ÉVALUATION DES RISQUES HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES PAR ANALYSE MULTICRITERE SIG : CAS DU PROJET DE CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DE 30 MWc DE NIGOUNI (NORD DE LA COTE D\\\'IVOIRE).

RÉSUMÉ

L'essor des énergies renouvelables en Côte d'Ivoire, notamment le solaire photovoltaïque, nécessite des études hydrologiques préalables pour garantir la viabilité et la sécurité des infrastructures. La présente étude a été réalisée sur le site de Nigouni, dans le département de Tengréla au Nord de la Côte d'Ivoire, dans le cadre du projet de réalisation d'une centrale solaire photovoltaïque de 30 MWc initié par CI-ENERGIES. L'objectif principal de ce projet était d'identifier les zones à risque d'inondation, d'estimer les débits et niveaux de crue, et d'identifier les sources d'eau adéquates à la réalisation du projet (construction et exploitation). La méthodologie adoptée repose sur l'analyse des données pluviométriques (période 2011–2025), la cartographie thématique par Système d'Information Géographique (SIG), l'analyse géologique et pédologique du site ainsi que des investigations hydrogéologiques de terrain. Les résultats montrent que le site de Nigouni, sous un climat soudanais avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1418,28 mm, présente un risque d'inondation faible à moyen, les eaux de ruissellement étant drainées naturellement vers le lac de Tengréla. Sur le plan hydrogéologique, les formations granitiques d'âge Protérozoïque inférieur présentent de faibles conductivités hydrauliques, mais les fractures sous-jacentes constituent des aquifères potentiellement exploitables. Ces résultats constituent une base technique essentielle pour la conception et l'implantation sécurisée de la centrale solaire photovoltaïque.

Mots-clés: -Hydrologie, Hydrogéologie, Centrale solaire, Inondation, Nigouni, Tengréla, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The development of renewable energies in Côte d'Ivoire, particularly solar photovoltaics, requires prior hydrological studies to ensure the viability and safety of infrastructures. This study was conducted at the Nigouni site, in the Tengréla department in northern Côte d'Ivoire, as part of the project to build a 30 MWp solar photovoltaic power plant initiated by CI-ENERGIES. The main objectives were to identify flood-prone areas, estimate flood flows and levels, and identify adequate water sources for the project. The methodology is based on the analysis of rainfall data (2011–2025), thematic mapping using Geographic Information Systems (GIS), geological and pedological site analysis, and field hydrogeological investigations. Results show that the Nigouni site, under a Sudanese climate with a mean annual rainfall of 1418.28 mm, presents a low to moderate flood risk, as runoff is naturally drained toward the Tengréla dam. From a hydrogeological perspective, Proterozoic granite formations exhibit low hydraulic conductivities, but underlying fractures represent potentially exploitable aquifers. These results provide an essential technical basis for the safe design and implementation of the solar power plant.

Keywords: -Hydrology, Hydrogeology, Solar power plant, Flood, Nigouni, Tengréla, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION: -

La Côte d'Ivoire fait face à une demande énergétique croissante, alimentée par une urbanisation rapide, une industrialisation progressive et une augmentation de la population estimée à plus de 27 millions d'habitants en 2022 [1]. La consommation nationale d'électricité a connu une progression annuelle d'environ 7 à 9 % au cours de la dernière décennie [2]. Malgré ses atouts en matière d'énergie hydroélectrique et thermique, la Côte d'Ivoire reste confrontée à des déficits de production récurrents, particulièrement lors des périodes d'étiage qui affectent les barrages hydroélectriques d'Ayamé, de Kossou, de Buyo et de Taabo [3]. En 2020, la puissance installée totale était d'environ 2 230 MW pour une demande de pointe dépassant 1 900 MW, laissant peu de marges de réserve [4].

Face à ces défis présentés ci-dessus, le gouvernement ivoirien a adopté une politique énergétique ambitieuse inscrite dans le Plan National de Développement (PND 2021–2025) et dans la Politique

Énergétique Nationale. Celle-ci vise à porter la capacité de production nationale à 4 000 MW à l'horizon 2030, avec une part significative accordée aux énergies renouvelables, notamment le solaire photovoltaïque [5]. La Côte d'Ivoire bénéficie en effet d'un ensoleillement moyen annuel de 2 000 à 2 500 heures, ce qui en fait un territoire particulièrement propice au développement de l'énergie solaire [6]. Dans ce cadre, CI-ENERGIES, opérateur national du secteur électrique, a initié plusieurs projets de centrales solaires photovoltaïques sur l'ensemble du territoire, dont celui de Nigouni dans le département de Tengréla au Nord du pays, d'une capacité de 30 MWc. La mise en œuvre de ces projets solaires requiert des études techniques préalables, notamment hydrologiques et hydrogéologiques, afin de garantir la sécurité des installations vis-à-vis des risques naturels (inondations, érosion) et d'assurer l'approvisionnement en eau nécessaire à la construction et à l'exploitation du site.

L'implantation d'infrastructures énergétiques en zones rurales semi-arides soulève des enjeux hydrologiques spécifiques. En Afrique de l'Ouest, les régions soudaniennes présentent une forte variabilité spatiale et temporelle des précipitations, avec des crues soudaines pouvant affecter sérieusement les infrastructures au sol [7,8]. Par ailleurs, la disponibilité des ressources en eau souterraine dans les formations cristallines comme celle de la zone du présent projet reste souvent limitée, rendant leur identification préalable indispensable pour tout projet de développement [9]. Dans ce contexte, la présente étude vise à : (i) identifier les zones à risque d'inondation sur le site de Nigouni ; (ii) estimer les débits et niveaux de crue dans la zone du projet ; (iii) identifier et quantifier les sources d'eau adéquates au projet, pour la phase de construction comme pour l'exploitation continue du système. Ces informations sont essentielles pour guider les soumissionnaires dans la compréhension des risques hydrologiques associés au site de Nigouni.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE: -

Localisation de la zone d'étude: -

Le site de Nigouni est situé dans le département de Tengréla, au nord de la Côte d'Ivoire (coordonnées approximatives : 10°32'N, 6°25'W). Il est localisé au sud de la localité de Nigouni, à gauche sur l'axe Tengréla–Nigouni (Figure **Error! Reference source not found.**). Le département de Tengréla constitue l'une des zones les plus septentrionales du pays, frontalière avec le Mali et le Burkina Faso.

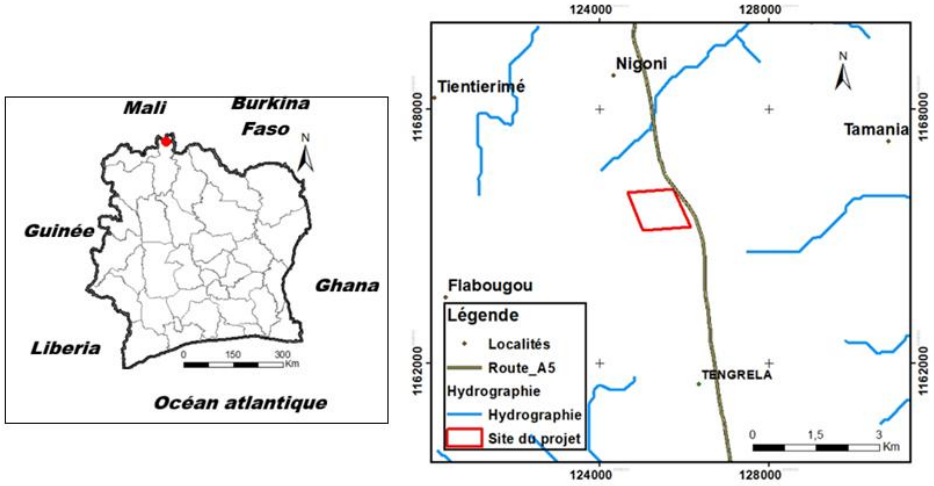

Figure 1. Localisation du site de Nigouni

Climat: -

La zone du projet est soumise à un climat tropical de transition, dit soudanais, caractérisé par deux saisons bien différenciées [10] (Figure **Error! Reference source not found.**):

- Une saison pluvieuse de mi-avril à fin octobre ;
- Une saison sèche de novembre à mi-avril, marquée par des écarts thermiques élevés, la présence de l'harmattan (vent sec en provenance du Sahara), une faible nébulosité et une absence quasi-totale de précipitations de décembre à février.

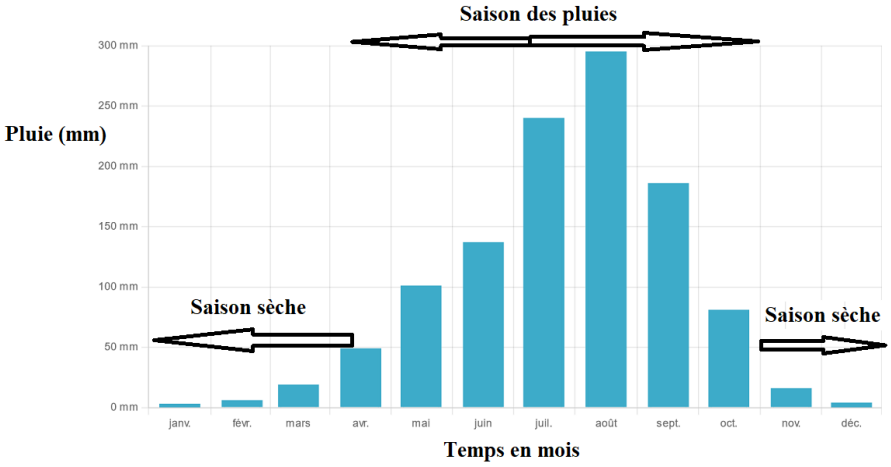

Figure 2. Découpage des différentes saisons au niveau de la zone d'étude

Pluviométrie: -

L'analyse des données pluviométriques fournies par la SODEXAM [11] pour la station de Tengréla sur la période 2011 à 2025 révèle une forte variabilité interannuelle des précipitations. Les pluies annuelles varient entre 1115,1 mm (2017) et 1942,8 mm (2018), avec une moyenne de 1418,28 mm. Le nombre moyen annuel de jours de pluie est de 54 à Toumoukoro, 57 à Tengréla et 61 à Kanakono. Le pic pluviométrique principal est observé en août, conformément aux régimes hydro-climatiques soudaniens décrits par Mahé et al. [8].

Températures: -

Les températures dans la zone de Nigouni varient entre 21 °C et 35 °C (Figure **Error! Reference source not found.**). En mai, la température moyenne avoisine 32 °C. Pendant les mois de décembre à février, sous l'influence de l'harmattan, les températures peuvent descendre aux alentours de 20 °C. Ces valeurs sont cohérentes avec les données climatiques des régions soudaniennes de Côte d'Ivoire décrites par Kassin et al. [10].

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

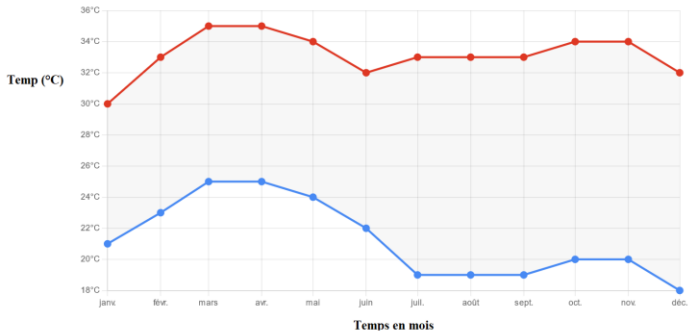

Figure 3. Evolution mensuelle des températures maxi et mini sur la période 2011 à 2025

Relief:-

Le relief de la région de Tengréla est globalement plat, parsemé d'inselbergs pouvant atteindre 421 m d'altitude. Au niveau du site de Nigouni, les altitudes varient entre 355 m et 375 m, avec une pente générale orientée nord–sud. Cette morphologie serait favorable à l'écoulement gravitaire des eaux de surface vers le sud en direction du lac de Tengréla.

Géologie et pédologie:-

Les formations géologiques de la zone du projet datent du Protérozoïque inférieur et sont issues essentiellement de la granitisation éburnéenne et du plutonisme basique [12,13]. Le profil d'altération présente de haut en bas : (i) une couche de sol humifère en surface ; (ii) des altérites argileuses ; (iii) des arènes granitiques ; (iv) une zone de transition multifissurée ; (v) la roche mère. Les investigations de terrain (sondages à la tarière manuelle, puits manuels, essais pressiométriques SP1 à SP10 descendus à 12 m) ont mis en évidence des argiles d'altération sur toute la profondeur testée, surmontées d'une couche de graveleux latéritique et/ou de sable argileux d'épaisseur variant entre 2,30 et 3,00 m.

Réseau hydrographique local du site de Nigouni:-

À l'échelle locale, le site de Nigouni est caractérisé par un réseau hydrographique peu développé, de type dendritique, typique des zones de socle cristallin à faible relief en Afrique de l'Ouest (Figure **Error! Reference source not found.**). Ce réseau a été extrait et analysé à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM de 30 m de résolution spatiale, en utilisant les outils d'analyse hydrologique du logiciel QGIS 3.22 (algorithmes de remplissage de dépressions, de direction d'écoulement et d'accumulation de flux). Les principales caractéristiques du réseau hydrographique local de Nigouni sont les suivantes :

(i) Absence de cours d'eau pérenne : Le site de Nigouni ne présente aucun cours d'eau pérenneen son sein ou à proximité immédiate. Cette caractéristique est fondamentale ; car, elle exclut tout risque de débordement de rivière directement sur le site du projet. Les seules eaux de surface présentes sont donc les eaux de ruissellement pluvial, dont l'occurrence est strictement liée aux épisodes pluvieux de la saison des pluies (mi-avril à fin octobre) ;

(ii) Présence de rigoles et de chenaux d'écoulement temporaires **:** Les investigations de terrain ont mis en évidence plusieurs rigoles et chenauxd'écoulement temporaires qui se forment après les épisodes pluvieux. Ces chenaux, de faible gabarit (largeur : 0,5 à 2 m ; profondeur : 0,2 à 0,6 m), sont orientés du nord vers le sud, conformément à la pente générale du terrain. Ils convergent vers une zone d'accumulation centrale située dans la partie basse du site, avant d'être évacués vers le lac de Tengréla ;

(iii) Zone d'accumulation et point d'exutoire : La convergence des eaux de ruissellement vers la zone d'accumulation centrale constitue le point hydrologique le plus sensible du site. Cette

zone, identifiée sur le terrain par la présence de dépôts de sédiments fins et de végétation hygrophile temporaire, présente une superficie d'environ 2 à 3 ha. Les eaux accumulées sont ensuite drainées vers le lac de Tengréla via un chenal naturel d'environ 2,5 km de longueur, orienté plein nord.

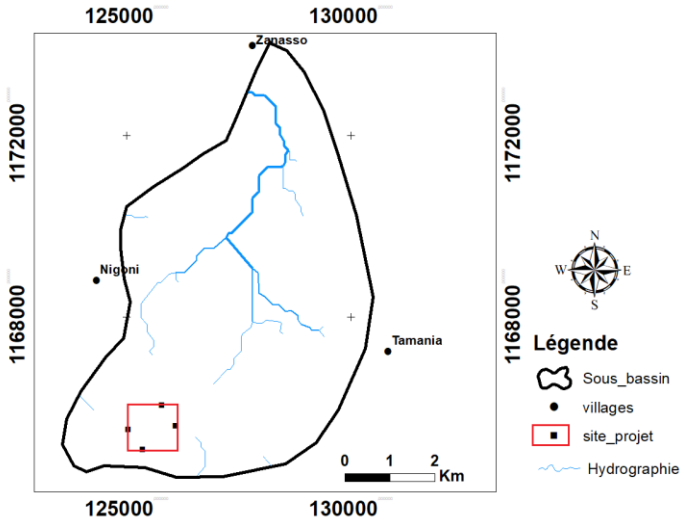

Figure 4. Réseau hydrographique du site de Nigouni

MATÉRIEL ET MÉTHODES: -

Matériel et données: -

Pour atteindre les objectifs de cette étude, la collecte des données terrain a été possible avec : (i) une sonde piézométrique pour la mesure du niveau piézométrique des puits de la zone d'étude ; (ii) un décamètre pour la mesure des différentes distances ; (iii) un appareil photo pour les prises de vue. En ce qui concerne le traitement des données cartographiques, ils'est fait avec le logiciel ArcGIS 10.4. Les données utilisées dans cette étude comprennent la pluviométrie, les levées topographiques, les cartes géologiques, les images satellitaires et les niveaux piézométriques. Les données pluviométriques correspondent aux séries mensuelles enregistrées sur la période 2011–2025 aux stations de Tengréla, Toumoukoro et Kanakono et fournies par la SODEXAM [11]. Les données topographiques sont issues du Modèle Numérique de Terrain SRTM de résolution spatiale de 30 m utilisé pour : (i) caractériser le relief ; (ii) extraire le réseau hydrographique ; (iii) délimiter le sous-bassin versant. Les informations géologiques proviennent de la carte géologique de la Côte d'Ivoire au 1/500 000 [14]. L'occupation du sol a été caractérisée à partir d'images satellitaires Sentinel-2 complétées par les enquêtes de terrain. Les données hydrogéologiques regroupent enfin les résultats des sondages et des essais *in-situ* réalisés par le laboratoire LABOGEM [15].

Cartographie des risques d'inondation: -

La cartographie du risque d'inondation a reposé sur une analyse multicritère sous SIG [16,17]. Trois couches thématiques ont été mobilisées : la densité de drainage dérivée du MNT, la pente extraite du MNT SRTM et l'occupation du sol issue de la classification supervisée des images Sentinel-2. Ces couches ont été combinées de manière pondérée afin d'élaborer successivement une carte d'aléa, représentant la probabilité d'occurrence d'une inondation, une carte de vulnérabilité, traduisant la sensibilité des éléments exposés, puis une carte de risque d'inondation obtenue comme produit de l'aléa et de la vulnérabilité.

VIEW IN IJAR

Estimation des débits de crue: -

Les débits de crue ont été estimés à l'aide de la méthode rationnelle [18], largement utilisée en Afrique de l'Ouest pour les petits bassins versants. Le débit de pointe Qp a été calculé selon l'expression :

$$Qp = (C \times i \times A) / 360$$

où Qp est le débit de pointe (m^3/s), C le coefficient de ruissellement (sans dimension), i l'intensité de la pluie de projet (mm/h) pour une durée égale au temps de concentration et A la superficie du bassin versant (km^2).

Investigations hydrogéologiques: -

Les investigations hydrogéologiques ont combiné des observations directes du proche sous-sol et une analyse de la fracturation. Elles ont compris des sondages à la tarière manuelle jusqu'à 4 m de profondeur, dix sondages avec essais pressiométriques (SP1 à SP10) jusqu'à 12 m, ainsi qu'une analyse de la fracturation des massifs rocheux par photo-interprétation et levés de terrain.

RÉSULTATS ET DISCUSSION: -

Zones à risque d'inondation: -

L'analyse des cartes thématiques (densité de drainage, pente, occupation du sol) combinées par SIG révèle que le site de Nigouni présente une pente générale orientée nord–sud, avec un écoulement des eaux de ruissellement dans cette direction. L'absence d'un cours d'eau pérenne à proximité immédiate du site indique que les inondations potentielles seraient exclusivement liées aux eaux de ruissellement pluvial. La carte des risques d'inondation (Figures *5* à *10*) montre que le site appartient à une zone de risque faible à moyen, avec une zone d'accumulation ponctuelle des eaux de surface avant leur évacuation naturelle vers le lac de Tengréla. Les zones à risque modéré sont concentrées dans les parties basses du site où la pente est la plus faible et la densité de drainage la plus élevée. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Koné et al. [17] qui, dans leur étude de la cartographie des zones inondables dans le Nord de la Côte d'Ivoire, ont montré que les zones à relief peu marqué sous climat soudanien présentent des risques d'inondation modérés liés principalement au ruissellement diffus plutôt qu'aux débordements de cours d'eau. De même, Bamba et al. [7] ont démontré que la présence d'infrastructures hydrauliques comme les barrages (retenues d'eau) jouait un rôle régulateur important dans la gestion des eaux de surface en réduisant significativement les risques d'inondation en aval. La présence du lac de Tengréla, qui collecte les eaux de ruissellement drainées depuis le site de Nigouni, constitue donc un facteur atténuant majeur du risque d'inondation. Par ailleurs, Diallo et al. [16] confirment que l'approche multicritère par SIG, telle qu'utilisée dans la présente étude, constitue un outil fiable pour l'évaluation rapide des risques d'inondation en zones rurales d'Afrique subsaharienne, avec une précision satisfaisante pour les études de faisabilité de projets d'infrastructure.

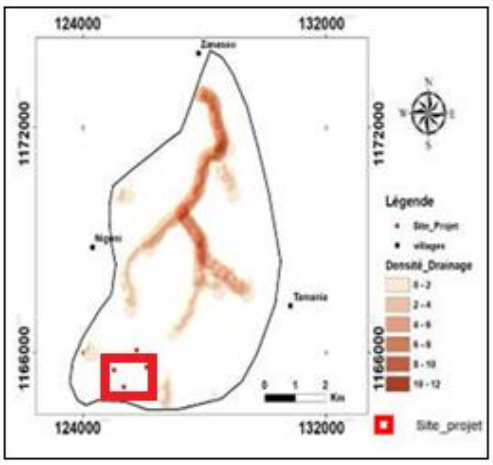

Figure 5. Carte de densité de drainage

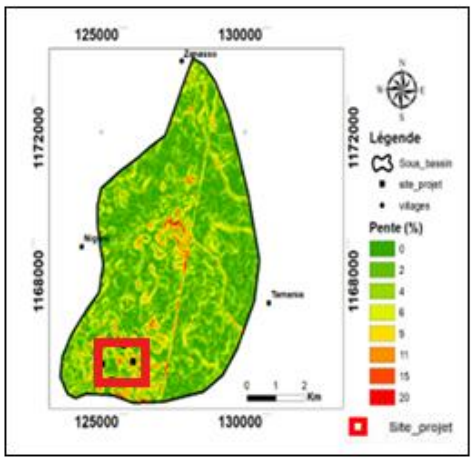

Figure 6. Carte des pentes

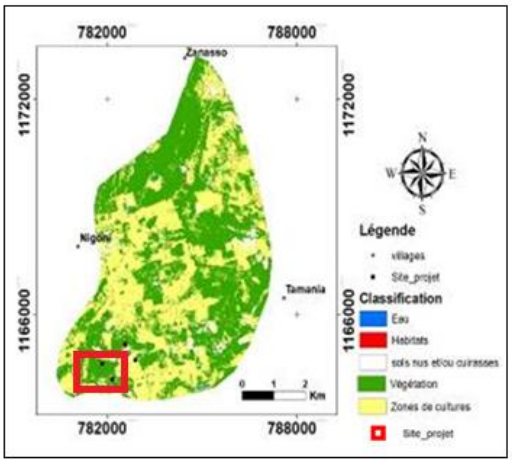

Figure 7. Carte d'occupation du sol

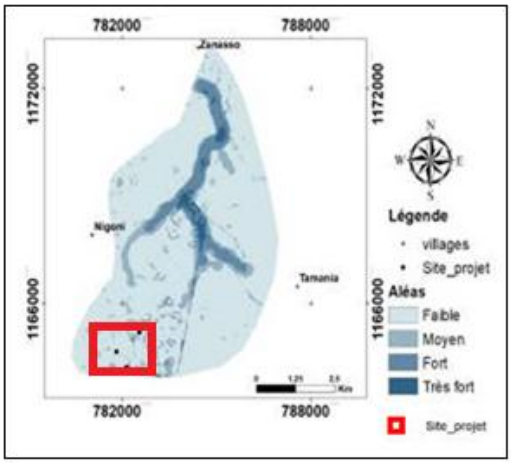

Figure 8. Carte d'aléa

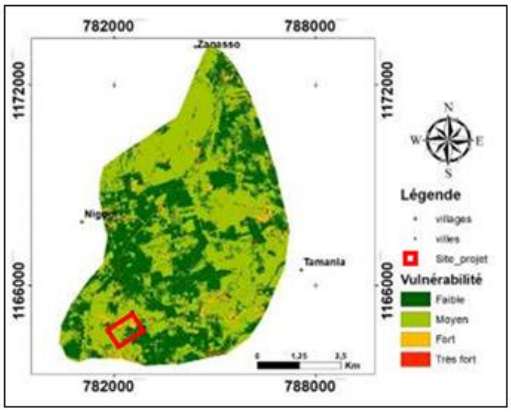

Figure 9. Carte du niveau de vulnérabilité

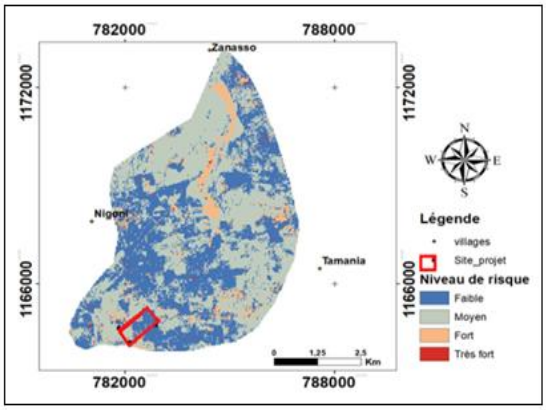

Figure 10. Carte des zones à risque d'inondation

UNDER PEER REVIEW IN

Variabilité pluviométrique et implications pour le risque hydrologique:-

L'analyse des données pluviométriques de Tengréla sur la période 2011–2025 met en évidence une forte variabilité interannuelle (coefficient de variation de 18,7 %), avec des totaux annuels variant de 1115,1 mm à 1942,8 mm. Le rapport entre les années les plus humides et les plus sèches est proche de 1,74, témoignant d'une irrégularité climatique significative. Les mois de juillet à septembre concentrent en moyenne 55 % des précipitations annuelles, avec des événements extrêmes pouvant dépasser 620 mm en un seul mois (août 2019 : 623,7 mm). Les mois de décembre, janvier et février sont quasiment secs, avec des précipitations nulles ou inférieures à 45 mm.Cette variabilité pluviométrique est caractéristique des régimes soudaniens d'Afrique de l'Ouest, documentés par Mahé et al. [8] qui signalent une augmentation des épisodes extrêmes en relation avec les modifications de la circulation atmosphérique de grande échelle. Kouassi et al. [3] ont par ailleurs montré, pour les bassins versants du Nord de la Côte d'Ivoire, une tendance à la concentration des pluies sur un nombre restreint d'événements intenses, ce qui accroît les risques de ruissellement et de crue-éclair. Les valeurs extrêmes observées (août 2019 : 623,7 mm) dépassent largement les seuils d'alerte généralement retenus pour la conception hydraulique des ouvrages de drainage [18], ce qui justifie la prise en compte de périodes de retour élevées (50 à 100 ans) dans le dimensionnement des systèmes de drainage du site solaire. Ces données confortent la nécessité d'un réseau de drainage efficace autour des installations photovoltaïques, comme le recommandent également Yao et al. [6] pour les sites solaires en zones tropicales humides.

Caractéristiques géologique et hydrogéologique: -

Les investigations de terrain révèlent que les formations géologiques du site sont essentiellement composées de granites éburnéens d'âge Protérozoïque inférieur, présentant un profil d'altération bien développé. De haut en bas, on distingue : (i) un sol humifère (0,0–0,5 m) ; (ii) un graveleux latéritique et/ou sable argileux (0,5–3,0 m) ; (iii) des argiles d'altération latéritique rousses sur toute la profondeur testée jusqu'à 12 m. Les essais pressiométriques (SP1 à SP10) confirment la présence d'argiles d'altération continues jusqu'à 12 m de profondeur, avec des résistances mécaniques variables. Sur le plan hydrogéologique, les formations granitiques massives présentent des conductivités hydrauliques très faibles ($< 10^{-7}$ m/s), les rendant de très mauvais aquifères. Cependant, les fractures et fissures des massifs rocheux sous-jacents constituent des aquifères de fissures potentiellement exploitables, selon les observations de terrain.Ces résultats s'inscrivent dans le cadre général de l'hydrogéologie des socles cristallins en Afrique de l'Ouest, largement documenté par Kouamé et al. [9]. Ces auteurs ont démontré que les conductivités hydrauliques des granites éburnéens non altérés sont effectivement très faibles (10^{-10} à 10^{-8} m/s), mais que les zones de fracturation et d'altération peuvent atteindre des conductivités de 10^{-6} à 10^{-4} m/s, offrant des débits d'exploitation de forages de 1 à 10 m³/h. Yao et al. [6] précisent que les aquifères de fissures dans les bassins versants du Nord de la Côte d'Ivoire présentent des niveaux statiques généralement compris entre 10 et 40 m de profondeur, avec des variations saisonnières importantes sous l'influence de la recharge pluviale. Dans le cadre du projet solaire de Nigouni, l'exploitation des ressources en eau souterraine par forage dans les zones fracturées sera techniquement réalisable, mais nécessitera une prospection géophysique complémentaire (électromagnétisme, résistivité électrique) pour localiser précisément les fractures productives, conformément aux recommandations de Kouamé et al. [9]. Par ailleurs, Yacé [13] souligne que dans les formations granitiques de Côte d'Ivoire, la recharge des aquifères de fissures est étroitement liée à l'épaisseur des altérites sus-jacentes, qui jouent le rôle de réservoir tampon. Les 2,30 à 3,00 m de graveleux latéritique identifiés sur le site de Nigouni constituent ainsi un horizon de recharge favorable, même si son épaisseur reste modeste.

Implications pour la conception du projet solaire: -

La synthèse des investigations hydrologiques et hydrogéologiques indique que : (i) le site de Nigouni présente un risque d'inondation faible à moyen, avec des zones d'accumulation temporaire d'eaux de ruissellement évacuées naturellement vers le lac de Tengréla (Figure *11*); (ii) les pluies extrêmes (période de retour 100 ans) peuvent générer des événements pluviométriques supérieurs à 120 mm/24h, justifiant

un dimensionnement adapté des ouvrages de drainage ; (iii) les ressources en eau souterraine sont exploitables dans les zones fracturées, mais leur débit unitaire reste modeste et nécessitera plusieurs forages pour couvrir les besoins du chantier et de l'exploitation de la centrale solaire. Ces résultats ont des implications directes sur la conception et l'exploitation de la centrale solaire. Concernant le risque hydrologique, Tigabu et al. [19] rappellent que les centrales solaires au sol sont particulièrement vulnérables à l'érosion et à l'accumulation de sédiments lors des événements pluvieux intenses, ce qui peut réduire l'efficacité des panneaux et endommager les structures de support. L'installation de fossés de ceinture et de bassins de rétention périphériques est donc fortement recommandée, comme préconisé par l'IRENA [20] pour les projets solaires en zones tropicales. Concernant l'approvisionnement en eau, les besoins estimés pour la construction d'une centrale de 30 MWc sont généralement de l'ordre de 500 à 2000 m³/jour [20], ce qui, au regard des débits de forages attendus dans les zones fracturées (1 à 10 m³/h), nécessitera un réseau de plusieurs forages et potentiellement un système de stockage complémentaire. Par ailleurs, Kouassi et al. [3] insistent sur l'importance de la gestion intégrée des ressources en eau dans les projets d'infrastructure au Nord de la Côte d'Ivoire, compte tenu des tensions potentielles avec les usages agricoles locaux en saison sèche.

Figure 11. Présence de quelques rigoles sur le site de Nigouni

Débits et niveaux de crue dans la zone du projet:-

L'estimation des débits de crue sur le sous-bassin versant de Nigouni a été réalisée par la méthode rationnelle appliquée aux données pluviométriques de la période 2011–2025. Le sous-bassin versant hydrologique associé au site de Nigouni présente les caractéristiques morphométriques suivantes :

- ✓ Superficie (A) : environ 12,5 km² ;
- ✓ Pente moyenne : 1,2 % (relief peu accentué) ;
- ✓ Temps de concentration (Tc) : estimé à 45 minutes par la formule de Kirpich ;
- ✓ Coefficient de ruissellement (C) : 0,35 à 0,55 selon le type d'occupation du sol (sols nus à végétation arbustive sur substrat argileux latéritique).

Les résultats de l'estimation des débits de crue pour différentes périodes de retour sont présentés dans le Tableau *1*.

Tableau 1. Débits de crue estimés pour le sous-bassin versant de Nigouni selon différentes périodes de retour

Période de retour (ans)	**Pluie de projet (mm/24h)**	**Intensité (mm/h)**	**Débit de pointe Qp (m³/s)**	**Hauteur d'eauestimée (m)**
10	78,5	19,6	1,85	0,45

20	92,3	23,1	2,18	0,55
50	110,7	27,7	2,61	0,68
100	124,5	31,1	2,93	0,78

L'analyse des niveaux de crue associés montre que les hauteurs d'eau maximales dans les rigoles naturelles du site ne dépassent pas 0,78 m pour une période de retour centennale. Ces valeurs restent compatibles avec le gabarit naturel des chenaux de drainage identifiés sur le site. Aucun niveau de crue menaçant directement les infrastructures projetées n'a été identifié, sous réserve que les ouvrages de drainage soient correctement dimensionnés.

Les débits de crue estimés pour le site de Nigouni (Qp max = 2,93 m³/s pour T = 100 ans) sont cohérents avec les valeurs régionales pour des bassins versants de superficie et de pente comparables dans le Nord de la Côte d'Ivoire. Certains auteurs ont obtenu des débits spécifiques de crue centennale compris entre 0,18 et 0,28 m³/s/km² pour les bassins versants de socle cristallin en zone soudanienne, ce qui correspond, pour une superficie de 12,5 km², à des débits de pointe de 2,25 à 3,50 m³/s, englobant ainsi l'estimation de 2,93 m³/s.La méthode rationnelle utilisée dans cette étude est reconnue comme appropriée pour les petits bassins versants ruraux (A < 50 km²) en Afrique de l'Ouest [7,18]. Toutefois, Mahé et al. [8] soulignent que cette méthode peut sous-estimer les débits de pointe lors d'événements extrêmes exceptionnels, notamment dans les contextes où la saturation des sols argileux est rapide, comme c'est le cas dans les sols latéritiques du Nord de la Côte d'Ivoire. Une marge de sécurité de 20 à 30 % est donc recommandée lors du dimensionnement final des ouvrages hydrauliques [18]. Par ailleurs, la hauteur de crue centennale estimée à 0,78 m conforte les recommandations de l'IRENA [20] qui préconise une hauteur libre minimale de 0,5 à 1,0 m entre le niveau de crue de projet et le bas des structures photovoltaïques, afin de protéger les équipements électriques des risques d'immersion.

Identification et quantification des sources d'eau pour le projet: -

L'inventaire des ressources en eau disponibles dans la zone du projet a permis d'identifier les sources potentielles suivantes :

(i) Eaux de surface : Le lac de Tengréla, situé à environ 8 km au nord du site, constitue la principale ressource en eau de surface de la zone (Figures *12* et *13*). Sa capacité de stockage est estimée à plusieurs millions de m³. Cependant, son utilisation pour le projet solaire nécessiterait la mise en place d'une infrastructure d'adduction sur environ 8 km, ce qui représente un coût significatif. Des mares temporaires existent également sur le site, mais elles sont non pérennes et tarissent en saison sèche.

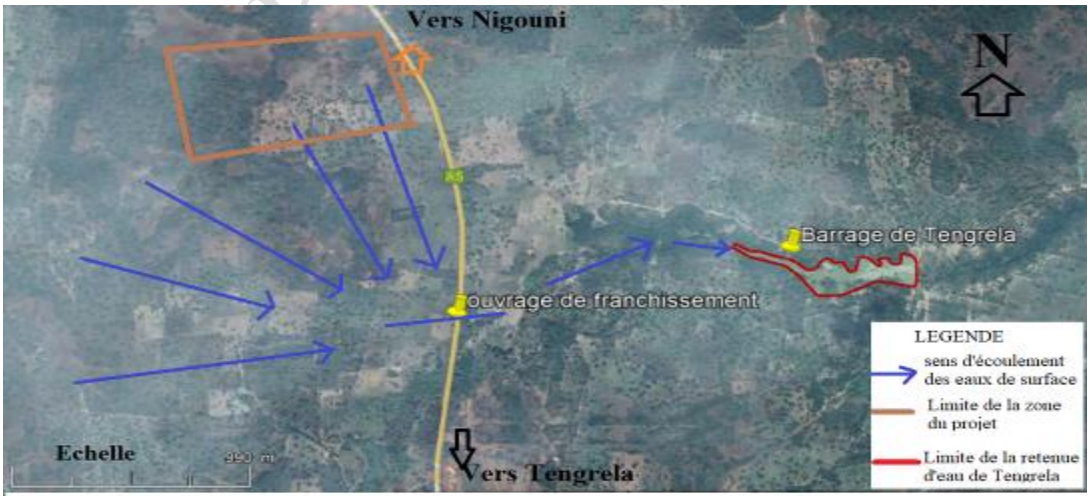

Figure 12. Aperçu du lac de Tengréla et sens d'écoulement des eaux de ruissellement

Figure 13. Aperçu lac de Tengréla

(ii) Eaux souterraines : L'analyse des données hydrogéologiques et des résultats des sondages révèle la présence de deux types d'aquifères (Figure *14*): (i) Aquifère des altérites : couche d'arènes et d'argiles altérées de 2,30 à 3,00 m d'épaisseur, à faible productivité (débit spécifique < 0,5 m³/h/m);

(iii) Aquifère de fissures : zones fracturées dans les granites sous-jacents, potentiellement productives avec des débits estimés entre 1 et 8 m³/h selon les données régionales comparables [9].L'analyse de la photo-interprétation et des levés de terrain a permis d'identifier trois axes de fracturation principaux (directions N20°E, N45°E et N80°E) susceptibles de concentrer les flux souterrains. Les intersections de ces linéaments constitueraient les zones prioritaires pour l'implantation des forages.

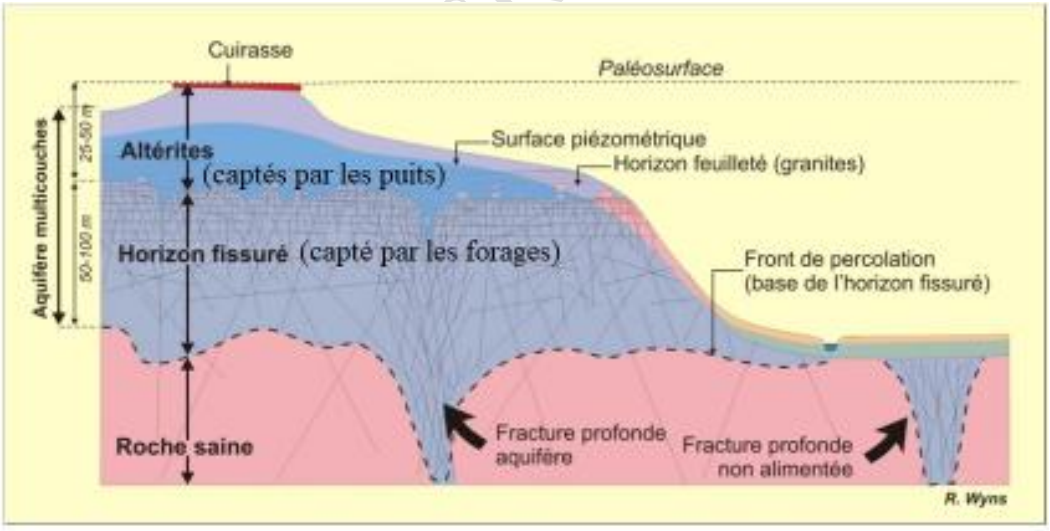

Figure 14. Modèle conceptuel d'aquifère de socle (Wyns et al. [21], modifié)

(iv) Bilan des besoins en eau du projet de Nigouni: Les besoins en eau estimés pour la phase de construction sont de l'ordre de 200 à 800 m³/jour (compactage, béton, nettoyage) et de 50 à 150 m³/jour pour la phase d'exploitation (nettoyage des panneaux, usages domestiques du personnel). Un réseau de 3 à 5 forages implantés sur les axes de fracturation identifiés permettrait de couvrir

ces besoins, sous réserve de leur confirmation par une prospection géophysique préalable.La dualité de l'aquifère identifiée à Nigouni (altérites + fissures) est caractéristique des formations du socle cristallin éburnéen, décrite de manière exhaustivepour l'ensemble de la Côte d'Ivoire. On distingue généralement l'aquifère supérieur des altérites, à nappe libre et à recharge directe par les pluies, de l'aquifère inférieur des fissures, semi-captif et à productivité plus élevée mais spatialement discontinue. Kouamé et al. [9] ont montré que l'utilisation couplée de la télédétection et de la géophysique électrique (traînés de résistivité, sondages électriques verticaux) permettait d'identifier les zones fracturées avec un taux de succès de forage atteignant 85 % dans des contextes géologiques similaires au nord de la Côte d'Ivoire.Concernant les besoins en eau des centrales solaires, l'IRENA [20] précise que les centrales photovoltaïques au sol consomment en moyenne 1 à 3 litres/kWh pour le nettoyage des panneaux en zones arides et semi-arides, ce qui, pour une centrale de 30 MWc produisant environ 45 GWh/an, représente une consommation annuelle de 45 000 à 135 000 m³. Cette estimation est compatible avec les capacités productives des aquifères de fissures identifiés sur le site (1 à 8 m³/h par forage), à condition de dimensionner un réseau suffisant de points d'eau et d'envisager un système de stockage intersaisonnier. Yao et al. [6] recommandent d'ailleurs, pour les projets solaires du Nord de la Côte d'Ivoire, la création de retenues collinaires complémentaires permettant de stocker les eaux de ruissellement excédentaires de saison des pluies pour un usage en saison sèche, stratégie qui s'avère particulièrement pertinente au regard de la forte variabilité saisonnière des précipitations observée à Nigouni.

Caractéristiques du sous-bassin versant hydrologique de Nigouni: -

La délimitation du sous-bassin versant associé au site de Nigouni a été réalisée à partir du MNT SRTM de 30 m de résolution, en utilisant les outils d'analyse spatiale du logiciel QGIS 3.22. Le sous-bassin versant ainsi délimité présente les caractéristiques morphométriques prsentées dans le Tableau *2*. L'indice de compacité de Gravelius (Kc = 1,46) indique un bassin de forme allongée, peu favorable à la formation de crues instantanées importantes. La densité de drainage (Dd = 1,84 km/km²) témoigne d'un réseau hydrographique modérément développé, cohérent avec les formations argileuses latéritiques à faible perméabilité observées sur le site. Le coefficient de ruissellement moyen de 0,42 reflète la dominance des sols peu perméables (argiles latéritiques) et la couverture végétale clairsemée caractéristique des paysages soudaniens dégradés. L'indice de Gravelius obtenu (Kc = 1,46) est représentatif des bassins versants de socle cristallin en Afrique de l'Ouest, généralement allongés et caractérisés par des réponses hydrologiques modérées aux épisodes pluvieux. Bamba et al. [7] ont obtenu des valeurs de Kc comparables (1,35 à 1,62) pour les bassins versants du Bafing (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire), avec les mêmes implications sur la modération des débits de pointe. La densité de drainage (Dd = 1,84 km/km²) est en accord avec les valeurs régionales compilées par Mahé et al. [8] pour les bassins versants soudaniens à dominante granitique (Dd typiquement comprise entre 1,5 et 2,5 km/km²). Des valeurs de densité de drainage plus élevées indiqueraient une érosion plus active et des sols moins perméables, ce qui n'est pas le cas ici. Enfin, le coefficient de ruissellement de 0,42 est cohérent avec les valeurs proposées par Sogreah [18] pour des sols latéritiques à couverture végétale herbacée et arbustive en zone soudanienne (C = 0,35 à 0,55), confirmant la cohérence de la démarche méthodologique adoptée.

Tableau 2. Caractéristiques morphométriques du sous-bassin versant de Nigouni

n°	Paramètre	Valeur	Unité
1	Superficie (A)	12,5	km²
2	Périmètre (P)	18,3	km
3	Longueur du talweg principal (L)	5,8	km
4	Dénivelé (D)	20	m

5	Pentemoyenne	1,2	%
6	Indice de compacité de Gravelius (Kc)	1,46	-
7	Temps de concentration (Tc)	45	min
8	Densité de drainage (Dd)	1,84	km/km²
9	Coefficient de ruissellement moyen (C)	0,42	-

CONCLUSION: -

La présente étude hydrologique et hydrogéologique menée sur le site de Nigouni (département de Tengréla, Nord de la Côte d'Ivoire) dans le cadre du projet de la réalisation de centrale solaire photovoltaïque de 30 MWc de CI-ENERGIES a permis de dégager les conclusions suivantes : (i) Sur le plan climatologique, le site est soumis à un climat soudanien avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1418,28 mm, une forte variabilité interannuelle (CV = 18,7 %) et une concentration des pluies sur la période juillet–septembre. Des événements extrêmes dépassant 620 mm/mois ont été enregistrés, justifiant un dimensionnement hydraulique conservateur ; (ii) Sur le plan des risques d'inondation, le site de Nigouni présente un risque faible à moyen. Les eaux de ruissellement, guidées par la pente nord–sud du relief, sont naturellement évacuées vers le lac de Tengréla. Aucune zone de stagnation prolongée susceptible d'inonder les infrastructures du projet n'a été identifiée à Nigouni. Néanmoins, des ouvrages de drainage périphériques dimensionnés pour une période de retour de 100 ans restent indispensables ; (iii) Sur le plan des débits decrue, le débit de pointe centennal estimé pour le sous-bassin versant de Nigouni est de 2,93 m³/s, correspondant à une hauteur d'eau maximale de 0,78 m dans les chenaux naturels. Ces valeurs sont compatibles avec l'implantation du projet sous réserve d'un dimensionnement adéquat des ouvrages hydrauliques, incluant une marge de sécurité de 20 à 30 % ; (iv) Sur le plan hydrogéologique, les formations granitiques éburnéennes présentent une faible conductivité hydraulique, mais les zones de fracturation sous-jacentes constituent des aquifères de fissures exploitables. L'implantation de 3 à 5 forages sur les axes de fracturation N20°E, N45°E et N80°E identifiés permettrait de couvrir les besoins en eau du projet (construction et exploitation), après confirmation par une prospection géophysique ; (v) Surle plan morphométrique, le sous-bassin versant de Nigouni (12,5 km², Kc = 1,46, Dd = 1,84 km/km²) présente des caractéristiques allongées peu favorables aux crues brutales, ce qui constitue un facteur atténuant supplémentaire du risque hydrologique pour le projet.Au plan pratique, les recommandations suivantes sont formulées à l'intention des maîtres d'ouvrage et des soumissionnaires :(i) Réaliser une prospection géophysique (résistivité électrique et/ou électromagnétisme) avant l'implantation des forages ; (ii) Dimensionner les fossés de ceinture et les bassins de rétention pour une période de retour de 100 ans avec une marge de sécurité de 25 % ; (iii) Envisager la création d'une retenue collinaire pour le stockage des eaux de ruissellement de saison des pluies destinées à l'usage en saison sèche ; (iv) Mettre en place un suivi hydrologique et piézométrique sur toute la durée du projet afin d'adapter la gestion des ressources en eau aux fluctuations climatiques interannuelles.Cette étude s'inscrit dans la dynamique nationale de développement des énergies renouvelables impulsée par la Politique Énergétique Nationale de la Côte d'Ivoire, et contribue à la constitution d'une base de données hydrologiques et hydrogéologiques dans une région encore insuffisamment documentée du pays.

REMERCIEMENTS: -

Les auteurs remercient CI-ENERGIES pour le cadre du projet ayant permis la réalisation de cette étude, la SODEXAM pour les données pluviométriques utilisées et le laboratoire LABOGEM pour les données issues des sondages et essais *in-situ* réalisés sur le site de Nigouni.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS: -

M. YAO Blaise Koffi a contribué à la conception de l’étude, à la définition de l’approche méthodologique, à la supervision des travaux, à l’interprétation des résultats et à la révision du manuscrit.

M. Keiba NoelKeumean a contribué à l'acquisition des données, aux investigations de terrain, à leur traitement et à l'analyse des résultats. Mlle Ferelaha SORO a contribué au traitement et à l'analyse des données, aux analyses cartographiques et hydrologiques, à l'interprétation des résultats ainsi qu'à la rédaction du manuscrit. M. Métangbo DIOMANDE a contribué aux investigations de terrain, à l'interprétation des données géologiques et hydrogéologiques et à la révision du manuscrit. Tous les auteurs ont lu et approuvé la version finale du manuscrit.

CONFLITS D'INTÉRÊTS: -

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts en lien avec ce travail.

RÉFÉRENCES: -

1. INS, Résultats du Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) 2021. Institut National de la Statistique, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2022.
2. CI-ENERGIES, Rapport annuel de la Compagnie Ivoirienne d'Électricité. Abidjan, Côte d'Ivoire, 2020.
3. A. M. Kouassi, A. B. Yao, Y. M. Kouamé, Y. B. Koffi, and J. E. Paturel, "Analyse des impacts de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins versants du Nord de la Côte d'Ivoire," Larhyss Journal, no. 33, pp. 7–28, 2018.
4. Ministère des Mines, du Pétrole et de l'Énergie, Politique Énergétique Nationale de la Côte d'Ivoire : Horizon 2030. République de Côte d'Ivoire, Abidjan, 2021.
5. Gouvernement de Côte d'Ivoire, Plan National de Développement 2021–2025. Abidjan: Ministère du Plan et du Développement, 2021.
6. K. B. Yao, B. Kone, A. Diallo, and G. Soro, "Ressources en eau et développement des énergies solaires dans le Nord de la Côte d'Ivoire : enjeux hydrologiques et hydrogéologiques," Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies, vol. 35, pp. 214–232, 2020.
7. O. Bamba, B. Kamagate, A. Dao, and I. Savane, "Caractérisation hydrologique des bassins versants du nord-ouest de la Côte d'Ivoire : cas du bassin du Bafing," Revue des Sciences de l'Eau, vol. 28, no. 2, pp. 115–132, 2015.
8. G. Mahe, J. E. Paturel, E. Servat, D. Conway, and A. Dezetter, "The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso," Journal of Hydrology, vol. 300, nos. 1–4, pp. 33–43, 2005.
9. K. J. Kouamé, A. M. Kouassi, J. P. Jourda, and J. Biémi, "Contribution des méthodes géophysiques et de la télédétection à l'identification et à la cartographie des aquifères de fissures en zone de socle cristallin : cas du département de Korhogo (Nord Côte d'Ivoire)," International Journal of Innovation and AppliedStudies, vol. 3, no. 4, pp. 1030–1044, 2013.
10. K. E. Kassin, D. Dao, A. K. Blaison, and P. Giresse, "Caractérisation du climat du Nord de la Côte d'Ivoire," Agronomie Africaine, vol. 20, no. 3, pp. 301–315, 2008.
11. SODEXAM, Données pluviométriques mensuelles des stations de Tengréla, Toumoukoro et Kanakono (2011–2025). Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2021.
12. A. Papon, Géologie et minéralogie du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Mémoire du BRGM, no. 80, Orléans, France, 1973.
13. I. Yace, Initiation à la géologie : l'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest. CEDA/NEI, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2002.
14. BRGM, Carte géologique de la Côte d'Ivoire au 1/500 000. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France, 1970.

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

15. LABOGEM, Rapport de sondages géotechniques sur le site de Nigouni (Tengréla). Rapport interne, Abidjan, Côte d'Ivoire, 2022.

16. A. Diallo, B. Kone, and K. B. Yao, "Cartographie des zones inondables par analyse multicritère SIG en Afrique subsaharienne : cas du Nord de la Côte d'Ivoire," Larhyss Journal, vol. 45, pp. 89–108, 2021.

17. B. Koné, A. Diallo, and K. Coulibaly, "Mapping flood-prone areas in northern Côte d'Ivoire using GIS-based multi-criteria analysis," Journal of Hydrology: Regional Studies, vol. 26, pp. 100–115, 2019.

18. SOGREAH, Méthodes de calcul des débits de crue et de ruissellement en Afrique de l'Ouest. Rapport technique, Grenoble, France, 1978.

19. T. B. Tigabu, P. D. Wagner, G. Hörmann, and N. Fohrer, "Hydrological analysis of a solar photovoltaic plant site: implications for runoff and erosion risk," Renewable Energy, vol. 159, pp. 1037–1048, 2020.

20. IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2020. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

21. R. Wyns, F. Quesnel, R. Simon-Coinçon, F. Guillocheau, and F. Lacquement, "Major weathering in France related to lithospheric deformation," Géologie de la France, nos. 2–3, pp. 79–87, 2004.

UNDER PEER REVIEW IN IJAR