus orienté vers la recherche des eaux souterraines dont la qualité répond généralement aux normes OMS (Biémi, 1992). Du point de vue hydrogéologique, les formations géologiques du socle cristallin sont des roches stériles à porosité interstitielle faible ou nulle. Elles n'offrent de possibilités d'aquifères que lorsqu'elles sont fracturées ou altérées (Savané et al., 1991). En outre, la plupart des forages réalisés au cours de nombreuses campagnes ont pour objectif le captage des fractures hydrauliquement actives (Yao et al., 2014). Cependant, malgré les moyens mis en œuvre, les travaux de forage connaissent un taux d'échec important allant jusqu'à 19% et bon nombre de ces ouvrages tarissent ou ne satisfont pas les besoins des populations dans certaines localités. Cet échec s'explique principalement par la non-prise en compte de la complexité des aquifères discontinus avant l'implantation des ouvrages. Dans la plupart des cas, ces eaux souterraines proviennent des précipitations qui s'infiltrent dans le sol par les ouvertures présentes dans les roches (pores, vides ou fractures), contribuant ainsi à

alimenter partiellement les réserves d'eau souterraine. Ce processus d'infiltration des eaux de pluie vers les réservoirs souterrains est appelé recharge naturelle des nappes phréatiques. Cette recharge peut s'effectuer de manière localisée, à partir de plans d'eau de surface, ou sous forme diffuse via les précipitations traversant la zone non saturée du sol (Ibrahim, 2013). Dans une perspective de durabilité de l'exploitation des eaux souterraines, il est fondamental de comprendre les mécanismes par lesquels ces aquifères se rechargent, afin d'assurer une gestion intégrée des ressources en eau (Mohamed 2012). L'occupation des sols joue un rôle déterminant dans la vitesse à laquelle les eaux de pluie rechargent les aquifères. D'un côté, la végétation favorise fortement l'infiltration car elle limite l'évaporation directe en retenant l'eau dans le sol. De l'autre côté, les surfaces imperméables (telles que les bâtiments et les routes) ralentissent considérablement ce processus (Bou Kheir et al., 2003).

Le département de Sinématiali, qui fait l'objet de cette étude, observe une urbanisation rapide et une intensification des pratiques agricoles. Ce qui engendre une augmentation considérable de la demande en eau dans plusieurs secteurs, notamment l'agriculture, l'industrie, l'élevage, les ménages... Le socle de la zone est complexe, et l'existence d'un aquifère requiert la prise en compte de plusieurs facteurs pouvant favoriser l'accumulation des eaux souterraines (Biscaldi, 1968a, 1968b ; Engalenc *et al.*, 1978, 1979 ; Owolabi *et al.*, 1998). C'est dans le souci de mieux connaître le fonctionnement hydrodynamique souterrain vis-à-vis de l'occupation du sol dans ce département que cette étude a été entreprise sous le thème : Étude de la dynamique des eaux souterraines et de l'occupation des sols dans le Département de Sinématiali (Région du Poro, nord de la Côte d'Ivoire). Elle essaiera principalement de proposer des explications aux variations significatives de l'occupation du sol à travers le temps, à la lumière du dynamisme des eaux souterraines.

2. Présentation de la zone d'étude

La région du Poro est située au nord de la Côte d'Ivoire. Elle est constituée de quatre départements qui sont M'Bengué, Korhogo, Dikodougou et Sinématiali. Le département de Sinématiali qui fait l'objet de la présente étude se localise à l'Est de la région du Poro. Il est limité à l'est par la région du Tchologo, à l'ouest par les sous-préfectures de Lataha et Karakoro et au sud par la sous-préfecture de Dikodougou. Il se situe entre les latitudes 9°22'11 nord et 9°42'25 nord et les longitudes 5°35'21 et 5°15'11 ouest. Il couvre une superficie de 680 km² (Diarrassouba *et al.*, 2014). Il est subdivisé en quatre sous-préfectures, à savoir Sédiogo, Bahouakaha, Kagbolodougou et Sinématiali (Figure 1).

Sur le plan géologique, Sinématiali, tout comme l'ensemble de la région du Poro, s'inscrit dans l'histoire du craton ouest-africain. Cette zone fait partie du socle cristallin et cristallophyllien. Le sous-sol y est composé d'une succession de formations géologiques incluant des bandes de roches métamorphiques, schisteuses ou migmatitiques, ainsi que de nombreuses roches plutoniques (Pothin, 1988). Plusieurs études (Lemoine, 1988 ; Kouamelan, 1996) ont été consacrées à la géologie et à la tectonique de cette région. Il en ressort qu'une tectonique multiphasée a généré un réseau de fracturation très développé au sein de ces formations. Les failles et accidents géologiques de cette localité présentent une orientation nord-est_sud-ouest (Jourda, 2006).

Au niveau hydrogéologique, le socle cristallin se caractérise par des aquifères fracturés, formés à la suite de divers événements tectoniques qui ont généré d'importants réseaux de fissures plus ou moins connectées. Ces fissures sont à l'origine des nappes souterraines en milieu de socle fissuré (Sorokoby et al., 2010) favorisant la circulation des masses d'eau souterraines. Les processus tectoniques et physico-chimiques qui affectent ces roches leur confèrent une porosité et une perméabilité dites secondaires, ce qui permet à ces formations de devenir des aquifères très productifs. On distingue deux types d'aquifères : les aquifères d'altérites, exploités par des puits modernes ou villageois, et les aquifères de fissures, captés par des forages dans le cadre des programmes d'alimentation en eau potable (AEP) des localités (Gnamba et al., 2014). Parmi ces deux types, les réservoirs de fissures offrent des ressources en eau pérennes et sont les plus fiables en termes de productivité, celle-ci étant liée au réseau souterrain de fractures, comme l'ont montré les travaux de Savané (1997) menés dans un contexte géologique similaire.

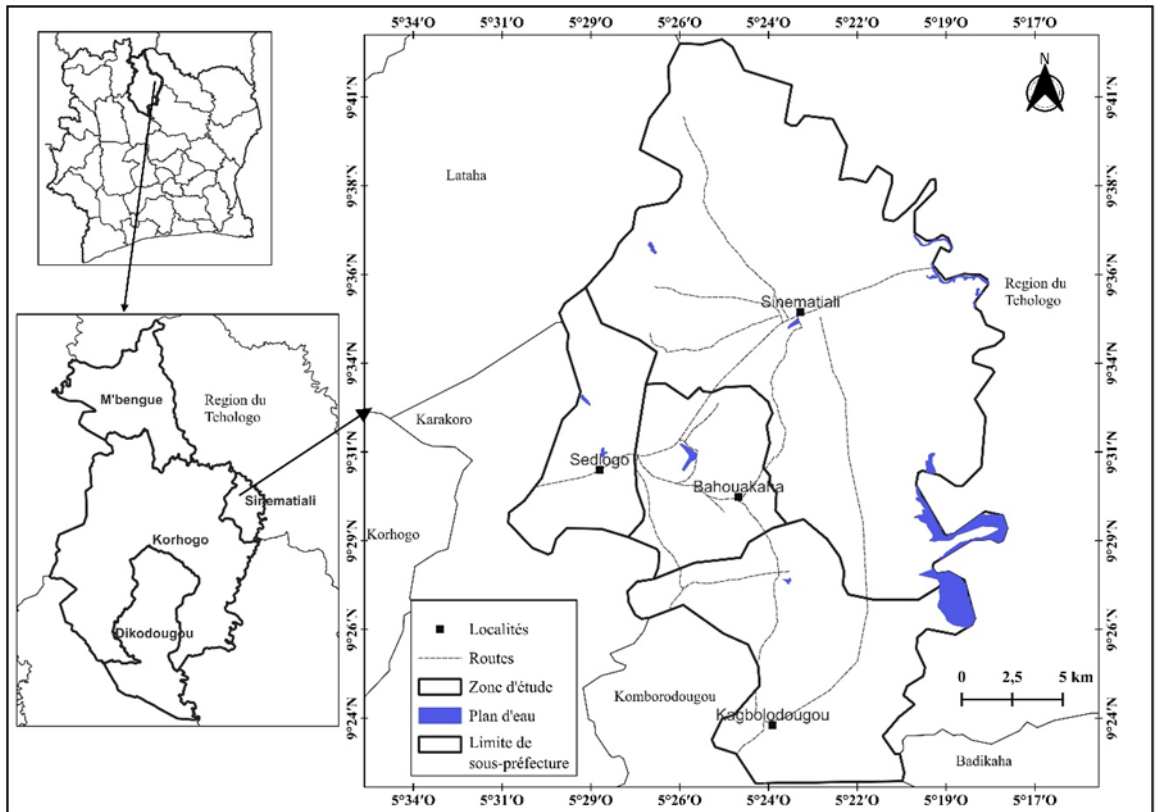


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

3. Matériel et Méthodes

3.1. Matériel

3.1.1. Données d'images satellitaires

Dans cette étude, plusieurs logiciels ont été utilisés pour le traitement des données cartographiques, des images satellitaires et des fractures. Ce sont les logiciels SURFER 16, QGIS 3.18, ArcGIS 10.8, ENVI 5.1 et ROCKWORKS 16.

Les images satellitaires sont enregistrées et corrigées radiométriquement et géométriquement. La projection est au format Universal Transverse Mercator (UTM) dans le référentiel géodésique WGS 84. Les scènes LANDSAT 4 et LANDSAT 8 (197-53) utilisées se composent comme suit :

- Images TM acquises le 13/11/1988. Elles comportent sept bandes spectrales, soit six bandes multispectrales et une bande infrarouge thermique pour le Landsat 4.
- Images OLI/TIRS acquises le 11/01/2022 qui comportent onze bandes spectrales, soit une bande panchromatique, huit bandes multispectrales et deux bandes infrarouges thermiques pour celles de Landsat 8.

3.1.2. Données statistiques de l'étude

Dans le cadre de cette étude, les données utilisées sont les données de forages issues de la direction territoriale de l'hydraulique (DTH) de Korhogo. La base de données utilisée regroupe 234 ouvrages hydrauliques réalisés au cours d'une campagne hydraulique en 1988. Parmi ces ouvrages, 223 ont fait l'objet d'une analyse, dont 96 forages répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Les 11 ouvrages restants ont été identifiés comme non fonctionnels.

Analyse statistique descriptive des données de forages

Une analyse statistique a été effectuée à partir des données des 223 ouvrages réalisés dans le département. Les paramètres statistiques qui caractérisent ces ouvrages sont consignés dans le tableau suivant. Les débits des ouvrages (débit d'exploitation) varient entre 0,079 m³/h et 16,79 m³/h avec une moyenne de 1,52 m³/h. Sur l'échantillon des ouvrages, 194 (soit 87%) ont un débit inférieur à 2 m³/h. 16 ouvrages (soit 7%) ont un débit compris entre 2 m³/h et 5 m³/h et seulement 13 ouvrages ont un débit supérieur à 5 m³/h (soit 6%), qualifié de débit fort par le Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH). Les profondeurs des ouvrages réalisés varient entre 6,80 mètres et 85,5 mètres avec une profondeur moyenne de 32,71 mètres. Les statistiques des paramètres des ouvrages sont consignées dans le tableau I.

Tableau I: Analyse statistique des paramètres de forage

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Profondeur totale (m)	6,80	85,5	32,71	18,62
Épaisseur d'altération (m)	7,4	56	26,34	10,06
Arrivée d'eau (m)	3,5	64	27,42B	15,18
Débit (m ³ /h)	0,08	16,79	1,52	2,10

Relation entre débit et paramètres d'ouvrage

Le tableau II montre des valeurs de coefficients de détermination (R²) faibles. Cela traduit une absence significative de relation entre les différents paramètres pris individuellement avec le débit. La productivité des forages étudiés de la zone d'étude n'est donc pas dépendante de la profondeur de forage ni de l'épaisseur d'altération, encore moins de la profondeur de la 1^{re} arrivée d'eau.

Tableau II: Relation entre le débit d'exploitation et les paramètres d'ouvrage

Couple de paramètres	Coefficient de détermination
Débit - Profondeur totale	0,01023
Débit - Épaisseur d'altération	0,0023
Débit - Arrivée d'eau	0,0436

Proportion des aquifères

- **Les aquifères d'altérites**

Sur un total de 223 ouvrages réalisés dans la zone, 127 ouvrages correspondaient aux puits (soit 57%) et 96 ouvrages correspondaient aux forages (soit 43%). Les puits captent les eaux des aquifères d'altérites ; il a donc été dénombré 127 puits qui sont des aquifères d'altérites sur un total de 223 ouvrages, soit une proportion de 57 % (voir Tableau III).

- **Les aquifères de fractures et de fissures**

La superposition des points de forage à fort débit a mis en exergue les fractures hydrauliquement actives. À cet effet, le nombre d'aquifères de fractures sollicités est de 29 (soit 13%), laissant ainsi 30% aux aquifères de fissures, soit un total de 67 (voir Tableau III).

Tableau III: Proportion des aquifères

Altérites	127	57%
Fissures	67	30%
Fractures	29	13%
Total	223	100%

3.2. Méthodes

3.2.1. Distinction des types d'aquifères

Les aquifères d'altérites sont principalement exploités par les puits (modernes et traditionnels). Leur profondeur n'atteint pas le socle sain. La distinction des deux autres types d'aquifères a été possible à partir de l'observation du profil lithologique vertical de la coupe de forage. L'analyse de cette coupe verticale permet de noter la profondeur à laquelle fut enregistrée la 1^{re} arrivée d'eau comparativement au matériau sain (socle). Ainsi, l'aquifère est considéré comme de type « horizon fissuré » lorsque la 1^{re} arrivée d'eau est enregistrée dans les couches situées au-dessus du socle (roche mère). En revanche, lorsque l'arrivée d'eau est enregistrée dans les couches situées en dessous du socle (roche mère), alors l'aquifère est considéré comme un « aquifère de fracture ».

3.2.2. Élaboration des cartes piézométriques

La carte piézométrique est la représentation cartographique de la charge hydraulique. Elle sera établie dans les aquifères de fissures conformément au modèle conceptuel admis en milieu de socle, tel que celui de notre zone d'étude. Dans les horizons fissurés, la valeur de la charge hydraulique a été calculée par la formule $H = Z - AE1$ où Z est l'altitude de l'ouvrage par rapport au niveau zéro et AE1 désigne la première arrivée d'eau. Pour réduire les erreurs inhérentes à la répartition spatiale d'une variable souterraine, la charge hydraulique a fait l'objet d'une analyse géostatistique

puis d'une interpolation par la méthode automatisée du krigeage ordinaire à l'aide du logiciel Surfer avec une résolution spatiale de 250 m projetée en UTM 30N EPSG 32630. La précision de la carte dépend de la densité de points de mesure et le tracé des hydroisoyptes dépend de la méthode choisie. La méthode du krigeage fut choisie dans ce travail car elle s'accompagne d'une estimation des erreurs.

3.3. Extraction des fractures

Les linéaments sont des structures linéaires rectilignes ou curvilignes résultant des accidents et contrastes géologiques. Ces linéaments peuvent être assimilés à des fractures. Les images satellitaires ont subi un processus en deux étapes dans le cadre de l'identification des linéaments.

3.3.1. Traitement des images satellitaires

Il s'agit de rehausser l'image satellitaire à « une échelle de gris » afin de mettre en évidence les structures linéaires. À cet effet, les bandes des images Landsat utilisées ont été combinées ; à la suite de cette opération de combinaison, s'ensuit une opération de composition colorée. L'opération de la composition colorée a été appliquée pour mieux visualiser les informations contenues dans les bandes spectrales de l'image Landsat 8. Cette composition colorée a porté sur les bandes (2, 3, 4, 5, 6 et 7) de l'image Landsat 8 utilisée. Ces bandes ont été respectivement colorées par trois couleurs du visible, dont le rouge, le vert et le bleu. Une analyse en composantes principales a été appliquée pour réduire le nombre de bandes à traiter. L'application de l'Analyse en composantes principales (ACP) a donné, selon l'ordre d'importance des informations, six composantes principales (CP1, CP2, CP3...). Parmi elles, seul le CP1 a été utilisé pour la suite de l'opération de traitement au vu du nombre d'informations qu'elle portait (98% d'informations). Ce qui a motivé le choix de la digitalisation de ces lignes. Pour améliorer la qualité de l'identification des linéaments, une opération de filtrage simple a été effectuée. Le couplage sur la couche de la zone d'étude nous donne la carte linéamentaire de la zone.

3.3.2. Validation de la carte linéamentaire

Le principe a consisté à projeter d'abord les forages à gros débit sur les linéaments cartographiés. Toutefois, la carte des linéaments est dite validée lorsque les gros débits des forages projetés sur la carte des linéaments se trouvent proches des linéaments ou sur les linéaments. Ensuite, la direction préférentielle des linéaments a été appréhendée à l'aide du logiciel ROCKWORKS.

3.4. Élaboration des cartes d'occupation du sol

L'élaboration des cartes d'occupation du sol de la zone d'étude a été effectuée selon une méthodologie en deux grandes étapes.

3.4.1. Délimitation et extraction de la zone d'étude

Le site d'étude est entièrement couvert par l'image satellitaire TM de Landsat 4 et OLI de Landsat 8 (scène : 197-53). Il s'agit de découper l'image satellitaire selon une couche de masque (shapefile de la zone d'étude). Les bandes des images sont combinées de sorte à trouver une image unique à bandes multiples. S'en est suivie une série de combinaisons colorées de sorte à faciliter l'identification des éléments qui occupent le sol.

3.4.2. Classification supervisée basée sur le maximum de vraisemblance

Pour la classification supervisée ou dirigée, des Regions Of Interest (ROI) ont été identifiées pour les différentes classes identifiées et voulues grâce à une bonne connaissance de l'opérateur du terrain. Nous entraînions dans ce cas la machine avant d'exécuter l'algorithme sur l'ensemble de la zone. L'algorithme d'interpolation est celui du maximum de vraisemblance qui repose sur la règle de Bayes et permet de calculer pour chaque pixel sa probabilité d'appartenir à une classe plutôt qu'à une autre. Le pixel est affecté à la classe dont la probabilité d'appartenance est la plus élevée (Chalifoux et al., 2006). La démarche suivie se résume à trois étapes :

- l'interprétation visuelle des images satellitaires en se basant à la fois sur les caractéristiques des classes d'occupation du sol ;
- la sélection d'un nombre de zones d'entraînement pour les classes voulues ;
- l'évaluation de la fiabilité de la classification et le contrôle du résultat obtenu.

Les types d'occupation des sols représentatifs de l'espace étudié dans le cadre de cette étude sont : la forêt, l'agriculture (les aires de culture), sols nus (affleurement rocheux, jachère, sol dépourvu de couvert végétal, sol occupé par des herbes...), les eaux et l'urbanisation (habitats, bâtiments, bitumes, espaces publics, espaces de jeux ...). Aussi, pour évaluer la qualité statistique des noyaux (ROIS) élaborés, une matrice de confusion entre les pixels de référence (terrain) et les pixels affectés (classification) a été élaborée avec le module « confusion matrix ».

Pour vérifier l'excellence de la correspondance entre la cartographie et les observations sur le terrain, deux paramètres ont été définis :

- La précision globale du traitement, qui exprime la validité du traitement de pixel bien classé (plus cette valeur se rapproche de cent (100 %), plus le traitement est jugé valide).

- Le coefficient Kappa, qui mesure la précision de la classification, est un estimateur de la classification. Il tient compte des erreurs de commission et d'omission. Ces deux paramètres permettent de mieux apprécier la classification effectuée (Chalifoux et al., 2006).

4. Résultats et discussion

4.1. Résultats

4.1.1. Direction des fractures identifiées

Les linéaments obtenus ont été couplés avec les linéaments résultant des activités anthropiques (voies de communication, routes, lignes de haute tension...) de sorte à éliminer toutes les structures linéaires qui ne résultent pas des accidents géologiques. Ainsi, deux cent cinq (205) linéaments ont pu être identifiés et cartographiés sur l'image de résolution spectrale maximale de 30 m. La direction préférentielle de ces linéaments est N45 (Nord-est - sud-ouest) lisible sur le demi-cercle de la rose d'orientation (figure 2). Cette direction est sensiblement identique à celle des failles et accidents majeurs (NNE-SSW) identifiables sur la carte géologique. Elle sera alors prioritairement empruntée par les eaux de surface qui s'infiltreront vers les nappes phréatiques.

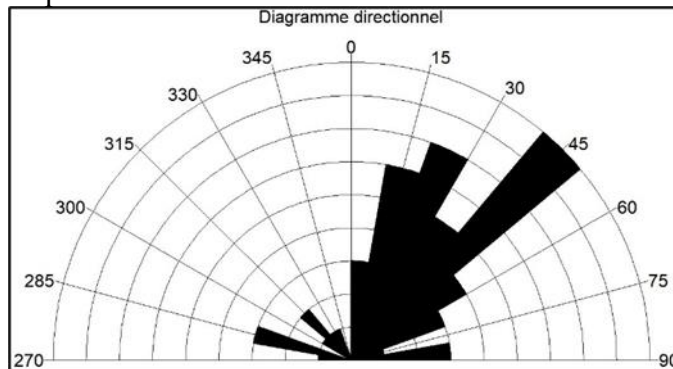


Figure 2 : Direction d'orientation des fractures identifiées

Densité de fracturation

La répartition spatiale de la densité de fracturation révèle une hétérogénéité caractérisée par des zones de forte à très forte densité localisées principalement au sud-est et à l'est de la zone d'étude, notamment autour de Koulolékaha, Kongokaha, Sékoukaha, Fondonkaha... À l'inverse, les zones périphériques nord, sud et ouest présentent une faible à très faible densité de fracturation. Les localités concernées sont les villages de Ladjankaha, Kagbolodougou, Felekaha, Dokaha... Les localités de Sinematiali, Ziekaha Kolokaha, Kpetari... sont caractérisées par une fracturation moyenne. Cette organisation traduit un contrôle structural important sur la circulation des eaux souterraines, les zones les plus fracturées constituant les secteurs les plus

favorables à l'implantation de forages productifs (Figure 3B). Ceci est constaté par la présence de forages à forts débits (Figure 3A). La végétation naturelle favorise une meilleure porosité du sol et réduit le ruissellement. Avec l'extension des surfaces urbanisées, les sols deviennent plus compacts et battants, ce qui accentue le ruissellement et réduit la capacité de recharge des aquifères. À long terme, cette tendance se traduit par une baisse des niveaux piézométriques et une faible disponibilité en eau souterraine en saison sèche.

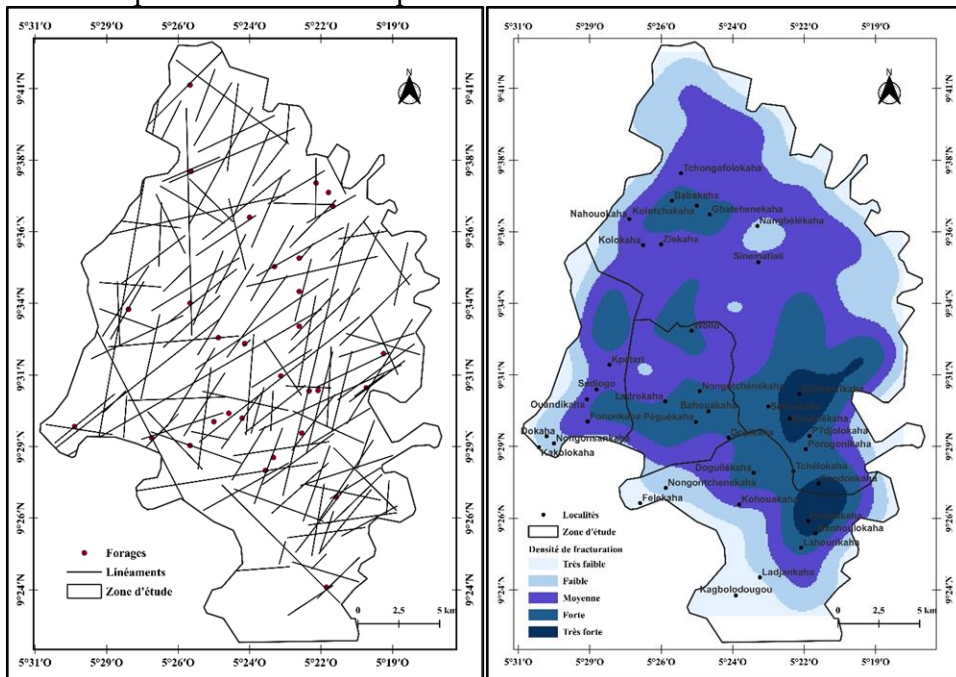


Figure 3 : Cartes de fracturation à gauche et la densité de fracturation à droite

Sens de l'écoulement des eaux souterraines dans les horizons fissurés

Les charges hydrauliques aux profondeurs des premières arrivées d'eau ont permis de construire la carte piézométrique dans les horizons fissurés. Les valeurs des équipotentielles (lignes passant par les charges hydrauliques de même valeur) ont permis de mettre en évidence le sens de l'écoulement de l'eau souterraine dans ces horizons fissurés où sont enregistrées les premières arrivées d'eau (figure 4).

Cette carte met en évidence une zone d'appel d'où partent les lignes de courant : il s'agit de la zone de recharge ou d'infiltration des aquifères des horizons fissurés. Les lignes de courant se dirigent vers le lit du fleuve en transitant par les zones de dépression où les forages implantés ont délivré de gros débits. Cela indique bien que ces zones de dépression, mises en évidence par la représentation en 3D de la carte piézométrique (figure 5), sont les zones privilégiées d'accumulation des eaux souterraines dans les horizons fissurés avant de rejoindre le lit du cours d'eau principal de la zone d'étude, comme

cela est illustré par les coupes en 2D des profils verticaux AC, AB et DE (figure 6). Il existe donc une réalimentation souterraine lente du réseau hydrographique par les nappes souterraines profondes.

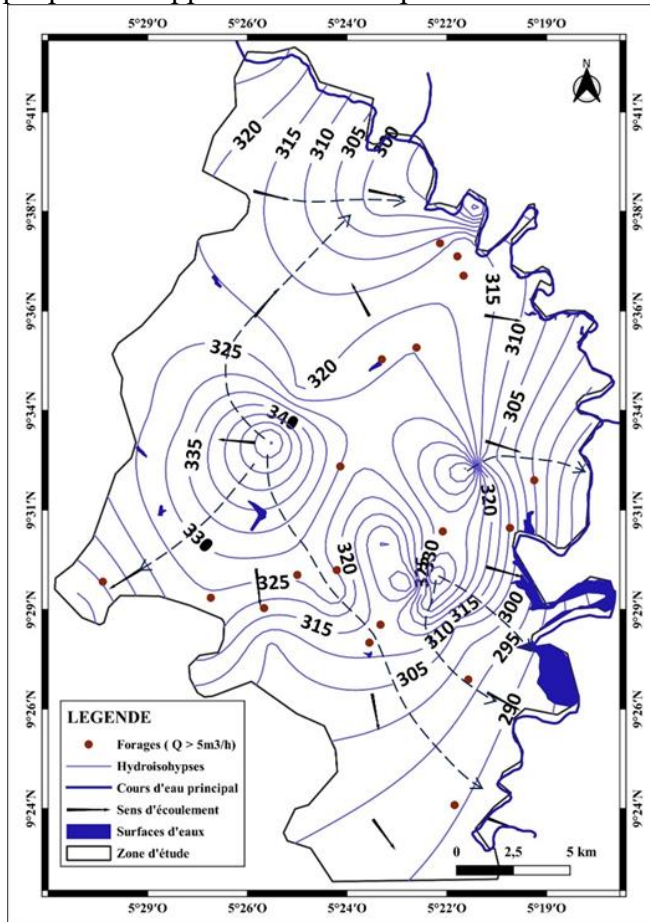


Figure 4 : Carte piézométrique et sens de l'écoulement dans les horizons fissurés

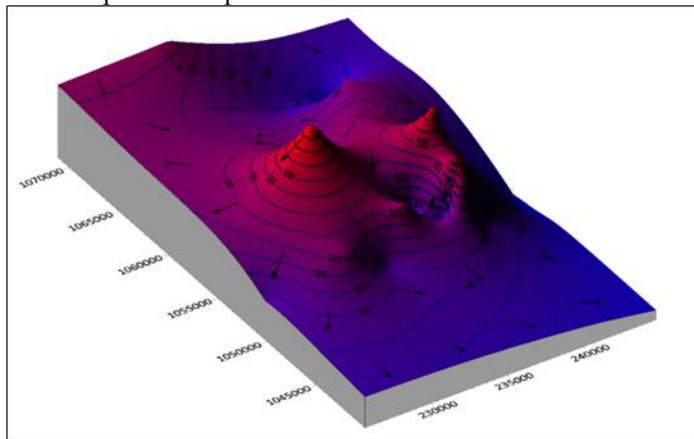


Figure 5: Profil en 3D de la carte piézométrique dans les horizons fissurés de Sinématiali

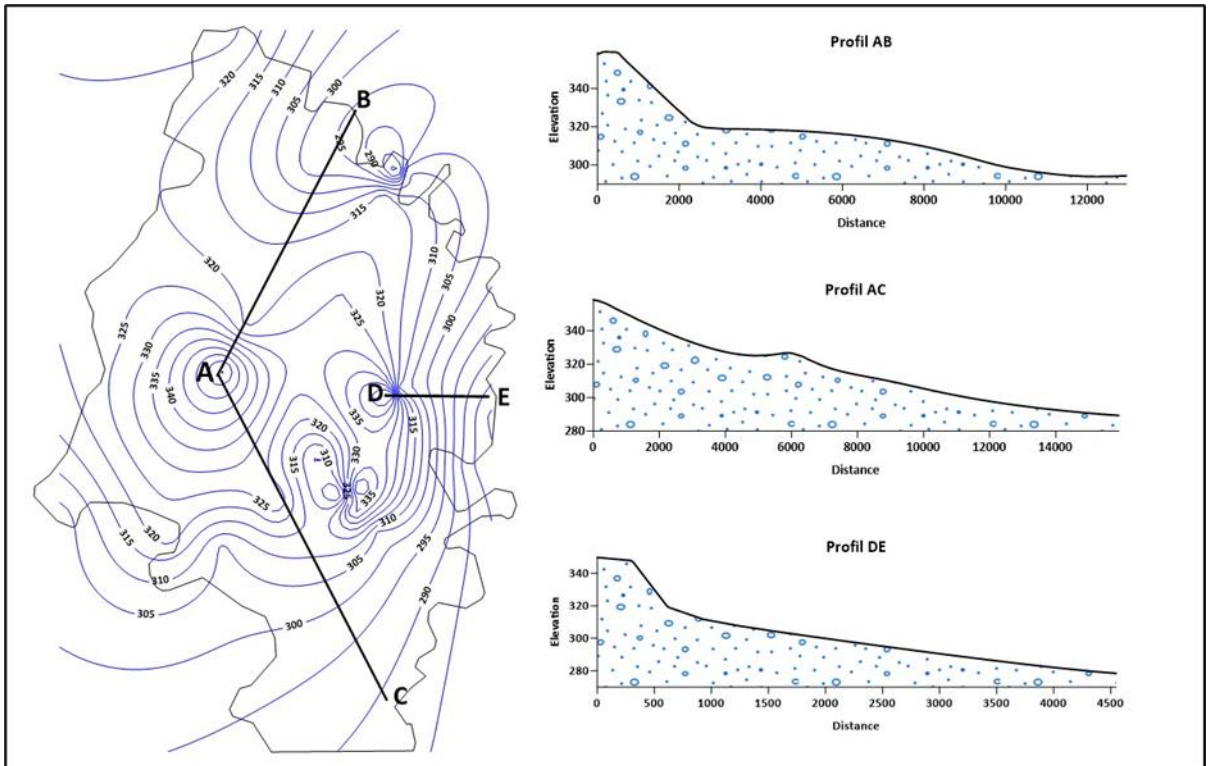


Figure 6 : Profils en 2D des couloirs de circulation des eaux souterraines dans les horizons fissurés

Analyse de la dynamique de l'occupation du sol dans le département de Sinématiali

Les cartes d'occupation des sols (Figure 7) mettent en évidence les zones d'occupation sur lesquelles les activités menées sont susceptibles d'influencer les zones de recharge (encerclées en noir) des nappes d'eau souterraines. La classe de forêt en 1988 se localise majoritairement au sud et au nord-est du département avec quelques îlots au centre, au centre-est et au centre-ouest de la localité. En 2022, elle n'est qu'en petits îlots. Les différents thèmes d'occupation des sols ont été regroupés en cinq (5) grandes classes :

- Forêt ; Eaux, Bâtiments (habitation...) et Agriculture et Sols nus (jachère et surface dépourvue de couvert végétal).
- Forêt : elle concerne la forêt claire et la forêt dégradée, représentée majoritairement au Sud et au Nord de la localité avec une superficie de 235,6595 km², soit 26% du territoire en 1988 ; elle passe à 93,299263 km², soit 10%, localisée en petits îlots au Sud, au Nord et à l'Est en 2022.
- Eaux : Cette classe prend en compte le réseau hydrographique, les barrages et les endroits où la présence d'eau est marquée. Elles se

localisaient à l'est de petits barrages au centre, au Nord-Est et au Sud-Est (affluent de Bandama blanc). Avec 1%, soit 8,358 km² en 1988, elle double en quantité pour couvrir une superficie de 16,716 km², soit 2% en 2022. Cette augmentation de quantité est due à leur réalimentation effective de la part des nappes souterraines, et aussi à la construction de nouveaux petits barrages agricoles notamment au nord-ouest de la localité.

- Bâtiments : Cette classe prend en compte les habitats et l'urbanisation. Elle représentait 9% du territoire, soit 79,6244 km² en 1988. Cette superficie a quasiment triplé pour occuper 30 % de la superficie en 2022, soit 275,3548 km². Certains des nouveaux habitats sont construits sur les sols situés au-dessus de la zone d'appel ou de recharge (illustrée par un cercle en trait noir discontinu) des aquifères à horizons fissurés.

D'autres habitats sont construits dans le voisinage de certains couloirs de direction préférentielle pour l'infiltration et la circulation superficielle vers les nappes phréatiques.

- Agriculture : Cette classe concerne les aires de culture et de plantation. Sa superficie couverte est passée de 62%, soit 572,4311 km² en 1988, à 50%, soit 461,4514 km² en 2022. Cette diminution de la surface peut être due à une augmentation des aires de jachères et à l'augmentation des habitations en raison de la croissance de la population.
- Sols nus : Cette classe concerne de façon primordiale les aires jachères et les sols dépourvus de couverts végétaux. Elle se localise au sein des grandes aires de culture aussi bien en 1988 qu'en 2022. Elle était de 21,5334 km², soit 2% en 1988, puis elle a augmenté jusqu'à 78,701255 km², soit 8% en 2022.

La figure 8 montre la répartition des classes de l'occupation des sols entre 1988 et 2022, tandis que le tableau IV consigne les proportions et superficies individuelles de chacune des classes majeures de l'occupation des sols.

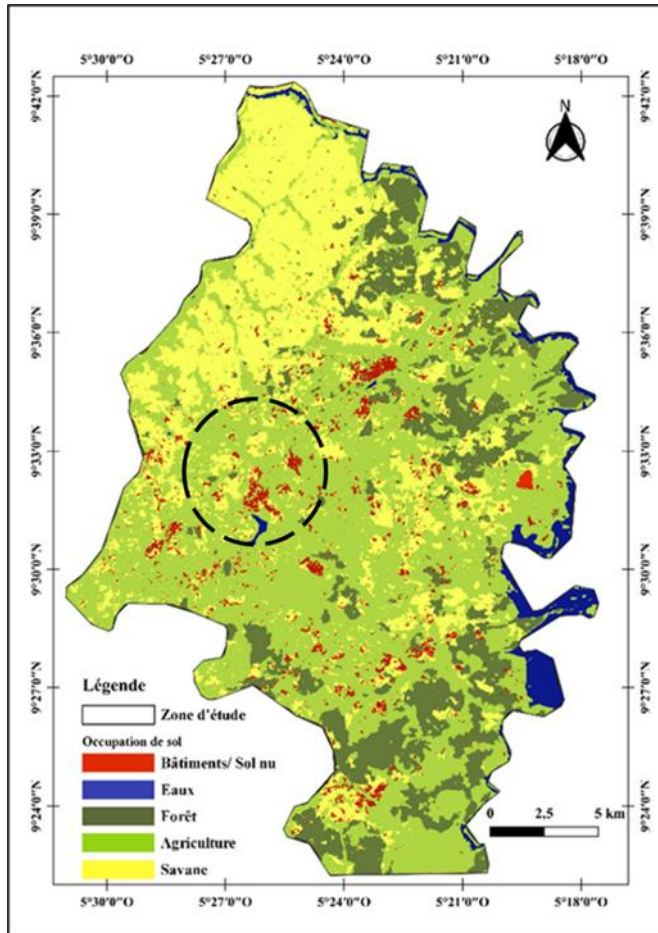


Figure 7 : Occupation de sols en 1988 à gauche et en 2022 à droite

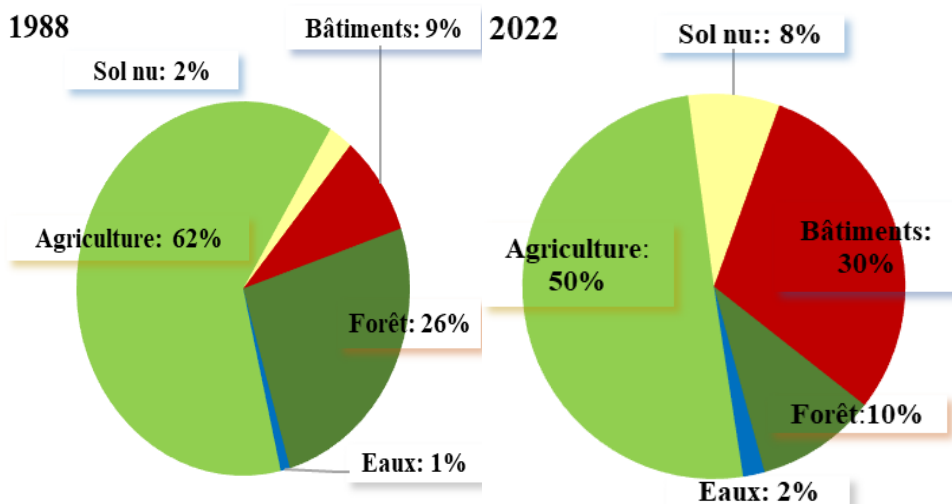


Figure 8 : Répartition des classes d'occupation du sol en 1988 et en 2022

Tableau IV : Proportions et superficie des classes de l'occupation du sol

	1988		2022	
	Superficie	Proportion	Superficie	Proportion
Zone urbaine	79,62	9%	275,36	30%
Forêt	235,66	26%	93,30	10%
Eaux	8,36	1%	16,72	2%
Agriculture	572,43	62%	461,45	50%
Sol nu	21,53	2%	70,78	8%
Total	917,61	100%	917,61	100%
Précision	96,1%		75,11%	
Kappa	0,92		0,66	

4.2. Discussion

L'analyse des paramètres des ouvrages de la zone d'étude montre que la profondeur d'un ouvrage n'est pas forcément corrélée au débit. Aussi, à partir de 85 mètres de profondeur, les chances de rencontrer des débits importants sont réduites. À Sinématiali, les ouvrages étudiés ne dépassent pas la profondeur de 90 m, ce qui se traduit par une profondeur moyenne générale de 32,71 m. En effet, en Afrique de l'Ouest, selon Biémi (1992), les fractures hydrauliquement actives se referment avec la profondeur. Ainsi, il a proposé des profondeurs de foration à ne pas excéder dans le socle (80 mètres dans les granites et 100 mètres dans les schistes) pour des raisons économiques. En effet, la productivité d'un forage va dépendre de la nature de la roche sous-jacente et des mégafractures (Jourda, 2005). Cependant, l'épaisseur d'altération augmente la probabilité d'obtenir d'importants débits (Kouassi et al., 2012).

La carte piézométrique illustre les charges hydrauliques dans les horizons fissurés à partir des premières arrivées d'eau, avec des contours bleus (équipotentiels) et des zones hachurées bleues (surface d'eau, cours principaux). Ces charges hydrauliques sont obtenues à partir d'une profondeur moyenne de 30 m en dessous de la topographie. Ces résultats sont différents de ceux de Yao (2009), selon qui la profondeur moyenne de la piézométrie est d'environ 7,3 m. Ceci est justifié par la différence de l'environnement géologique, la discontinuité des aquifères du socle et la complexité des aquifères fissurés. Les charges élevées (345-360) enregistrées au Centre-Ouest indiquent une zone d'appel/recharge des horizons fissurés, confirmée par les lignes de courant rayonnant vers le Sud-Est, l'Est et le Nord-Est où les charges faibles sont enregistrées. Ce qui est conforme aux principes hydrogéologiques standards. Cela pourrait suggérer que les eaux souterraines tentent de rencontrer le lit du fleuve Bandama blanc bordant toute la partie ouest du département de Sinématiali. Ces résultats corroborent ceux de Ouattara (2022). Pour cet auteur, les nappes alimentent les eaux de surface. Pour Castany (1982) et Winter et al. (1998), la piézométrie identifie les zones

d'échanges nappe-rivière en analysant le comportement des lignes de courant par rapport au sens d'écoulement fluvial.

Les lignes équipotentiels montrent un écoulement radial depuis la zone de recharge (hautes charges : 360) vers les dépressions (basses charges : 200), favorisant de forts débits aux forages. Cela est confirmé par les forages délivrant des débits supérieurs ou égaux à 5 m³/h. Yao et al. (2015) soutiennent qu'une baisse de la piézométrie pourrait se montrer aux endroits où les eaux souterraines sont captées par des drains. Cela reflète un aquifère fissuré typique, où la recharge locale (précipitations/infiltration) alimente les zones exploitées. Ces résultats démontrent un système aquifère connecté : recharge-stockage en dépression-écoulement vers un drain fluvial, ce qui rend les nappes vulnérables à une pollution chimique, notamment de l'exploitation minière et de l'agriculture intensive avec l'utilisation d'intrants chimiques.

La superposition des forages à gros débit sur certains linéaments montre que ces linéaments sont des fractures hydrauliquement actives. Ce qui confirme qu'en milieu de socle cristallin, seules les fractures sont les véritables couloirs d'eau souterraine (Koudou et al., 2013). Ces résultats sont en accord avec ceux de Biémi (1992) ; Savané et al. (1995) ; Lasm (2000) ; Lasm et al. (2004). Les nœuds de fractures et les fractures de taille kilométrique sont les zones favorables pour les gros débits. Aussi, la direction préférentielle des linéaments identifiés, étant la direction nord-est - sud-ouest (NE-SO), concorde avec celle de Jourda et al. (2006) qui, dans une étude dans la région de Korhogo, ont pu relever trois directions majeures de fracturation dont la direction nord-est - sud-ouest (NE-SO) est la direction éburnéenne et dont la productivité des fractures hydrauliques peut atteindre 20 m³/h. Pour ces auteurs, les principales directions productrices de la région ont été identifiées et sont la direction N-S et la direction NE-SO.

Concernant la cartographie de l'occupation des sols, la précision globale obtenue à partir de la classification supervisée basée sur le maximum de vraisemblance est de 96,1 % en 1988 et de 75,11 % en 2022. Le choix de la méthode d'interpolation a porté sur le maximum de vraisemblance car il est le plus utilisé. Toutefois, les coefficients de kappa de ces classifications sont tous deux supérieurs à 0,41 (0,92 en 1988 et 0,66 en 2022) ; la classification est jugée presque parfaite pour celle de 1988 et modérée pour celle de 2022. Landis et Koch (1977) soutiennent que, pour des valeurs du coefficient kappa supérieures ou égales à 0,41, la carte d'occupation du sol peut être jugée modérée, substantielle ou presque parfaite. Pendant la période d'étude, l'occupation du sol a connu des modifications marquées dans le département de Sinématiali. La végétation spontanée (forêt claire et savane arborée surtout) a fortement régressé au profit des zones agricoles et de l'urbanisation. En effet, les activités anthropiques entraînent un afflux de population, engendrant ainsi la multiplication d'effets complémentaires tels que l'extraction minière,

l'expansion agricole et la multiplication des constructions, ce qui contribue à la déforestation. Aussi, la connaissance des entités de l'occupation du sol, surtout de la zone de recharge identifiée, nous amène à penser que les réserves en eau souterraine peuvent être vulnérables à une pollution chimique d'une part. Et d'autre part, l'augmentation des bâtiments dans la zone de recharge identifiée est susceptible d'empêcher une infiltration effective. Ce qui est conforme aux résultats de Koudou et al. (2013). Qui annonça que la connaissance des éléments d'occupation du sol renseigne sur l'état du milieu à se laisser traverser par les eaux pluviales qui contribuent favorablement à la recharge des nappes.

Conclusion

Cette étude nous a permis de comprendre la relation qui existe entre les paramètres des ouvrages et la productivité. Il n'y a cependant pas de tendance particulière entre ces paramètres et le débit. Elle a relevé que la profondeur totale, l'épaisseur d'altération et les arrivées d'eau de la majorité des ouvrages de la région se situent respectivement entre 25 et 70 mètres, entre 5 et 40 mètres et entre 5 et 45 mètres. Les cartes piézométriques ont permis d'identifier quelques zones susceptibles d'être des zones de recharge et d'éventuels endroits pouvant être des zones d'emmagasinement d'eau souterraine et propices à l'implantation de nouveaux ouvrages hydrauliques. L'occupation du sol, quant à elle, a révélé une progression des bâtiments qui a engendré une baisse de la végétation. Elle a un réel impact sur les eaux souterraines dans la mesure où les activités anthropiques sont généralement susceptibles d'influencer l'infiltration dans les nappes, c'est-à-dire les zones de recharge. Au vu de tous ces résultats, nous pouvons affirmer que l'objectif général de notre étude a été atteint. En ce sens que les types aquifères et leurs proportions ont été identifiés, les sens de l'écoulement de l'eau ont été déterminés et une nette relation entre l'occupation du sol et la surface a été établie. En définitive, une combinaison de différentes méthodes d'implantation, à savoir la géomorphologie, la géophysique et la télédétection, pourrait contribuer à améliorer qualitativement les décisions lors des différentes campagnes hydrauliques.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Biémi, J. (1992) : Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : Hydrostructural, hydrodynamique et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'État des sciences naturelles, Université d'Abidjan, 479 p.
2. Biscaldi, R. (1968a) : Hydrogéologie des roches éruptives et métamorphiques. Analyse bibliographique - *Bulletin du BRGM (2e série)*, section III, n° 2, pp. 23-40.
3. Biscaldi, R. (1968b) : Problèmes hydrogéologiques des régions d'affleurement de roches éruptives et métamorphiques sous climat tropical — *Bulletin du BRGM (2e série)*, section III, n° 2, pp. 7-22.
4. Bou Kheir, R., Shaban, A., & Girard, M.-C. (2003) : Caractérisation morpho-pédologique des zones karstiques du Liban : sensibilité des sols à l'érosion hydrique. *Sécheresse*, 4, 247–255.
5. Castany, G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. *Infoscience: Dunod*, Paris, (France), 236 p.
6. Chalifoux, S., Nastev, M., Lamontagne, C., Latifovic, R., & Fernandes, R. (2006) : Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Télédétection*, 6: 9-17.
7. Coulibaly, N. (2009) : Conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans la région du Denguélé (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan, 156 p.
8. DE Lasme, O. Z. (2013) : Contribution à une meilleure connaissance des aquifères fissurés du socle précambrien : cas de la région de San-Pédro (sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, p. 22.
9. Diarrassouba, N., Silue, S., Fofana, J. I., Dago, N. D., Kouame, M. T. N. & Koffi, E. K. (2014) : Caractérisation et évolution des vivriers dans un système d'exploitation agricole à base de coton dans le département de Sinématiali, Côte d'Ivoire. Abidjan : *Int. J. Biol. Chem. Sci*, pp 1657.
10. Engalenc, M., Grillot, J.C. & Lachaud, J.C. (1978) : Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. *Édition Géohydraulique*, Volume 1, 190 p.
11. Engalenc, M., Grillot, J.C. & Lachaud, J.C. (1979) : Méthodes d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches de l'Afrique de l'Ouest. *Édition Géohydraulique*, Volume 2, 193 p.

12. Faillat, J. P. (1986) : Aquifères fissurés en zone tropicale humide : structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat d'État sciences naturelles, Univ. Languedoc, Montpellier, France, 534 pages.
13. Gnamba, F. M., Oga, Y., Gnanagne, T., Lasm, T., Biem, J. & Kouakou, Y. (2014) : Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléo-protérozoïque de la région de Katiola (centre-nord de la Côte d'Ivoire), *European Scientific Journal*, 10(5) : pp 79-98.
14. Ibrahim, M. (2013) : Impacts des changements d'usage des sols sur les ressources en eau souterraine au Sahel nigérien. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 173 p.
15. Jourda, J. P. (2005) : Méthodes d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés de l'Afrique de l'Ouest : concept de l'hydrotechnique spatiale, cas des zones test de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 435 p.
16. Jourda, J. P., Saley, M. B., Djagoua, E. V., Kouame, K. J., Biemi J., & Razack., M. (2006) : Utilisation des données ETM+ de LANDSAT et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (Nord de la côte d'Ivoire) : approche par analyse multicritère et test de validation. *Télédétection*, 5 (4) : pp. 339-357.
17. Konate, L. (2007) : Apport de la télédétection, d'un Système d'information Géographique (SIG) et d'une modélisation hydrologique à l'étude de la vulnérabilité à l'inondation : cas de la commune de Cocody (sud de la Côte d'Ivoire). DEA Sciences de la Terre option hydrogéologie, Université de Cocody, 75 p.
18. Kouadio, K. E. (2005) : Stratégie de prospection des nappes de fissures par analyse spatiale du potentiel de productivité et optimisation de la profondeur des forages. Cas du Denguélé (Nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 181 p.
19. Kouakou, E. K. B., N'go, A., Gueladio, C., & Savané, I. (2013): Environmental Vulnerability Index: Application to the White Bandama Basin in the Northern Côte d'Ivoire. *International Journal of Conservation Science*, 90p.
20. Kouame, G. R. (2015) : Occupation des sols et vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la région du Poro (nord de la Côte d'Ivoire). Mémoire de master, 50p.
21. Kouame, K. M. (2013) : Prévention et étude des risques d'inondation en milieu urbain par télédétection et système d'information géographique (SIG) : cas de la commune de Cocody, Abidjan (sud de

- la Côte d'Ivoire). Mémoire de DEA, Université de Cocody-Abidjan, p. 8.
22. Kouamelan, A. N. (1996) : Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse Université Rennes 1, 284 p
 23. Kouassi, A. M., Ahoussi, K. E., Yao, K. A., Ourega, W., Yao, K. S. B. & Biemi, J. (2012) : Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région de Nzi-Cornoé (Centre-est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 10: pp 57-74.
 24. Koudou A., Adiaffi B., Assoma T.V., Sombo A.P., Amani E.M.E. & Biemi J. (2013) : Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du sud-est de la Côte d'Ivoire. *Geo-Eco-Trop.*, 2013, 37, 2: pp211-226
 25. Landis, J. R. & Koch, G. G. (1977): The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 1, pp. 159-174.
 26. Lasm, T. (2000) : Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, p. 274.
 27. Lasm, T., Kouame, F., Oga, M.S., Jourda, J.R.P., Soro, N. & Kouadio, B.H. (2004) : Étude de la productivité des réservoirs des zones de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 5 : 97-115.
 28. Lemoine, S. (1988) : Évolution géologique de la région de Dabakala (NE de la Côte d'Ivoire) au protérozoïque inférieur. Possibilité d'extension au reste de la Côte d'Ivoire et au Burkina Faso : Similitudes et différences ; les linéaments Greenville-Ferkessédougou et Grand Cess-Niakaramadougou. Thèse de doctorat d'État, Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand II), 334 p.
 29. Mohamed, A. S. (2012) : Approches hydrodynamiques et géochimiques de la recharge de la nappe du Trarza, Sud-ouest de la Mauritanie. Thèse de doctorat, Sciences de la Terre. Université Paris-Sud - Paris XI, 181 p
 30. Ouattara, G. S. (2022) : Étude des interactions nappe-rivière à l'échelle du bassin versant de la rivière Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest, Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université Jen Lorougnon Guede, Daloa, 181 p.
 31. Owolabi, A., & Adegoke-Anthony, C.W. (1988): Groundwater prospects in the basement complex rocks of southwestern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 7, n°. 1, pp. 227-235.

32. Pothin, K. (1988) : Pétrographie et géochimie des formations précambriennes de la région d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'État, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 329 p.
33. Savané, I. (1997) : 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 de doctorat d'État, Université de Cocody, Abidjan, 396 p.
34. Savané, I., Benie G.B., Guyon Q.H. & Biemi J. (1995) : Application de la télédétection à la recherche des eaux souterraines en milieu de socle cristallin : cas d'Odienné, Côte d'Ivoire. *AUPELF-UREF, Télédétection et Ressources en eau, Vème Journée Scientifique de Tunis, Presses de l'Université du Québec* : pp. 111-120.
35. Savané, K. Affian B. Z., Koli & Cougny, G. (1997) : Stratégie de recherche des eaux souterraines dans les régions à substratum cristallin : exemple du département de Korhogo (Côte d'Ivoire). *Bull. de l'Association Internationale de Géologie de l'ingénieur*, (44), pp. 79-88.
36. Shrimalil, S., Agganvalz, S., & Sam Ra, J. (2001): Prioritizing erosion-prone areas in hills using remote sensing and GIS - a case study of the Sukhna Lake catchment (Northern India). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3: pp 54-60.
37. Soro, N. (1987) : Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire (bassin versant de la Mé). Thèse de doctorat, 3e cycle, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 239 p.
38. Sorokoby, V. M., Saley, M. B., Kouame, K., Djagoua, M., Bernier, M., Affian K., & Biemi J. (2010) : Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie linéamentaire et thématique de Soubré-Meagui (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : contribution à la gestion des ressources en eau souterraine. *Télédétection*, 9(3-4): pp. 209-223.
39. Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O. L. & Alley, W.M. (1998): Groundwater and Surface water are a single resource: *U.S. Geological Survey Circular, Dakota Water Science Center (USA)*, 79 p.
40. Wyns, R., Baltassat, J.M., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J., & Mathieu, F. (2004): Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société géologique de France* 175 (1), 21-34.
41. Yao, K. T. (2009) : Hydrodynamisme de l'eau souterraine dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. Thèse de

- doctorat. Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France, 284 p.
42. Yao, K. T., Fouché, O., Oga, M.-S., & Assoma, T.V. (2012) : Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé. *Téledétection, Éditions des Archives Contemporaines / Éditions scientifiques GB / Gordon and Breach Scientific Publishers*, 10 (4), pp.161-178.
 43. Yao, T. K., Fouché, O., Kouadio, E. K., Oga, M.-S., & Lasm, T. (2015) : Modélisation de la surface piézométrique des aquifères fissurés en zone de socle précambrien métamorphisé : cas du bassin versant du Sassandra (sud-ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 28(2), 105–117. <https://doi.org/10.7202/1032293ar>