

Analyse multicritère couplée au radiocarbone en contexte de variabilité climatique pour l'identification des zones potentielles de recharge des aquifères fracturés du Sud-Est de la région de la Nawa (Côte d'Ivoire)

Identification of hard-rock aquifers recharge areas by coupled multicriteria analysis and radiocarbon data in the climate variability context of the Nawa region (South-East Côte d'Ivoire)

Aimé Koudou^{1*}, Bernard Adiaffi², Tchewala Soro², Brou Richmond Konan², N'da Marie-Rebeca Yao¹, Kolotioloma Alama Coulibaly³

¹ Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE), Département des Sciences de la Terre, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, Côte d'Ivoire. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2345-1539>, <http://orcid.org/0000-0001-6854-3886>

² Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR STRM), Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB) de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7252-7528>, <http://orcid.org/0000-0001-8985-056X>, <http://orcid.org/0000-0001-8381-0735>

³ Direction de la Météorologie Nationale, Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM), Abidjan, Côte d'Ivoire. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2694-3563>

* Auteur correspondant: kdaime@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La présente étude a pour objectif d'identifier et d'évaluer les zones potentielles de recharge des aquifères du Sud-Est de la Nawa par le couplage de l'analyse multicritère au radiocarbone en contexte de variabilité climatique. Elle est basée sur la combinaison d'informations spatiales relatives à différents paramètres (climat, topographie, sol, végétation, géologie, etc.) susceptibles d'influencer diversement la recharge. D'abord, la quantité d'eau infiltrée pour recharger les aquifères est estimée à partir du bilan hydrologique après caractérisation de la variabilité climatique à Soubré. Ensuite, les zones de recharge des aquifères fracturés sont cartographiées par analyse multicritère. Enfin, ces zones sont validées à partir des activités en carbone 14. De 1951 à 2017, le déficit pluviométrique de part et d'autre de la rupture de 1970 est de 14%. Deux périodes humides (1951-1970 et 1993-2017), intercalée d'une période sèche (1971-1992) caractérisent la zone d'étude. La lame d'eau estimée pour recharger les aquifères est de 243 mm de 1951 à 2017. La modélisation des paramètres climatique, topographique, pédologique, géologique, de la végétation, a permis d'élaborer des cartes thématiques bien structurées. Le croisement de celles-ci dans un SIG a facilité la conception de la carte des zones de recharge du Sud-Est de la Nawa. Cette carte met en évidence quatre zones d'aptitude à la recharge, validées par des activités en carbone 14. Les zones de recharge très forte (40%) et forte (35%) se localisent au Sud-Est et s'étendent jusqu'au Sud-Ouest de la zone d'étude. Les

Recibido el 20 de abril de 2022; Aceptado el 6 de septiembre de 2022; Publicado online el 26 de Octubre de 2022

Citation / Cómo citar este artículo: Koudou, A. et al. (2022) Analyse multicritère couplée au radiocarbone en contexte de variabilité climatique pour l'identification des zones potentielles de recharge des aquifères fracturés du Sud-Est de la région de la Nawa (Côte d'Ivoire). *Estudios Geológicos* 78(2): e146. <https://doi.org/10.3989/egeol.44671.616>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

zones de recharge moyenne (11%) s'identifient dans le lit du Sassandra. Les zones de recharge faible (14%) occupent majoritairement l'Ouest et le Nord. La carte des zones de recharge est un outil d'aide à la décision qui oriente les décideurs dans l'identification des secteurs susceptibles de faire l'objet d'implantation de forages à forte productivité, et aussi susceptibles d'être vulnérables vis-à-vis des contaminants.

Mots clefs: Recharge; Analyse multicritère; Radiocarbone; Variabilité climatique; Télédétection; SIG; Région de la Nawa; Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The aim of this study is to identify and evaluate potential recharge areas for aquifers in South-East Nawa (Côte d'Ivoire) by coupling multicriteria analysis with radiocarbon in the context of climate variability. It is based on the combination of spatial information relating to different parameters (climate, topography, soil, vegetation, geology, etc.) that can influence recharge in different ways. First, the amount of infiltrated water to recharge the aquifers is estimated from the hydrological balance after characterising the climate variability in Soubré. Then, the recharge areas of fractured aquifers are mapped by multicriteria analysis. Finally, these areas are validated by carbon 14 activities. From 1951 to 2017, the rainfall deficit on either side of the 1970 rupture is 14%. Two wet periods (1951-1970 and 1993-2017) interspersed with a dry period (1971-1992) characterize the study area. The estimated water level to recharge the aquifers is 243 mm from 1951 to 2017. The modelling of climatic, topographic, pedological, geological and vegetation parameters allowed the elaboration of well-structured thematic maps. The cross-referencing of these parameters in a GIS facilitated the design of the recharge area map of South-East Nawa. This map highlights four areas of rechargeability, validated by carbon 14 activities. The very strong (40%) and strong (35%) recharge areas are located in the South-East and extend to South-West of the study area. The medium recharge areas (11%) are identified in the Sassandra riverbed. The low recharge areas (14%) are found mainly in the West and North. The map of recharge areas is a decision-making tool that guides decision-makers in the identification of sectors likely to be the object of high-productivity boreholes, and also capable to be vulnerable to contaminants.

Keywords: Recharge; Multicriteria analysis; Radiocarbon; Climate variability; Remote sensing; GIS; Nawa Region; Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

Le recours à l'eau souterraine plus à l'abri des pollutions de tout genre et moins sujette aux aléas climatiques, est de plus en plus d'actualité à travers le monde. Cette eau résulte de la recharge pluviale diffuse et la recharge ciblée via l'infiltration d'eau de surface (cours d'eau, zones humides ou lacs). La recharge pluviale représente, dans un hydrosystème, la principale source d'alimentation des aquifères. La bonne gestion de la recharge, nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques de l'aquifère lui-même dans sa globalité, de celles du matériau qui le compose. Par ailleurs, la compréhension de tous les paramètres qui influencent les modalités du fonctionnement de l'aquifère et notamment le renouvellement de ses réserves comme le climat, la géométrie, le relief, etc., est essentielle.

La région de la Nawa, située au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, est la région par excellence de la « nouvelle boucle du cacao » en raison de son dynamisme agricole, surtout dans la culture du cacao

(Brou, 2005; Barima *et al.*, 2020). Cette région doit actuellement faire face à une augmentation démographique considérable (2,6% par an de 1998 à 2014 selon le RGPH, 2014) qui exerce des pressions sur les ressources en eau, spécifiquement souterraine, déjà fragilisées par le tarissement et le vieillissement des points d'eau (Yao, 2009). Cette problématique s'en trouve amplifiée par la sécheresse durement ressentie par le département de Soubré, chef-lieu de la région, pendant toute la décennie 1970, surtout dans sa deuxième moitié, mais aussi, au début et à la fin de la décennie 1980 (Fadika, 2012). Cette sécheresse a eu des conséquences néfastes sur les ressources naturelles en général, et plus spécifiquement sur les ressources en eau, notamment la disponibilité de l'eau. Il est donc plus qu'urgent de trouver des sites propices à l'implantation de nouveaux forages susceptibles d'être à l'abri de la pollution, et à même de fournir de l'eau en grande quantité et de bonne qualité à la population, dans un contexte de variabilité climatique. Une première approche est l'identification des zones de recharge de l'aquifère. La cartographie

des zones de recharge est d'intérêt en termes d'orientation des campagnes d'implantation de forages à forte productivité. Elle permet également d'identifier les zones préférentielles et vulnérables vis-à-vis des contaminants qui peuvent, de ce fait, migrer rapidement à travers la zone non saturée. La parfaite identification de ces zones peut faciliter la définition des périmètres de protection des captages d'eau potable (Huet, 2015).

Mis à part quelques études menées sur la géologie et la géométrie des aquifères dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire (Papon & Lemarchand, 1973; CEFIGRE, 1992; Yao, 2009), et quelques-unes spécifiques aux ressources en eaux souterraines (Ohou-Yao *et al.*, 2017; Adiaffi *et al.*, 2021), aucune étude dans la région n'a encore estimé la quantité d'eau qui arrive à la nappe et qui forme un ajout au réservoir d'eau souterraine. Par ailleurs, aucun travail de recherche n'a fait l'objet de cartographie des zones susceptibles de faire l'objet de recharge dans la région. Or en Côte d'Ivoire, des études de cartographie des zones de recharge ont été effectuées par Assoma *et al.* (2012) dans les aquifères côtiers du Sud-Est, Oularé *et al.* (2017) dans le bassin versant du N'zo à l'Ouest, Aké *et al.* (2018) à Bonoua au Sud-Est, et, Koudou *et al.* (2021) dans le département de Tanda au Nord-Est du pays. Il est donc plus que nécessaire d'identifier et d'évaluer les zones potentielles de recharge de la zone du Sud-Est de la Nawa. L'approche utilisée à cet effet, consiste donc à combiner les informations spatiales relatives à différents paramètres (liés au climat, à la topographie, au sol, à la végétation, à la géologie, etc.) qui favorisent diversement la recharge des aquifères. L'objectif principal de la présente étude est de proposer une méthodologie d'identification et d'évaluation des zones potentielles de recharge des aquifères du Sud-Est de la Nawa par le couplage de l'analyse multicritère à l'activité en radiocarbone en contexte de variabilité climatique. Il s'agit en premier lieu, d'estimer la quantité d'eau infiltrée pour recharger les aquifères à partir du bilan hydrologique après caractérisation de la variabilité climatique à Soubré. En second lieu, les zones de recharge des aquifères fracturés sont cartographiées par analyse multicritère et validées à partir des activités en carbone 14 disponibles dans la zone. Les techniques géospatiales (télé-détection et

SIG) couplées à la méthode géochimique basée sur des données de terrain telles que la pluviométrie et les activités en ^{14}C , sont incontournables à l'atteinte des objectifs de l'étude.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation de la zone d'étude

Située entre les longitudes $6^{\circ}13'$ et $6^{\circ}39'$ Ouest et les latitudes $5^{\circ}29'$ et $5^{\circ}50'$ Nord, la zone d'étude (Figure 1) est une portion du Sud-Est de la région de la Nawa, région située au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Cette région est limitée au Nord par les régions du Guémon et du Haut-Sassandra, au Sud par les régions du Gbôklè et de San-pédro, à l'Ouest par la région du Cavally et à l'Est par les régions du Gôh et du Lôh Djiboua. La zone d'étude s'étend sur une superficie de 9193 km^2 .

La Nawa est composée de quatre départements: Soubré (chef-lieu), Méagui, Guéyo, Buyo. Elle compte également six communes et dix sous-préfectures. La population de la région est estimée à 1 053 084 habitants dont 464 554 habitants pour le département de Soubré (RGPH, 2014). Cette population est composée d'autochtones (Bété, Bakwé, Kouzié et Godié), d'allochtones (Baoulé et Malinké) et d'allochtones (Burkinabè, Maliens et libanais). Plus de 70 % de la population vit en milieu rural. Les aptitudes culturelles des sols de la région sont propices tant aux cultures de rente (café, cacao, palmier à huile et hévéa), qu'à une gamme variée de cultures vivrières (riz, manioc, maïs, banane plantain, igname) et maraîchères généralement exploitées dans les bas-fonds (PEMED-CI, 2015). La Nawa est la principale région productrice de cacao de la Côte d'Ivoire fournissant plus de 40% ($500\,000 \text{ T}$) de la production nationale. L'agriculture est la principale source de revenu représentant 75% des activités économiques, et contribue à 94% des revenus (Tahoux, 1993 in Kouamé *et al.*, 2016). 93 % et 52,46% des paysans vivent respectivement du cacao et du café contre 31,2% pour les cultures vivrières (Kouadjo *et al.*, 2002 in Kouamé *et al.*, 2016).

La géologie de la zone d'étude (Figure 2), qui s'intègre à celle du domaine SASCA (Sassandra-Cavally), est constituée de formations archéennes (migmatites et gneiss de Grabo) et éburnéennes (granitoïdes

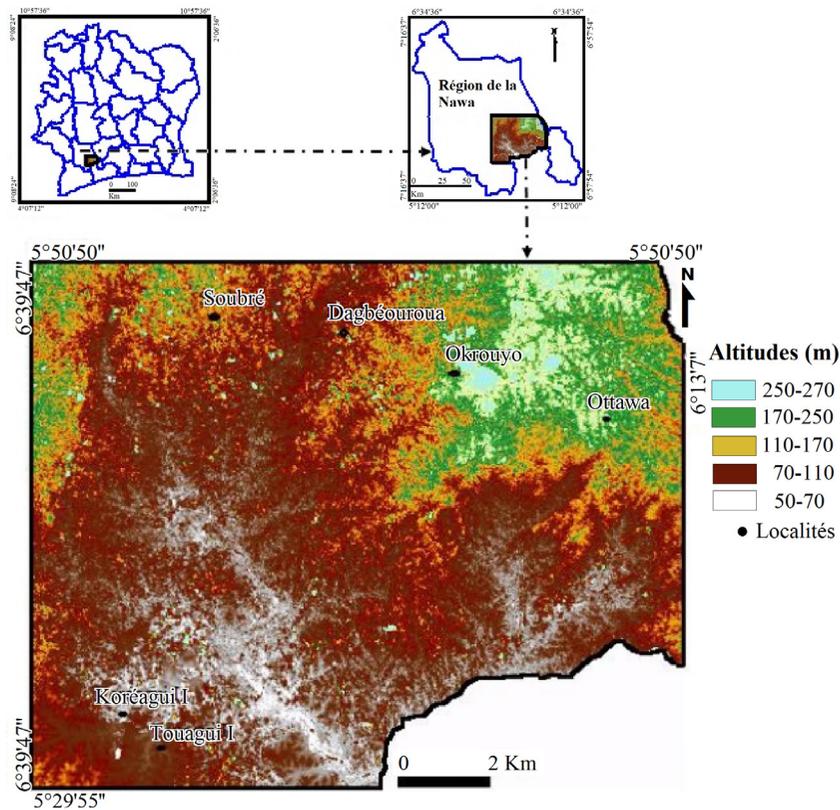


Figure 1.— Localisation de la zone d'étude.

ébournés concordants et syénites du mont Troquoi) (Papon & Lemarchand, 1973).

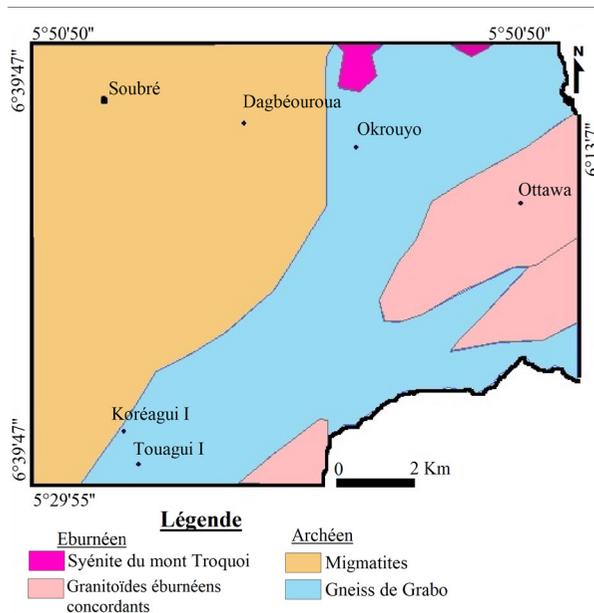


Figure 2.— Géologie du sud-est de la région de la Nawa tirée de Papon & Lemarchand (1973).

Les migmatites font partie de l'ensemble grani-to-gneissique cartographié par Bolgarsky (1950). Elles forment une auréole autour de la granodiorite d'anatexie et s'étend du Sud-Ouest (Kragui) jusqu'au-delà de la limite Nord-Est du département de Soubré. Les roches appartenant à ces formations sont des gneiss métamorphisés dans la catazone (niveau structural des gneiss inférieurs ou base du faciès amphibolite) et affectés par une anatexie différentielle.

Les gneiss de Grabo sont intrudés par les massifs de granites à deux micas ébournés rencontrés au Sud-Est (zone d'Okrouyo). Ses affleurements se présentent sous forme de bancs avec une alternance de lits phylliteux et de lits quartzeux.

Les granitoïdes ébournés concordants cartographiés sous le nom de granodiorite d'anatexie de type « rivière Bao », affleurent dans cette rivière non loin de la voie joignant Soubré à Okrouyo. Ce massif est entièrement pris dans les migmatites. Il se distingue de son encaissant par sa grande richesse en feldspath potassique et par sa texture granoblastique encore plus engrenée.

Les syénites du mont Troiquoi forment six massifs d'inégale importance, encaissés dans les gneiss à biotite ou dans les migmatites. Trois de ces massifs correspondent aux reliefs regroupés sous le nom de Mont Troiquoi. L'un d'eux affleure au Nord de Koziyao et à l'Est d'Okrouyo.

Du point de vue géomorphologique, la zone d'étude fait partie d'une vaste pénéplaine légèrement ondulée, dont l'altitude varie de 70 m à plus de 270 m. Les vallées (70 m à 170 m), occupent la majeure partie de la zone d'étude. Les bas plateaux (170 m-250 m) et les hauts plateaux (250 m-270 m) sont surmontés par endroit de quelques élévations comme le mont Troiquoi (444 m) à Okrouyo (PEMED-CI, 2015). D'autres élévations existent dans la région de la Nawa comme celle du mont Zatro à Grand Zattray développés sur des roches éruptives anciennes (Yao, 2009).

La région est drainée par le fleuve Sassandra et ses nombreux affluents qui participent à la recharge de la nappe d'eau souterraine. La puissance du fleuve a engendré la construction du barrage de Soubré en 2017, qui produit de l'électricité en soutien à la capacité énergétique déjà disponible en Côte d'Ivoire. Il permet d'irriguer une grande partie de la Nawa, au bénéfice de l'agriculture et apporte d'importantes ressources halieutiques.

Du point de vue climatique, la zone d'étude est soumise à un climat subéquatorial ou climat attiéen (Eldin, 1971). La température a une valeur moyenne d'environ 25°C avec une amplitude annuelle de l'ordre de 3°C. La végétation de la Nawa, initialement marquée par la forêt sempervirente intermédiaire, dense et humide, s'est réduite aujourd'hui au profit des lambeaux de forêts et d'immenses plantations de cultures pérennes traditionnelles ou industrielles.

Sur le plan pédologique, la quasi-totalité de la zone d'étude est constituée de sols ferrallitiques fortement désaturés, à l'exception d'une infime portion qui comporte des sols ferrallitiques moyennement et/ou faiblement désaturés, notamment au Sud-Est de Soubré et au Sud-Ouest de Ottawa.

Données et matériel

Plusieurs données ont été utilisées dans le cadre de cette étude. Il s'agit de:

- données climatologiques provenant de la SODEXAM (Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique). Elles se rapportent à la pluviométrie mensuelle de 1951 à 2017 (67 ans) de la station de Soubré et de la température mensuelle de la station synoptique de Gagnoa (1980-2018), soit 39 ans. Ces données ne présentent aucune lacune;
- a scène 197-056 de l'image satellitaire OLI de Landsat 8, datant du 02-12-2019 et téléchargée gratuitement à partir de <https://earthexplorer.usgs.gov/> Cette image, prise en saison sèche, est dépourvue de nuages. Elle est de bonne qualité radiométrique;
- la carte topographique à l'échelle 1/200 000 du degré carré de Soubré, datant de 1971 et éditée par le Centre de Cartographie et de Télédétection (CCT);
- la carte géologique à l'échelle 1/500 000 du domaine SASCA établie par Papon & Lemarchand (1973), éditée par la société de développement minier (SODEMI) du Ministère des mines et de l'énergie;
- des activités en carbone 14 ($A^{14}C$) provenant de l'analyse des échantillons d'eau de 5 forages de Soubré (Adiaffi *et al.*, 2021). Les activités en ^{14}C ont été mesurées sur le carbone inorganique total dissous (CITD) par spectrométrie de masse par accélérateur - Artemis Facility UMS LMC 14, Saclay, France, avec une précision de 0,2 – 0,3 pMC en fonction du nombre d'échantillon analysé (Adiaffi *et al.*, 2021).

Les différentes données ont fait l'objet de traitement à l'aide d'un certain nombre de logiciels. Le logiciel Khronostat 1.01, mis au point par l'Institut de Recherche et de Développement (IRD) (ex-ORSTOM), a permis de traiter les données pluviométriques en vue de caractériser la variabilité climatique. Le tableur Excel™ de Microsoft Office 2010 a facilité la réalisation des différents tableaux et graphiques. Le logiciel Envi 5.3 a été utilisé pour traiter les images satellitaires en vue de l'extraction des différentes structures linéamentaires. Les linéaments structuraux ont été traités avec le logiciel Linwin 2.0 pour la réalisation des rosaces directionnelles. Le logiciel Mapinfo 7.5 a permis de nu-

mériser les différentes cartes. ArcGis 10.5 a facilité le croisement de cartes thématiques pour aboutir à une carte de synthèse.

Caractérisation de la variabilité climatique et détermination des paramètres hydrologiques

Les changements dans le régime du climat de la zone d'étude sont relevés par des dates charnières (UICN-BRAO *et al.*, 2003) qui marquent les ruptures à l'intérieur de la série climatique. Le test de Pettitt et la segmentation de Hubert, réputés pour leur robustesse (Lubès-Niel *et al.*, 1998; Kingumbi *et al.*, 2000; Bigot *et al.*, 2002; Ardoïn-Bardin, 2004; Berthelot *et al.*, 2004) sont utilisés pour la mise en évidence de ruptures au sein de la série pluviométrique annuelle de 1951 à 2017 de Soubré. Le logiciel Khronostat 1.01 (Boyer *et al.*, 1998) a servi à la mise en œuvre de ces méthodes de détection de ruptures.

Le déficit pluviométrique de part et d'autre de l'année de rupture, permet de comprendre le comportement de l'évolution de la pluviométrie entre les périodes antérieure et postérieure à la rupture. Il est évalué à partir de la formule 1:

$$D = \frac{\bar{x}_j - \bar{x}_i}{\bar{x}_i} \quad (1)$$

Où D représente le déficit pluviométrique, \bar{x}_j la moyenne de la pluviométrie après la rupture et, \bar{x}_i la moyenne de la pluviométrie avant la rupture.

La fluctuation interannuelle de la pluviométrie permettant d'identifier les grandes tendances climatiques (période sèche, période normale et période humide) du département de Soubré, est déterminée à partir de l'indice pluviométrique qui correspond à une « variable centrée et réduite ». Cet indice est calculé à partir de la formule de Nicholson (1980) équation (2):

$$I_p = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

Où I_p représente l'indice pluviométrique, x_i la hauteur de pluie totale pour une station donnée pendant une année i , \bar{x} la moyenne interannuelle de la pluie à la station pendant la durée entière de l'enregistrement (période d'étude), et σ l'écart-type de la pluviométrie annuelle.

L'estimation de la quantité d'eau infiltrée dans le sol permettant d'obtenir le taux de recharge des aquifères de la zone d'étude passe par la détermination de son bilan hydrologique. Les paramètres hydrologiques (Evapotranspiration Potentielle, Evapotranspiration réelle, Excédent, Déficit, etc.) sont déterminés en suivant la méthode de Thornthwaite (1944).

La lame d'eau infiltrée pour recharger les aquifères de 1951 à 2017 est appréciée à partir des fluctuations de l'infiltration (I) (équation 4). Celle-ci est déduite à partir de l'équation 3 du bilan hydrologique (équation 3). Elle est calculée en soustrayant de la pluviométrie (P), la lame ruisselée (R) et évapotranspirée (ETR).

$$P = ETR + S = ETR + (R + I) \quad (3)$$

$$I = P - (ETR + R) = P - ETR - R \quad (4)$$

Où P est la pluie, ETR l'évapotranspiration réelle, S l'excédent ou le surplus, R le ruissellement et I l'Infiltration.

L'approche de la représentation spatiale de la recharge consiste à combiner les informations spatiales relatives à différents critères susceptibles d'influencer l'infiltration.

Modélisation spatiale des zones de recharge de l'aquifère par analyse multicritère et technique de validation

Chaque donnée de l'étude, soumise à un traitement approprié (saisie manuelle, tri, interpolation, numérisation, digitalisation, maillage, traitement numérique), aboutit à l'obtention d'une carte thématique qui représente un critère de décision intervenant dans la réalisation de la recharge. Les critères disponibles intervenant dans la recharge des aquifères fracturés de la zone d'étude, sont au nombre de 6 en référence aux travaux de Assoma *et al.* (2012), Oularé *et al.* (2017), Aké *et al.* (2018) et Koudou *et al.* (2021).

La lame d'eau infiltrée, qui correspond au gain d'eau à la recharge des aquifères fracturées, est évaluée à partir des données pluviométriques par le calcul du bilan hydrique.

La lithologie se rapporte à la nature des roches issues des formations géologiques de la zone d'étude. L'aptitude à la recharge varie d'une formation à une autre.

L'occupation du sol décrit la couverture biophysique de la surface des terres émergées; c'est-à-dire ce qui recouvre le sol (FAO, 1998). Les différentes catégories biophysiques, les zones de végétation (arbres, buissons, champs, pelouses), les sols nus (même s'il s'agit d'un manque de couverture), les surfaces dures (roches, bâtiments), les surfaces humides et les plans d'eau (nappes et cours d'eau, zones inondables), présentes à la surface du sol, influencent différemment (favorablement ou défavorablement) la recharge des aquifères. L'occupation du sol de la zone d'étude est élaborée à partir du logiciel Envi 5.3. Les images OLI de Landsat 8 ont fait l'objet d'un prétraitement (extraction de la zone d'étude) suivi d'un traitement numérique proprement dit (compositions colorées, ACP, etc.). Plusieurs images transformées de la zone d'étude permettent une bonne discrimination spectrale des différents types d'occupation du sol en général, et de la couverture végétale en particulier (Girard & Girard, 1999). Une classification, réalisée conjointement à l'interprétation visuelle de la composition colorée des bandes 8, 6 et 5 de qualité optimale, se base sur la connaissance de l'occupation des sols acquise sur la carte de Yao (2009). La classification, supervisée par le choix des parcelles d'entraînement, amène à la définition de 5 classes radiométriquement différentes. Cette classification est évaluée par différents tests de performances (la matrice de confusion, la précision globale et le coefficient kappa). Un filtre médian 3×3 est appliqué à la carte d'occupation du sol pour réduire l'hétérogénéité intra-classes.

La densité de fracturation ou l'intensité de la fracturation s'exprime soit en nombre de fractures, soit en longueurs cumulées de fractures par unité de surface. Sa connaissance dans un milieu traduit le degré de fracturation des roches. Les zones hautement fracturées sont les endroits perméables à travers lesquels l'eau s'infiltré. Les différentes techniques de traitement des images OLI de Landsat 8 à partir de Envi 5.3, notamment l'Analyse en composantes principales, les rapports de bandes, les compositions colorées, le filtrage directionnel de Sobel (7×7) ont facilité l'interprétation visuelle et le relevé des linéaments structuraux. Ceux-ci ont été validés à partir des débits des forages d'eau productifs, du réseau hydrographique de la zone d'étude. La carte qui en résulte est soumise à un maillage de taille régulière de 5×5 km² à partir de Linwin

2.0. Les longueurs cumulées de linéaments structuraux par maille sont interpolées selon la technique IDW pour réaliser la carte thématique de densité de fracturation.

La densité de drainage résulte du réseau hydrographique de la zone d'étude qui est numérisé à partir de la carte topographique. Elle est réalisée à partir de l'interpolation selon IDW des longueurs cumulées des drains par maille.

La pente est destinée à faciliter l'écoulement des eaux. Les pentes faibles sont favorables à l'infiltration donc à la recharge des aquifères, alors que les pentes fortes favorisent le ruissellement, et donc constituent un caractère défavorable à la recharge d'un aquifère. La réalisation de la carte thématique est faite automatiquement sous ArcGis 10.5 à partir du Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Celui-ci est obtenu à partir des données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) avec une résolution de 30 m.

Les différents critères de décision sont structurés au sein d'une base de données géospatiales. Les plans d'informations qui en résultent sont mis en conformité géométrique dans le système de référence cartographique longitude / latitude WGS 1984.

Chaque critère considéré est subdivisé en classes qui représente soit un milieu particulier, soit un intervalle de valeurs. Les différentes classes sont standardisées pour une bonne analyse multicritère. A cet effet, ces classes sont attribuées d'une note variant de 1 à 10 en fonction de leur influence particulière (défavorable ou favorable) sur la recharge des aquifères. Chaque critère considéré est aussi pondéré sur la base de son importance relative sur la recharge des aquifères. La procédure mise en œuvre pour déterminer les poids à attribuer à chaque critère se décompose en quatre (4) étapes:

- hiérarchisation des critères par importance du plus important au moins important sur la base de l'échelle numérique de comparaison binaire (Saaty, 1984);
- construction d'une matrice à partir de la comparaison deux à deux des critères (Tableau 1);
- détermination des poids associés à chaque critère par une méthode approchée de calcul des vecteurs propres (Tableau 2);
- et, vérification de la consistance du résultat de la matrice. Dans la présente étude, l'Indice de Cohérence (IC) est évalué à 6,8% (IC<10%),

justifiant que le raisonnement utilisé pour la matrice est cohérent. Par ailleurs, le Ratio de Cohérence (RC) est de 5,5% (IC<10%), attestant aussi que la matrice est cohérente.

Les poids attribués à chaque critère varient entre 0 et 1 et leur somme est égale à 1. Le développement théorique de la détermination des poids de chaque critère peut être consulté auprès de Koudou (2013).

Le tableau 3 présente les classes des critères influençant la recharge qui sont classifiés, standardisés et pondérés.

Les différents critères classés, standardisés et pondérés sont aussi agrégés.

La méthode d'agrégation complète émet l'hypothèse que tous les critères considérés sont parfaitement comparables, et le résultat de la fonction objective qu'elle conçoit et qui intègre tous les critères

considérés, peut être cartographié. Ainsi, l'agrégation complète des critères par pondération (Joerin, 1995; Martin *et al.*, 2004) est appliquée dans la zone d'étude et consiste à la sommation des valeurs standardisées et pondérées de chaque critère intervenant dans la réalisation de la recharge. Elle est résumée par l'équation 4:

$$S = \sum_{i=2}^n W_i X_i \quad (4)$$

Où S est le résultat, W_i est le poids du critère i , et, X_i est la valeur standardisée du critère i .

Cette procédure aboutit à l'obtention d'un indice d'aptitude situé sur une échelle de 0 à 10. Cet indice est reporté dans l'espace et reclassifié en quatre classes qualifiées de Faible, Moyenne, Forte et Très forte, pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte de synthèse.

Tableau 1.— Matrice originale de comparaison par paire des critères des zones de recharge

[A]=Matrice originale						
	Pente	Infiltration	Densité de drainage	Lithologie	Densité de fracturation	Occupation du sol
Pente	1	1/2	2	4	5	3
Infiltration	2	1	3	5	6	4
Densité de drainage	1/4	1/3	1	3	4	2
Lithologie	1/4	1/5	1/3	1	2	1/2
Densité de fracturation	1/5	1/6	1/4	1/2	1	1/3
Occupation du sol	1/3	1/4	1/2	2	3	1
SOMME	4,28	2,45	7,08	15,5	21	10,83

Tableau 2.— Détermination du vecteur de priorité ou des coefficients de pondération

[B]=Matrice normalisée							
	Pente	Infiltration	Densité de drainage	Lithologie	Densité de fracturation	Occupation du sol	[C]= Vecteur de priorité
Pente	0,23	0,20	0,28	0,26	0,24	0,28	0,25
Infiltration	0,47	0,41	0,42	0,32	0,28	0,37	0,38
Densité de drainage	0,11	0,14	0,14	0,19	0,19	0,18	0,16
Lithologie	0,06	0,08	0,05	0,07	0,10	0,05	0,07
Densité de fracturation	0,05	0,07	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04
Occupation du sol	0,08	0,10	0,07	0,13	0,14	0,09	0,1
SOMME	1	1	1	1	1	1	1

Tableau 3.— Critères classifiés, standardisés et pondérés influençant la recharge des aquifères

Indicateur	Critères	Qualificatifs des critères	Classes	Notes	Poids
Zones de recharge	Infiltration	Très faible	< 25	1	0,38
		Faible	25 - 50	3	
		Moyen	50 - 75	5	
		Fort	75 - 100	8	
		Très forte	> 100	10	
	Occupation du sol	Très faible	Sol nu	1	0,25
		Faible	Plantation secondaire	3	
		Moyen	Plantation industrielle	5	
		Forte	Forêt dense	8	
		Très forte	Cours d'eau	10	
	Densité de drainage (km/km ²)	Très faible	< 0,55	10	0,16
		Faible	0,55 - 0,80	8	
		Moyen	0,80 - 0,95	5	
		Forte	0,95 - 1,5	3	
		Très forte	> 1,5	1	
	Densité de fracturation (km/km ²)	Très faible	< 1,5	1	0,1
		Faible	1,5 - 2,1	3	
		Moyen	2,1 - 2,5	5	
		Forte	2,5 - 4	8	
		Très forte	> 4	10	
Pente (%)	Très faible	< 10	10	0,07	
	Faible	10-25	8		
	Moyen	25-30	5		
	Forte	30 - 40	3		
	Très forte	> 40	1		
Lithologie	Faible	Granitoïde	3	0,04	
	Moyen	Syénite	5		
	Forte	Gneiss	8		
	Très forte	Migmatite	10		

La validation de la carte des zones de recharge est effectuée à partir de la mesure de l'activité en carbone 14. L'activité en carbone 14 est un outil très efficace pour mettre en évidence les zones de recharge. Lorsque l'activité en carbone 14 est élevée (autour de 100% pMC), la recharge de la nappe au point d'échantillonnage est récente. En revanche, lorsqu'elle est basse (bien loin de 100% pMC dans le sens de la diminution), la recharge est dite ancienne (Oga, 1998; Adiaffi, 2008; Adiaffi *et al.*, 2009; Adiaffi *et al.*, 2021). Les âges des eaux sont déterminés à partir des activités en carbone 14.

C'est une méthode fréquemment utilisée en géochimie des eaux pour apprécier le taux de renouvellement des aquifères étudiés (Girard, 1993; Oga, 1998; Adiaffi, 2008). Dans cette étude, le mode de validation consiste à superposer l'ensemble des forages où les données des A¹⁴C sont connues à la carte des zones de recharge, puis à établir une relation entre les classes de recharge et les A¹⁴C des eaux de forages.

La figure 3 illustre la méthodologie élaborée pour la cartographie des zones potentielles de recharge par analyse multicritère.

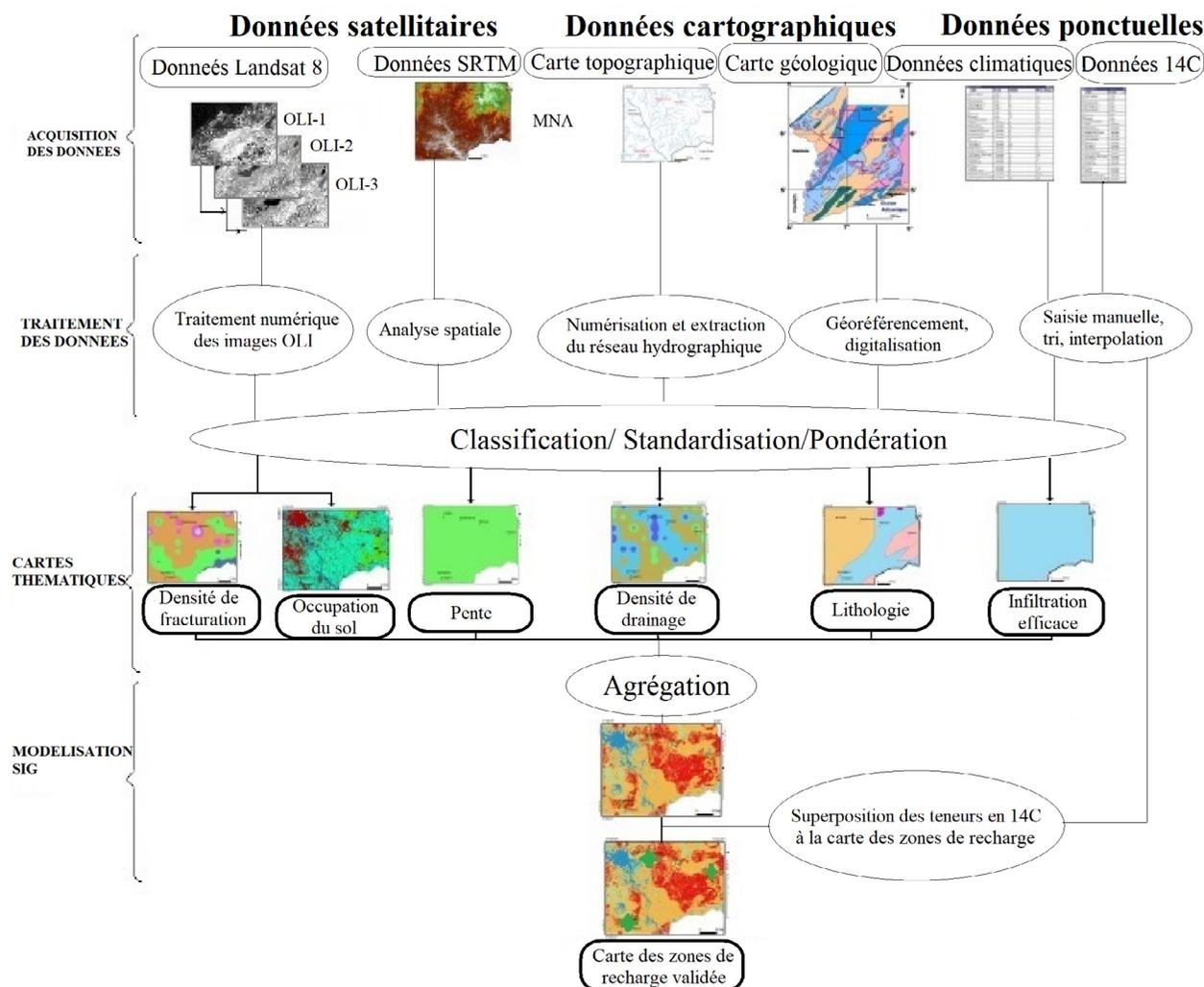


Figure 3.— Organigramme de la méthodologie élaborée pour la cartographie des zones potentielles de recharge par analyse multicritère.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats

Caractérisation de la variabilité climatique et estimation des paramètres du bilan hydrologique

Deux ruptures successives (Figure 4 et Tableau 4), l'une primaire et très significative au seuil de confiance de 99%, a été identifiée en 1970 et l'autre secondaire en 1992, s'observent dans la série pluviométrique annuelle (1951-2017) de Soubré.

Le déficit pluviométrique calculé de part et d'autre de la rupture primaire de 1970 est de 14%, confirmant ainsi une baisse significative de la moyenne

des pluies au cours du XX^{ème} siècle à la station de Soubré (Tableau 5).

L'indice pluviométrique de Nicholson (Figure 5) permet de confirmer les grandes tendances dans la série chronologique identifiée par les tests de rupture.

Soubré est caractérisé par 3 périodes:

- une période humide entre 1951 et 1970 avec une moyenne de 1635,6 mm et un écart-type de 254,5 mm;
- une période sèche de 1971 à 1992, avec une moyenne de 1263,5 mm et un écart-type de 191,7 mm;
- une période humide de 1993 à 2017 avec une moyenne de 1520,3 mm et un écart-type de 214,2 mm.

Tableau 4.— Test de segmentation d'Hubert

Début	Fin	Moyenne (mm)	Ecart-type (mm)
1951	1970	1635,605	254,489
1971	1992	1263,514	191,711
1993	2017	1520,256	214,228

Tableau 5.— Déficit pluviométrique à la station de Soubré (1951-2017)

		Avant rupture		Après rupture		
Station	Référence	Moyenne (mm)	Ecart-type (mm)	Moyenne (mm)	Ecart-type (mm)	Déficit (%)
Soubré	1970	1635,6	254,5	1400,1	239,8	14

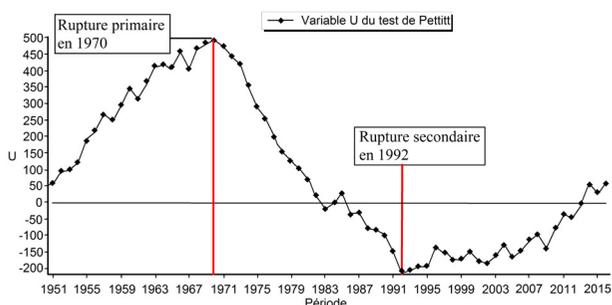


Figure 4.— Courbe de la série pluviométrique de la station de Soubré après la variable U du test de Pettitt (dates de rupture: 1970 et 1992).

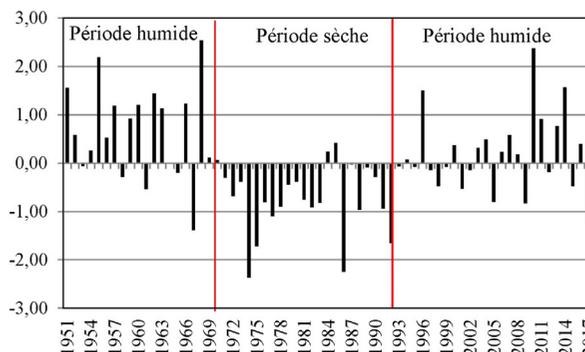


Figure 5.— Evolution interannuelle de la pluviométrie de Soubré de 1951 à 2017.

La variation mensuelle et saisonnière des précipitations avant et après la rupture de 1970 met en évidence 4 saisons à la station de Soubré (Figure 6). Une grande saison sèche de novembre à février pour la période avant la rupture, et qui se prolonge jusqu'à mars pour la période après rupture. Une petite saison sèche qui se résume au mois d'août avant la rupture, et qui s'étend sur 2 mois (juillet et août) après la rupture. Une grande saison pluvieuse qui s'étend de mars à juillet (5 mois) avant la rupture, et qui passe d'avril à juin, soit 3 mois après la rupture. La petite saison pluvieuse se résume à 2 mois (septembre et octobre) avant et après rupture. La pluviométrie de chaque mois avant la rupture reste sensiblement supérieure à celle après rupture, hormis les mois de février, mai et août durant lesquels la pluviométrie est presque identique.

Le bilan hydrologique à la station de Soubré sur la période 1951-2017 est consigné dans le Tableau 6.

Pour une pluviométrie moyenne annuelle (1951-2017) de 1828 mm, la lame d'eau évapotranspirée est

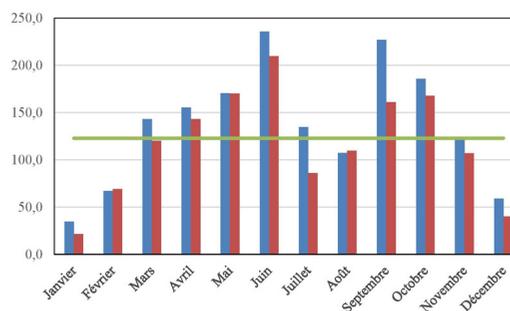


Figure 6.— Variation mensuelle et saisonnière des précipitations avant et après la rupture de 1970 à Soubré.

de 1638 mm. La lame d'eau ruisselée est de 242 mm. Celle destinée à recharger les aquifères du Sud-Est de la Nawa est évaluée à $I = (485-242) = 243$ mm.

Cartes thématiques du Sud-Est de la région de la Nawa

Cinq cartes thématiques ont été élaborées dans le Sud-Est de la région de la Nawa. Il s'agit de la

Tableau 6.— Bilan hydrologique de la station de Soubré (1951-2017) selon la méthode de Thornthwaite

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P(mm)	25	47	102	159	297	515	172	32	71	177	153	78	1828
ETP(mm)	140	144	166	160	155	130	114	102	110	132	141	143	1638
ETR(mm)	25	47	102	159	155	130	114	102	101	132	141	135	1446
RFU(mm)	0	0	0	0	100	100	100	30	0	45	57	0	432
DRFU(mm)	0	0	0	0	100	0	0	-70	-30	45	12	-57	00
P-ETR(mm)	0	0	0	0	142	385	58	-70	-30	45	12	57	485
Surplus(exc) ^o	0	0	0	0	42	385	58	0	0	0	0	0	485
Ecoulement	2	1	1	1	21	203	131	65	32	12	8	4	485

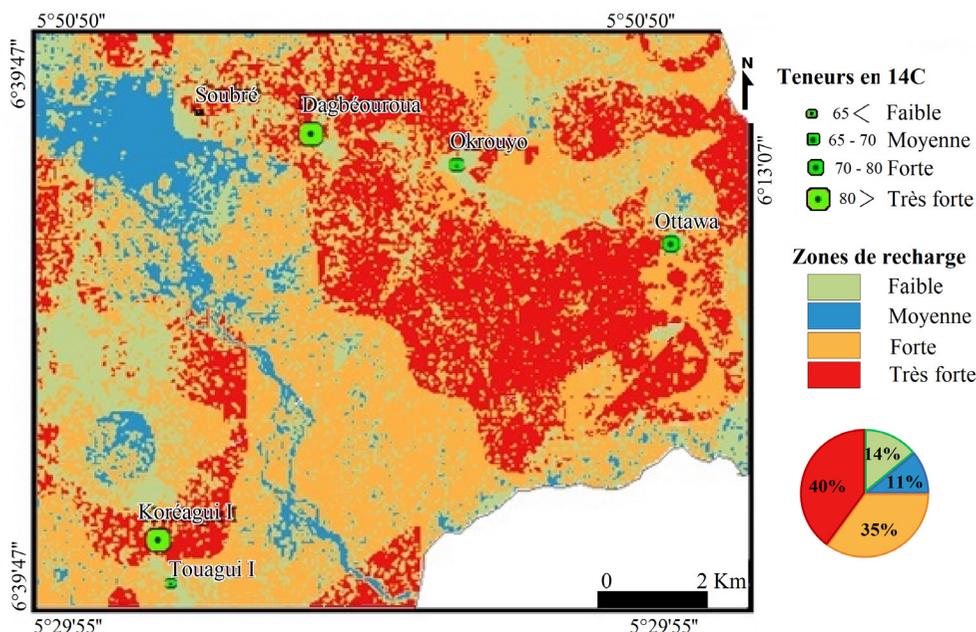
carte d'occupation du sol, de la carte de densité de fracturation, de la carte de densité de drainage, de la carte des pentes, et de celle des zones de recharge validées du Sud-Est de la région de la Nawa et leur proportion.

La carte des zones de recharge validées du Sud-Est de la région de la Nawa et leur proportion, est illustrée à la **Figure 7**.

Cette carte de synthèse est caractérisée par une variabilité spatiale des zones à potentialité de recharge des aquifères. Quatre (4) classes de zones de recharge, de proportion variable, se rencontrent dans la zone d'étude.

Les zones de recharge très forte et forte se localisent au Sud-Est et s'étendent jusqu'au Sud-Ouest de la zone

d'étude. Ces zones représentent respectivement 40% et 35% de la superficie globale, et caractérisent les zones où le taux d'infiltration pourrait être élevé en cas de pluies. Elles désigneraient également les zones de transmission rapide des contaminants de la surface vers l'aquifère, donc elles doivent être protégées. À l'opposé, les zones de recharge faible sont localisées majoritairement à l'Ouest et au Nord de la zone d'étude. Quelques portions disséminées apparaissent au Sud et à l'Est. Ces endroits représentent environ 14% de la superficie totale de la zone d'étude. Enfin, les zones de recharge moyenne, qui occupent 11% de la superficie totale, apparaissent dans le lit du fleuve Sassandra dans le Sud-Est de la Nawa. Les fortes teneurs en carbone 14 se superposent aux zones de recharge forte et très forte.

**Figure 7.**— Carte des zones de recharge validées du Sud-Est de la région de la Nawa et leur proportion.

La distribution spatiale des teneurs en carbone 14 est tout à fait en concordance avec les zones de recharge élaborées par analyse multicritère.

Discussion

La cartographie des zones de recharge des aquifères fracturés en contexte de variabilité climatique par analyse multicritère a certes donné des résultats satisfaisants, mais soulève des constatations, des incertitudes et quelques difficultés.

Discussion sur la variabilité climatique et le bilan hydrologique

Les dates de ruptures identifiées à Soubré (1970 et 1990) dans les séries pluviométriques, sont en accord avec les travaux de Servat *et al.* (1999) en Afrique de l'Ouest en général, et Soro *et al.* (2011) en Côte d'Ivoire en particulier. Ces ruptures s'insèrent dans l'intervalle des résultats définis par ceux-ci.

Le bilan hydrologique calculé à partir de la méthode de Thornthwaite fournit des valeurs très ponctuelles. Leur spatialisation dans la zone d'étude contribuerait très certainement à une plus grande incertitude dans l'évaluation globale des potentialités. L'excédent d'eau disponible pour l'écoulement et l'infiltration est de 485 mm. La moitié (242 mm) de cet excédent s'écoulerait selon Thornthwaite (1954) cité par Remenieras, (1976) dans le réseau hydrographique de surface, et l'autre moitié (243 mm) serait destinée à l'écoulement souterrain; c'est-à-dire, à la lame d'eau destinée à recharger les aquifères du Sud-Est de la Nawa. Cette valeur est cependant, à prendre avec beaucoup de réserves. En effet, la méthode du bilan hydrologique, basée sur la loi de conservation de la masse dans le cycle hydrologique pour estimer la recharge de la zone d'étude, est une approche indirecte. La précision et l'incertitude liées à la méthode d'estimation de la recharge utilisée restent difficiles à évaluer. Fort de ce constat, Huet (2015) justifie la nécessité d'appliquer et de comparer plusieurs méthodes afin de quantifier de façon plus juste la recharge.

Discussion sur les zones de recharge de l'aquifère et la technique de validation

L'approche de la représentation spatiale de la recharge dans le Sud-Est de la Nawa a justifié de l'uti-

lisation des outils de télédétection et de SIG avec une paramétrisation des états de surface pour identifier les zones potentielles de recharge. Cette approche soulève une difficulté importante en lien avec la définition des limites de classe des critères choisis. Les limites des classes de l'infiltration, de la densité de fracturation et de la densité de drainage ont été déterminées par défaut pour répondre à la disponibilité des données et aux objectifs assignés à l'étude. Selon Jourda *et al.* (2006), le choix des limites de classe s'opère le plus souvent en fonction de la faculté de discernement de l'opérateur et de son sens de jugement. Oularé *et al.* (2017) estiment que les limites des différentes classes définies pour les critères, ne doivent en aucun cas être perçues comme des barrières tangibles, mais plutôt comme des zones de transition entre les différentes classes.

L'analyse multicritère a permis de mettre en évidence la variabilité spatiale des zones de recharge de la zone d'étude. Cette technique a aussi été mise en œuvre dans différents contextes géologiques pour évaluer les potentialités en eau souterraine et identifier les sites propices à l'implantation des ouvrages de captage des eaux souterraines (Saraf & Choudhury, 1997; Jourda *et al.*, 2006; Brunner *et al.*, 2007; Hosam *et al.*, 2011; Koudou *et al.*, 2013; Koudou *et al.*, 2021). L'identification des zones de recharge forte et très forte n'est pas une garantie du taux de recharge de la nappe par la lame d'eau infiltrée à 100%. Les activités en ^{14}C des forages se superposent aux zones de recharge forte et très forte de l'aquifère. Même si elles ne couvrent pas de manière homogène la zone d'étude, elles permettent néanmoins de valider la carte des zones de recharge. Elles apportent une certaine crédibilité à l'étude réalisée. En effet, les activités en ^{14}C conduisent à dater au moyen de modèles empiriques les eaux souterraines (Oga, 1998; Adiaffi, 2008; Adiaffi *et al.*, 2009; Zohra, 2017; Adiaffi *et al.*, 2021). Les eaux souterraines qui présentent de faibles activités en ^{14}C sont anciennes par rapport à celles qui présentent des activités en ^{14}C proches de 100 pMC. Ainsi, son usage dans la présente étude vient conforter la validation des zones potentielles de recharge mises en évidence par analyse multicritère au sein d'un SIG. En effet, les précipitations qui contribuent à la recharge des nappes souterraines, contiennent du CO_2 dissous dont l'activité en ^{14}C renouvelable (autour de

100 pMC) est connue (Oga, 1998; Hua & Barbetti, 2004; Adiaffi, 2008; Adiaffi *et al.*, 2009; Zohra, 2017; Adiaffi *et al.*, 2021). La carte des zones de recharge représente un outil d'aide à la décision qui facilite l'identification des secteurs susceptibles de faire l'objet d'implantation de forages à forte productivité, et aussi vulnérables vis-à-vis des contaminants.

L'application de la méthode de l'analyse multicritère consiste à combiner les informations spatiales relatives à différents paramètres susceptibles d'influencer l'infiltration. Ces paramètres (occupation du sol, couvert végétal, type de sol, pente, réseau de drainage, épaisseur et lithologie de la ZNS, humidité du sol) influencent diversément l'infiltration et sont interdépendants. C'est pour cette raison qu'ils doivent être définis, classifiés et affectés d'un poids suivant leur importance dans le processus de recharge, mais également leur interdépendance.

CONCLUSION

La présente étude a permis de proposer une méthodologie d'identification et d'évaluation des zones potentielles de recharge des aquifères du Sud-Est de la Nawa par le couplage de l'analyse multicritère au radiocarbone en contexte de variabilité climatique.

Deux ruptures successives (1970 et 1992), un déficit pluviométrique de part et d'autre de la rupture primaire de 1970 de 14%, deux périodes humides (1951-1970 et 1993-2017) séparées d'une période sèche (1971-1992) et la lame d'eau infiltrée estimée à 243 mm pour la recharge les aquifères, caractérisent le Sud-Est de la Nawa, sur la période 1951-2017.

La complémentarité des approches (variabilité climatique, analyse multicritère, radiocarbone) a abouti à l'identification des zones potentielles de recharge des aquifères fracturés du Sud-Est de la région de la Nawa (Côte d'Ivoire). La carte des zones de recharge est un outil d'aide à la décision conçu pour faciliter le processus d'analyse et la prise de décision. Elle oriente les décideurs dans l'identification des secteurs susceptibles de faire l'objet d'implantation de forages à forte productivité surtout en milieu rural où le besoin en eau potable est parfois très important.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) - Côte d'Ivoire, pour leur soutien

lors des prélèvements d'eau de forages de Sikensi à Soubré, et le laboratoire GEOPS (Université Paris-Saclay, France) pour l'analyse géochimique des échantillons d'eau. Leur remerciement s'adresse également à la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) pour avoir mis à leur disposition des données climatologiques, et aux relecteurs pour leurs commentaires et suggestions constructives.

RÉFÉRENCES

- Adiaffi, B. (2008). Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "socle-bassin sédimentaire" du Sud-est de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, 230 pp.
- Adiaffi, B.; Marlin, C.; Koudou, A.; Assoma, V.T.; Guédé, K.; Oga, Y.M.S.; Massault, M.; Noret, A. & Monvoisin, G. (2021). Geochemical processes in the groundwater of Soubré, Ivory Coast, West Africa: evidence from ^{14}C , ^{13}C , ^{18}O , ^2H and major ions. *Journal of African Earth Sciences*, 184: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104382>
- Adiaffi, B.; Marlin, C.; Oga, Y.M.S.; Massault, M.; Nauret, A. & Biémi, J. (2009). Palaeoclimatic and deforestation effect on the coastal fresh groundwater resources of SE Ivory Coast from isotopic and chemical evidence. *Journal of Hydrology*, 369: 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.046>
- Aké, G.E.; Kouamé, K.J.; Koffi, A.B. & Jourda, J.P. (2018). Cartographie des zones potentielles de recharge de la nappe de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences de l'Eau*, 31: 129-144. <https://doi.org/10.7202/1051696ar>
- Ardoin-Bardin, S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 437 pp.
- Assoma, T.V.; Adiaffi, B. & Koudou, A. (2012). Contribution of Remote Sensing, Multi-Criteria Analysis and GIS for Mapping Recharge Areas of the Coastal Aquifers in Southeast Ivory Coast. *American Journal of Scientific Research*, 80: 112-125.
- Barima, Y.S.S.; Konan, G.D.; Kouakou, A.T.M. & Bogaert, J. (2020). Cocoa production and forest dynamics in Ivory Coast from 1985 to 2019. *Land*, 9: 1-22. <https://doi.org/10.3390/land9120524>
- Berthelot, M.; Genin, A. & Gourdon, D. (2004). Variabilité interannuelle des précipitations dans les Alpes du Sud

- pour la période 1951/2000: Analyse statistique des séries. Université François Rabelais, Tours, France, 15 pp. <http://alexandre.letort.pagesperso-orange.fr/berthelot/alpessud.htm> (consultation le 22 novembre 2021).
- Bigot S.; Brou, T.Y.; Bonnardot, V. & Servat, E. (2002). Stabilité inter-annuelle des précipitations en Côte d'Ivoire de 1950 à 1996. *Hydrological Sciences Journal*, 274: 507-514.
- Bolgarsky, M. (1950). Étude géologique et description pétrographique du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Bulletin de la Direction des mines*, 9, Dakar 55 pp.
- Boyer, J.F.; Lubès-Niel, H.; Paturol, J.E. & Servat E. (1998). Khronostats-Logiciel de détection des fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. IRD, UMR Hydrosociétés.
- Brou, Y.T. (2005). Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, France, 212 pp.
- Brunner P.; Hendricks, F.H.J.; Kgotlhang, L.; Bauer-Gottwein, P. & Kinzelbach, W. (2007). How can remote sensing contribute in groundwater modelling? *Hydrogeology Journal*, 15: 5-18. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0127-z>
- CEFIGRE (1992). L'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Synthèse des connaissances du socle cristallin cristallophyllien et sédimentaire ancien. Collection Maîtrise de l'eau 2ème éd., 147 pp.
- Eldin, M. (1971). Le climat. Mémoire ORSTOM, 50: 77-108.
- Fadika V. (2012). Variabilité hydroclimatique et modélisation hydrologique de quelques bassins versants côtiers du sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Thèse unique de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 164 pp.
- FAO (1998). Les conséquences de l'accord sur l'agriculture du cycle d'Uruguay pour les pays en développement.
- Girard M.-C. & Girard, C.M. (1999). Traitement des données de télédétection. Interprétation physique des données, les comportements spectraux, 529 pp.
- Girard, P. (1993). Techniques isotopiques appliquées à l'étude des nappes des altérites et du socle fracturés de l'ouest africain. Etude de cas: l'ouest du Niger. Thèse de Doctorat en ressources minérales, Université du Québec à Chicoutimi, 138 pp. <https://doi.org/10.1522/1486981>
- Hossam, H.; Elewa, A. & Quaddah A. (2011). Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modelling. *Hydrogeology Journal*, 19: 613-628. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0703-8>
- Hua, Q. & Barbetti, M. (2004). Review of tropospheric bomb 14C data for carbon cycle modeling and age calibration purposes. *Radiocarbon*, 46: 1273-1298. <https://doi.org/10.1017/S0033822200033142>
- Huet, M. (2015). Comparaison de méthodes d'estimation de la recharge des aquifères: exemple de la région Charlevoix - Haute-Côte-Nord. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la Maîtrise en Sciences de la Terre, 92 pp.
- Joerin, F. (1995). Méthode multicritère d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. *Revue Internationale de Géomatique*, 1: 37-51.
- Jourda, J.P.; Saley, M.B.; Djagoua, E.V.; Kouamé, K.J.; Biémi, 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: 339-357.
- Kingumbi, A.; Bergaoui, Z.; Bourges, J.; Hubert, P. & Kallel, R. (2000). Etude de l'évolution pluviométrique de la Tunisie Centrale. *Documents Techniques en Hydrologie*, 51: 341-345.
- Kouamé, C.; Diomande S.; Kouassi, J.L.; Yeboi, B. & Diby, L. (2016). Dynamiques d'utilisation des terres dans la Région de la Nawa. Atelier sur l'étude analytique de l'occupation du sol en vue de l'intégration du mécanisme REDD+ dans le Schéma Régional d'Aménagement et de Développement du Territoire (SRADT) de la Région de la Nawa, Soubre, Côte d'Ivoire. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.3766.5523>
- Koudou, A. (2013). Conception d'outils d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique: application à la sélection des zones à potentialité aquifère et moins vulnérables à la pollution du bassin versant du N'zi. Thèse Unique de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire, 211 pp.
- Koudou, A.; Adiaffi, B.; Assoma, T.V.; Sombo, A.P.; Amani, E.M.E. & Biémi, 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. *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales*, 37: 211-226.
- Koudou, A.; Adiaffi, B. & Kra, C.C. (2021). Cartographie des zones de recharge des aquifères de fractures du département de Tanda par analyse multicritère (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 43: 27-42.
- Lubès-Niel, H.; Masson, J.M.; Paturol, J.E. & Servat, E. (1998). Variabilités climatiques et statistiques. Etude

- par simulation de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, 3: 383-408. <https://doi.org/10.7202/705313ar>
- Martin, J.L.; Henry, E.; Boulemia, C. & Masson, F.X. (2004). Proposition d'outils de gestion et d'aide à la décision dans une moyenne collectivité locale: application à l'exploitation de la ressource en eau souterraine. Actes de la journée d'études « Les territoires de l'eau », Université d'Artois, Arras: 74-82.
- Nicholson S.E. (1980). The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa. *Monthly Weather Review*, 108: 473-487.
- Oga, Y.M.S. (1998). Ressources en eau souterraines dans la région du grand Abidjan (Côte d'Ivoire): Approches hydrochimique et isotopique. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 290 pp.
- Ohou-Yao, M.J.A.; Ouattara, L.Y.; Yapo, O.B. & Mambo, V. (2017). Impacts of environmental management on the quality of traditional well water in the Soubré region (South-west of Côte d'Ivoire). *Journal of Water Resource and Protection*, 9: 1634-1644. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.913102>
- Oularé, S.; Adon, G.C.; Akpa, Y.L.; Saley, M.B.; Kouamé, K.F. & Therrien, R. (2017). Identification Des Zones Potentielles De Recharge Des Aquifères Fracturés Du Bassin Versant Du N'zo (Ouest De La Côte d'Ivoire): Contribution Du SIG Et De La Télédétection. *European Scientific Journal*, 13: 192-217. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n36p192>
- Papon, A. & Lemarchand, R. (1973). Géologie et minéralisation du sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA (1962-1968). *Mémoire B.R.G.M.*, 80: 284 pp.
- PEMED-CI (2015). Etudes monographiques et économiques des Districts de Côte d'Ivoire, District du Bas-Sassandra. Note de synthèse, 69 pp.
- Remenieras, G. (1976). L'hydrologie de l'ingénieur. 2e édition, Eyrolles, Paris.
- RGPH (Recensement Général de la Population et de l'Habitat) (2014). Répertoire des localités. Région de la NAWA, 29 pp.
- Saaty, T.L. (1984). Décider face à la complexité, une approche analytique multicritère d'aide à la décision. *Entreprise moderne d'édition*, 231 pp.
- Saraf, A.K. & Choudhury, P.R. (1997). Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1825-1841. <https://doi.org/10.1080/014311698215018>
- Servat, E.; Paturol, J.E.; Lubès-Niel, N.H.; Kouamé, B.; Masson, J.M.; Travaglio, M. & Marieu, B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12: 363-387. <https://doi.org/10.7202/705356ar>
- Soro, T.D.; Soro, N.; Oga, Y.M.-S.; Lasm, T.; Soro, G.; Ahoussi, K.E. & Biémi, J. (2011). La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo*, 5: 55-73. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.1581>
- Thorntwaite, C.W. (1944). The measurement of potential evapotranspiration. *J. M. Mather, Sea-Brook, New Jersey*, 225 pp.
- UICN-BRAO, GWP-WAWP & CILSS (2003). Eau, changement climatique et désertification en Afrique de l'Ouest: Stratégie régionale de préparation et d'adaptation. Ouagadougou, Burkina-Faso, 57 pp.
- 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 pp.
- Zohra, H. (2017). Quantification de la recharge naturelle et artificielle d'un système aquifère soumis à des contraintes climatiques et anthropiques en zone semi-aride (bassin de Sbiba et Foussana) Tunisie centrale. Thèse de Doctorat en Génie Géologique, Université d'Avignon, France, 239 pp.