

Caractérisation Lithologique, Hydrosédimentaire Et Cartographie des Aquifères par la Méthode des Indices d'Évolution : Cas de la Recharge des Aquifères de Bonoua (Sud-Est Côte d'Ivoire)

Alla Amani Jonas
Yao N'Goran Jean Paul
Yao Diby Ferdinand
Digbehi Zéli Bruno

Université Félix Houphouët Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières, Laboratoire de Géologie, Ressources Minérales et
Énergétiques (LGRME) Abidjan, Côte d'Ivoire

[Doi:10.19044/esj.2024.v20n9p214](https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n9p214)

Submitted: 07 July 2023
Accepted: 14 March 2024
Published: 31 March 2024

Copyright 2024 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:

Alla A.J., Yao N.J.P., Yao D.F. & Digbehi Z.B. (2024). *Caractérisation Lithologique, Hydrosédimentaire Et Cartographie des Aquifères par la Méthode des Indices d'Évolution : Cas de la Recharge des Aquifères de Bonoua (Sud-Est Côte d'Ivoire)*. European Scientific Journal, ESJ, 20 (9), 214. <https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n9p214>

Résumé

Ce travail avait pour objectif de déterminer la typologie et la source probable de recharge des aquifères rencontrés à Bonoua en vue d'une meilleure gestion de ceux-ci. Les travaux ont utilisé des échantillons de forages prélevés à Bonoua au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. L'étude lithologique a révélé des sables, des argiles sableuses et des argiles bariolées. Les sables constituent l'essentiel des aquifères. La détermination des indices d'évolution totale (Nt) et segmentaire (Ns) a illustré trois aquifères. La variation de ces indices a révélé une direction NW-SE des paléocourants. Les indices Ns des sables montrent qu'ils ont subi un long transport (64 % à 86 %). Le principal aquifère se situe à 64,5 m en moyenne. Il est surmonté par un niveau imperméable (toit) d'argile bariolée et enregistre les meilleures arrivées d'eau. Il est dominé de sables grossiers (66,66 % à 85,71 %) à très grossiers avec une forme subarrondie (16 % à 53,57 %) et arrondies (13,04 % à 40 %). Les particules fines piégées par les grossières à l'équilibre lors du dépôt sont toutes

les deux issues d'un courant cogénétique. Ces sédiments transportés majoritairement par saltation et déposés généralement selon un faciès logarithmique ($Nt = 0$) et rarement parabolique ($0 < Nt < 1$) sont très bien classés (83,33 % à 100 %). Cette étude a permis d'identifier deux nouveaux faciès qui sont le faciès subparabolique ($0,05 \leq Nt \leq 0,09$) et le faciès linéaire ($Nt = 1$). Le faible pourcentage de fine offre à l'aquifère une bonne porosité et une bonne perméabilité ainsi qu'une bonne transmissivité de l'eau souterraine. Ce travail révèle donc qu'un seul aquifère existe dans cette localité mais se présente en bicouche séparée par de l'argile bariolée qui constitue le toit de cette nappe captive exploitée dans le zone. L'écoulement souterrain de direction NW-SE suppose que l'eau stockée à Bonoua proviendrait du fleuve Comoé qui coule en direction de la localité de Bassam. D'où la nécessité de protéger les cours d'eau rencontrés dans la localité de Bassam ainsi qu'au Nord de la zone d'étude afin garantir l'eau à Bonoua.

Mots-clés: Aquifère, indices d'évolution, cogénétique, logarithmique, porosité, perméabilité

Lithological, Hydrosedimentary Characterization and Modeling of Aquifers Using the Method of Evolution Indices : Case of Recharge of Aquifers of Bonoua (Southeast Of Côte d'Ivoire)

Alla Amani Jonas
Yao N'Goran Jean Paul
Yao Diby Ferdinand
Digbehi Zéli Bruno

Université Félix Houphouët Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire de Géologie, Ressources Minérales et Energétiques (LGRME) Abidjan, Côte d'Ivoire

Abstract

The objective of this study was to determine the typology and likely recharge source of the aquifers found in Bonoua, aiming to enhance their management. Samples from boreholes in Bonoua, located in southeastern Côte d'Ivoire, were analyzed. The lithological examination revealed the presence of sands, sandy clays, and variegated clays, with sands comprising the majority of the aquifers. Analysis of total (Nt) and segmental (Ns) evolution indices highlighted the presence of three distinct aquifers. The fluctuation in these indices indicated a prevailing NW-SE direction of paleocurrents. The Ns

indices of the sands indicate significant long-distance transport (ranging from 64% to 86%). The primary aquifer is typically found at an average depth of 64.5 meters. It is capped by an impermeable layer (roof) of variegated clay, leading to optimal water inflow. The predominant sands range from coarse (66.66% to 85.71%) to very coarse, exhibiting subrounded (16% to 53.57%) and rounded (13.04% to 40%) characteristics. Both the fine particles trapped by the coarse ones during deposition equilibrium originate from a co-genetic current. These sediments, primarily transported by saltation and typically deposited in a logarithmic ($Nt = 0$) and occasionally parabolic ($0 < Nt < 1$) facies, exhibit high classification accuracy (ranging from 83.33% to 100%). Additionally, this study identified two novel facies: the subparabolic facies ($0.05 \leq Nt \leq 0.09$) and the linear facies ($Nt = 1$). The low proportion of fines contributes to the aquifer's favorable porosity, permeability, and groundwater transmissivity. Consequently, this research confirms the presence of a single aquifer in this area, organized in a bilayer configuration separated by variegated clay serving as the roof of the exploited captive aquifer in the region. The NW-SE underground flow pattern suggests that the water stored in Bonoua originates from the Comoé River, which flows towards Bassam. Therefore, it is imperative to safeguard the watercourses encountered in the vicinity of Bassam and to the north of the study area to ensure a reliable water supply to Bonoua.

Keywords: Aquifer, evolution indices, cogenetic, logarithmic, porosity, permeability

1. Introduction

Les populations riveraines de la localité de Bonoua (Figure 1) ont connu une évolution démographique importante en passant de 42271 habitants en 2010 à 118388 habitants en 2021. Cette croissance galopante constitue un défi majeur pour les autorités dans l'approvisionnement en eau potable. De plus, l'autonomie de plusieurs entreprises en eau potable pour leur fonctionnement, leurs activités commerciales mais également pour le renforcement en eau à Abidjan (Aké, 2010 ; Djaa *et al.*, 2014) notamment dans les communes de Treichville, de Marcory, de Koumassi et de Port-Bouët (Kouamé *et al.*, 2017) deviennent des équations de plus en plus compliquées à résoudre. Afin de faire face à ces nombreux besoins en eau potable, l'on assiste à une intensification des forages hydrauliques dans la localité de Bonoua depuis quelques années. Les forages en exploitation à Bonoua captent le même aquifère du Continental Terminal (Mio-pliocène) (Kouamé *et al.*, 2017). Ce constat laisse supposer que cet aquifère serait surexploité dans la zone. Par ailleurs, les travaux réalisés dans le Sud-Est du bassin ivoirien ont abouti seulement à la caractérisation minéralogique, granulométrique et

morphoscopique des sédiments (Assalé, 2013). A Bonoua, les travaux de Gbangbot (2012) ont montré la caractérisation stratigraphique des aquifères tandis que ceux de Kouamé *et al.* (2017), ont montré que le rabattement est passé de 11362 m³/j en 2000 à 105731 m³/j en 2020. Cependant, des travaux en vue d'étudier les conditions hydrodynamiques ayant présidé à la mise en place de ces aquifères et à leur recharge ne sont pas encore abordés. L'objectif de ce travail est de contribuer à une caractérisation hydrodynamiques sédimentaires afin de déterminer la typologie et la source probable de recharge de ces nappes (aquifères) de la zone d'étude.

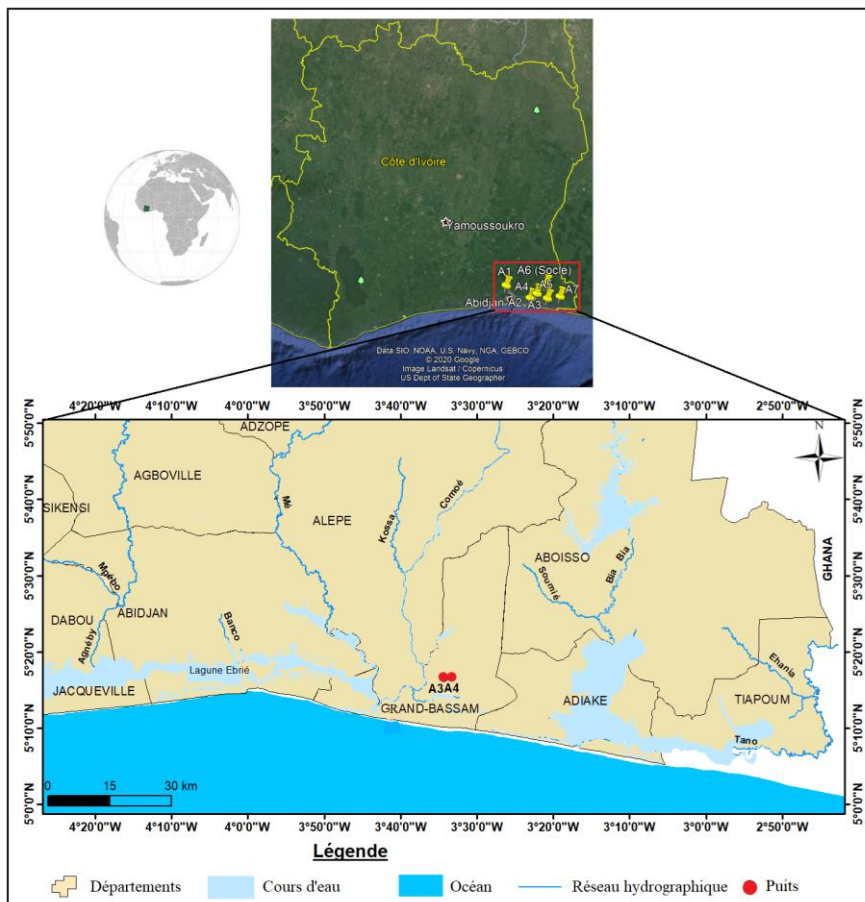


Figure 1. Situation géographique des forages A3 et A4

2. Methodologie

2-1. Etude granulométrique

Les échantillons utilisés dans ce travail sont constitués de déblais provenant de deux puits : puits A3 (Bonoua I : 3°34'19.50"W ; 5°16'35.12"N) et puits A4 (Bonoua II : 3°33'15.53"W ; 5°16'41.72"N). Le puits Bonoua II est situé à 1,5 km du puits Bonoua I. Afin de réaliser l'analyse lithologique, les

sédiments prélevés ont d'abord subi une description macroscopique pour déterminer leur couleur, leur nature (sables ou argiles) et la présence ou non de macrofossiles. Ensuite, ils ont été lavés à l'eau de robinet et séchés à l'étuve de 80°C à 100°C. Une masse de 100 grammes de chaque échantillon a été passée sur une colonne de 16 tamis de type AFNOR. Les refus ont été mesurés sur une balance électronique de type « Scouttm Pro ». Au total 179 échantillons sableux sur un total de 240 ont été traités. Les courbes cumulatives et les paramètres granulométriques obtenus par la méthodologie classique en sédimentologie ont été interprétés.

2-2. Etude hydrodynamique

Cette étude consiste à déterminer les conditions hydrodynamiques sédimentaires ou hydrosédimentologiques du milieu de dépôt des sédiments sableux c'est-à-dire à déterminer l'énergie de dépôt des sédiments. Elle se fait par la détermination des indices d'énergies (totaux et segmentaires) qui reflètent les énergies de dépôt en fonction des classes granulométriques définissant ainsi les conditions de mise en place des aquifères. Pour Rivière (1977), les courbes granulométriques cumulatives peuvent être représentées par des courbes du type : $Y = ax^N + b$. L'exposant N ou n (sachant que $n = N - 1$, d'où $N = n + 1$) est l'indice d'évolution et caractérise la courbure et le sens de la concavité de la courbe. Il est représentatif des conditions énergétiques dans le milieu transporteur. L'évaluation de N peut se faire par calcul à partir de G et de X moyenne logarithmique.

2-2-1. Détermination et signification des indices totaux

Rivière (1952) a proposé un certain nombre de paramètres et d'indices qui permettent de définir les faciès granulométriques : la moyenne logarithmique \bar{X} avec $\bar{X} = \log x (\mu\text{m}) * 10^{-2}$; l'indice d'évolution granulométrique N ; l'indice de maturation $Ma = N - Nr$ avec $Nr = 0,34228 \bar{X} - 0,82509$; Nous avons déterminé la valeur de N à partir d'un abaque (Figure 2) utilisé par Mamadou (1986).

X100 ou X0 représente le logarithme du diamètre maximum de la distribution. La constante 0,8 qui est ici une extrapolation autorisée selon Baltzer (1982) et Pimmel (1984), représente le logarithme du diamètre minimum (correspondant à 0,06 μm) que l'on peut atteindre par la technique sédimentométrique.

$$Y = 20 \log \left(\frac{X100 - 0,8}{\bar{X} - 0,8} - 1 \right) \text{ et } G = X100 - 0,8$$

Vue la convention de la construction en vigueur (la courbe cumulative évoluant des fractions grossières vers les fines), X100 correspond à X0 et les relations deviennent :

$$Y = 20 \log \left(\frac{X0 - 0,8}{\bar{X} - 0,8} - 1 \right) \text{ et } G = X0 - 0,8$$

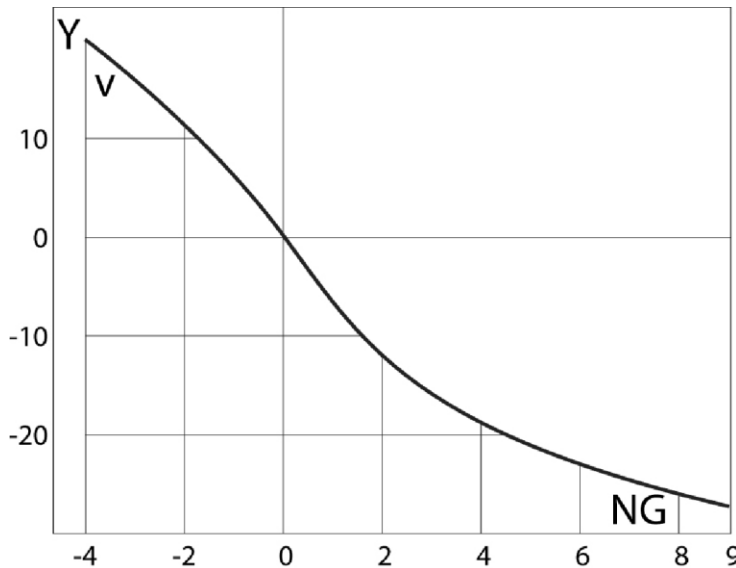


Figure 2. Détermination graphique de l'indice global d'évolution N en fonction de \bar{X} et X100, (Mamadou, 1986)

Tableau I. Différents granofaciès et leur signification (Baltzer, 1982)

N	INDICES		Concavité de la courbe		GRANOFACIÈS ET MODE DE TRANSPORT
	n	Accentuation	Sens: vers		
> 1	> 0	très forte	le haut		ultraparabolique, dépôt lévigé (granofaciès segmentaire et ponctuel seulement)
= 1	= 0	forte	le haut		linéaire
0 < N < 1	-1 < n < 0	variable	le haut		parabolique, dépôt par excès de charge
= 0	= -1	nulle	nul		logarithmique, équilibre avec le courant transporteur
< 0	< -1	variable	le bas		hyperbolique, décantation
< -1	< -2	forte	le bas		infrahyperbolique (granofaciès segmentaire et ponctuel seulement)

Les courbes granulométriques d'échantillons géologiques étant rarement identiques aux courbes théoriques canoniques, Rivière (1957) a distingué plusieurs populations au sein de ces courbes, correspondant chacune à un faciès granulométrique donné car répondant à une courbe en $Y = ax^N +$

b. On distingue donc deux types d'indices de Rivière : N_t ou N , l'indice total valable pour tout le sédiment et N_s , l'indice segmentaire valable pour une population donnée.

2-2-2. Calcul et signification des indices segmentaires

La méthode de construction graphique de la courbe $Y = -X + \log P$, exprimée en coordonnées bi-logarithmiques est la suivante (Figure 3) : détermination graphique, point à point, de la pente de la courbe cumulative ; tracé de $Y = -X$ avec $X = \log x$; tracé de $Y = -X + \log P$ par projection sur la courbe $Y = -X$ des points sur lesquels ont été déterminé la pente sur la courbe cumulative ; addition (point à point) sur la droite $Y = -X$ de la valeur $\log P$, si $P > 1$; ou soustraction de la valeur $\log P$, si $P < 1$; tracé de la courbe segmentaire : les points obtenus sont reliés par des droites dont la pente est l'indice segmentaire partiel.

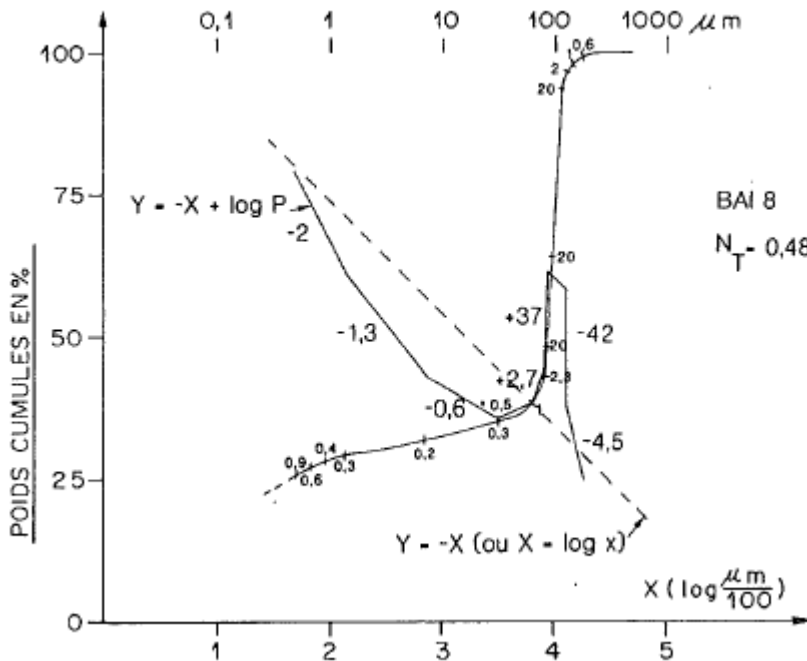


Figure 3. Détermination graphique des indices segmentaires (Pimmel, 1984)

La signification hydrodynamique des indices segmentaires se présente comme suit : le taux de transport (Figure 4a) qui est égal au pourcentage de particules transporté à l'équilibre (Baltzer, 1982 ; Pimmel, 1984) traduit l'importance du transport en distance. Dans ce travail, le transport sera faible : 0-25 % ; moyen : 25-50 % ; élevé : 50-75 % et très élevé : 75-100 %). La compétence de l'écoulement à l'équilibre (Figure 4b) est déterminée par les limites dimensionnelles du segment logarithmique ($n = -1$). Ce segment est

limité par deux tailles exprimées en microns. L'énergie de l'écoulement à l'équilibre est la limite dimensionnelle des particules grossières du segment logarithmique (Figure 4c). L'indice de tri de la fraction grossière correspond aux indices hyperboliques ou infrahyperboliques des particules grossières (1000 μm à 500 μm) et très grossières ($\geq 1000 \mu\text{m}$). Les particules de taille moyenne sont comprises entre 500 μm et 250 μm .

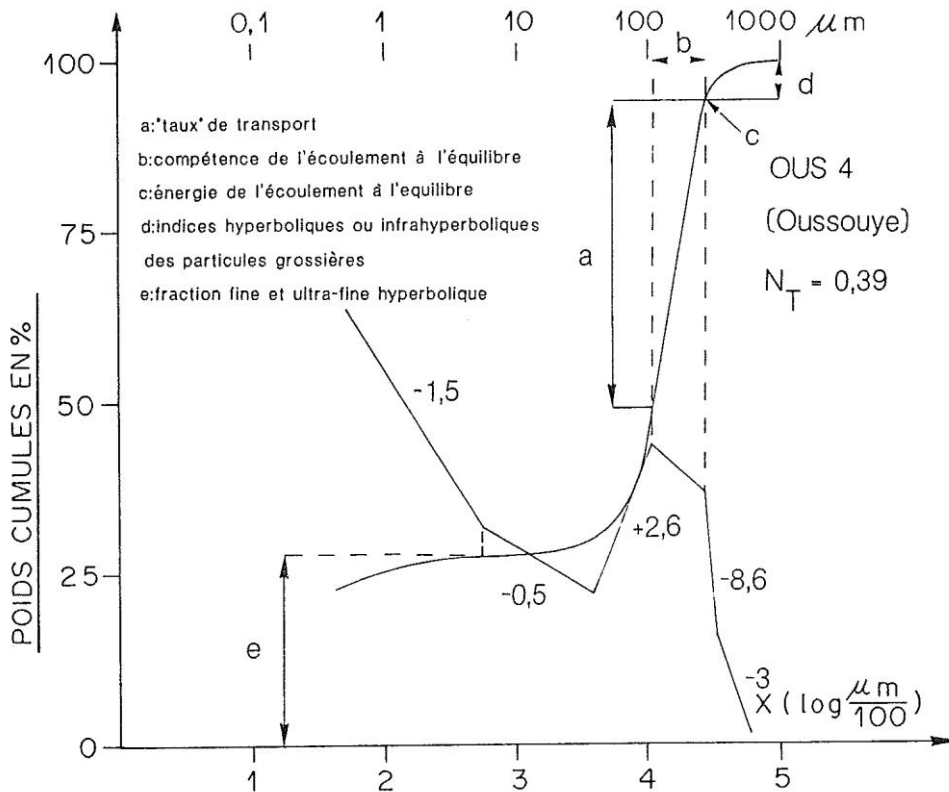
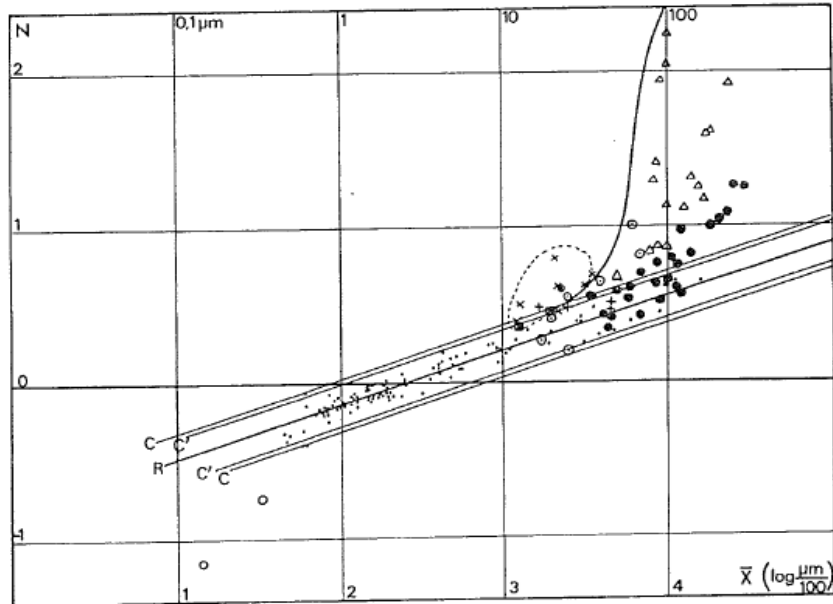


Figure 4. Exemple de détermination des données des indices segmentaires (Pimmel, 1984)

2-3. Corrélation entre l'indice d'évolution N et la moyenne X

Le diagramme N-X (Figure 5) permet de caractériser le processus de mise en place des sédiments. Il permet une différenciation des environnements de dépôt selon que le sédiment a une granulométrie normale ou anormale (Mamadou, 1986).



R : droite de régression ; c,c: intervalle de confiance à 99 %, c'c' à 95 %

Figure 5. Classification dynamique des sédiments (Baltzer, 1982 ; Pimmel, 1984 ; Mamadou, 1986)

3. Resultats et interpretation

3-1. Lithologie, granulométrie, morphoscopie et mode de transport des sédiments des puits étudiés

3-1-1. Puits Bonoua I (A3)

La coupe lithologique du puits Bonoua I (A3) de la figure 6 indique le découpage du puits de 121,42 m de profondeur. Il s'agit des sables, des argiles sableuses et des argiles. Ces unités numérotées de 1 à 6 sont réparties dans le sens de la sédimentation comme suit : 1 pour le sable grossier (121,42-72 m) ; 2 pour l'argile bariolée sableuse (72-68 m) ; 3 pour le sable très grossier (68-65 m) ; 4 pour le sable grossier (65-30 m) ; 5 pour l'argile latéritique (30-1 m) et 6 pour la terre de barre (1-0 m).

L'analyse granulométrique révèle des courbes cumulatives de type sigmoïde ou hyperbolique et logarithmique qui s'alternent. Dans l'ensemble des niveaux sableux, les valeurs des moyennes granulométriques montrent des sables grossiers (66,66 %) et des sables très grossiers (33,33 %). Les valeurs des écart-types sont à 83,33% comprises entre 0,19 et 0,34 témoignant des sables très bien classés sauf à 71 m et à 49 m de profondeur où ils sont bien classés (16,67 %). Les valeurs de skewness révèlent quatre types de sables. Il s'agit des sables presque symétriques, des sables à asymétrie vers les fins, ceux présentant une symétrie à asymétrie vers les fins et les sables de symétrie à asymétrie vers les grossiers.

La saltation (82 %) est le mode de transport dominant des sédiments de Bonoua I sauf à 71 m de profondeur où le mode de transport dominant est transitionnel et qualifié de transport traction-saltation (60 %). Le segment P'2 (mode de transport, Figure 6) a une pente supérieure au segment P2. Les sédiments de la population P'2 sont donc mieux classés que ceux de la population P2. Les sables seraient transportés dans un milieu de type fluviatile. Par ailleurs l'existence des deux populations P2 et P'2 suggère que les sables sont marins littoraux.

Au plan morphoscopique, les grains de quartz de Bonoua I sont de forme anguleuse (12 %), subanguleuse (10 %), subarrondie (16 %), arrondie (40 %) et très arrondie (14 %). Ces grains sont propres et translucides. L'aspect émoussé luisant (76 %) des grains indique un transport en milieu aqueux. La rencontre de grains multiformes à une même profondeur suggère que ceux-ci sont d'origines diverses et seraient transportés dans des conditions hydrodynamiques différentes.

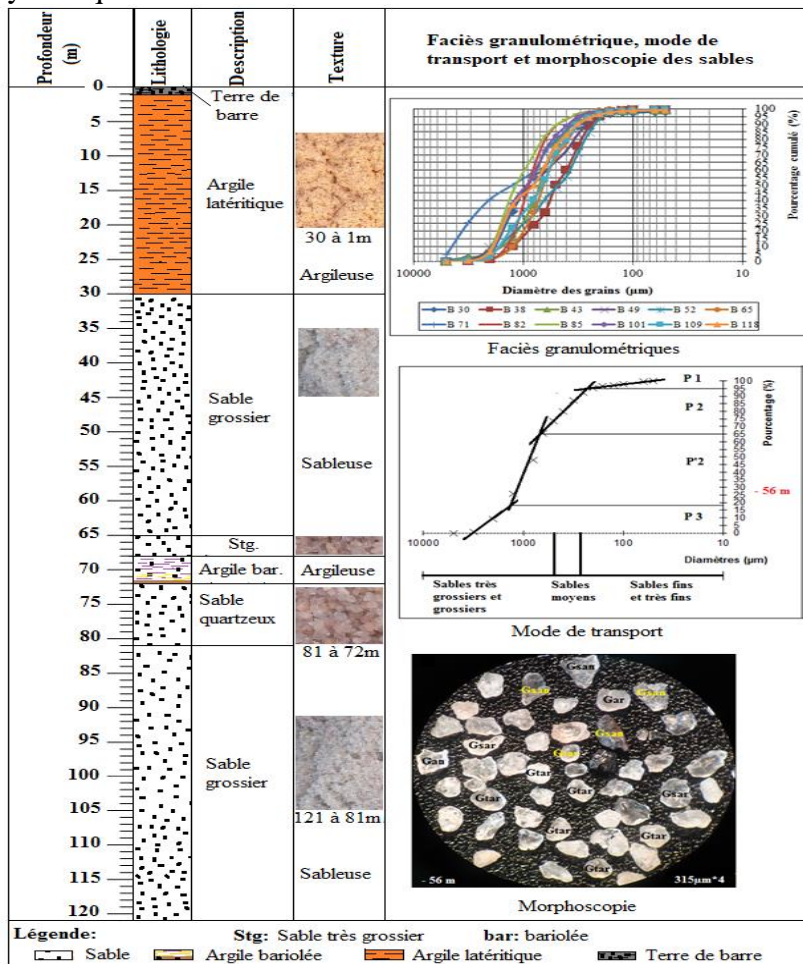


Figure 6. Coupe lithologique du puits Bonoua I (A3)

3-1-2. Puits Bonoua II (A4)

La coupe lithologique du puits Bonoua II (A4) de la figure 7 indique le découpage du puits de 121,5 m de profondeur. Il s'agit des sables, des sables argileux, des argiles sableuses et des argiles. On distingue six unités numérotées de 1 à 6 et réparties dans le sens de la sédimentation comme suit : 1 pour sables (121,5-59 m) ; 2 pour argile bariolée (59-57 m) ; 3 pour sable quartzeux (57-31 m) ; 4 pour argile sableuse (31-26 m) ; 5 pour argile latéritique (26-1 m) et 6 pour terre de barre (1-0 m).

L'analyse granulométrique des sables révèle des courbes cumulatives de type sigmoïde (logarithmique) et parabolique. La valeur de la moyenne granulométrique est égale à 1266,67 μm pour la cote 117 m. Ces sables sont très grossiers (14,29 %). Les autres valeurs sont toutes comprises entre 500 μm et 1000 μm indiquant ainsi des sables grossiers (85,71 %).

Pour l'ensemble des niveaux sableux, les valeurs des écart-types sont comprises entre 0,08 et 0,23 montrant que ces sables sont tous très bien classés (100 %). Les valeurs de skewness traduisent une asymétrie vers les fins sauf pour la cote 117 m où on a une symétrie à asymétrie vers les grossiers (-0,08) et la cote 52 m où il y a une forte asymétrie vers les éléments fins (2,12). La saltation ($P_2 + P'_2$) reste le mode de transport dominant (soit 93%) des sédiments. Les sédiments de la population P'_2 sont mieux classés que ceux de la population P_2 . Les sables ont été transportés dans un domaine de type fluvial. L'existence des deux populations P_2 et P'_2 suggère que les sables sont marins littoraux.

La morphoscopie des grains de quartz révèle des formes anguleuses (4,35 %), subarrondies (53,57 %) et arrondies (13,04 %) à faibles sphéricités mais rarement très arrondies (4,35 %) à sphéricité élevée. Ces grains sont translucides. Leur aspect émoussé luisant (95,65 %) indique un fort effet du milieu aqueux pendant le transport. La rencontre de grains multiformes à une même profondeur suggère que ceux-ci sont d'origines diverses et seraient transportés dans des conditions hydrodynamiques différentes.

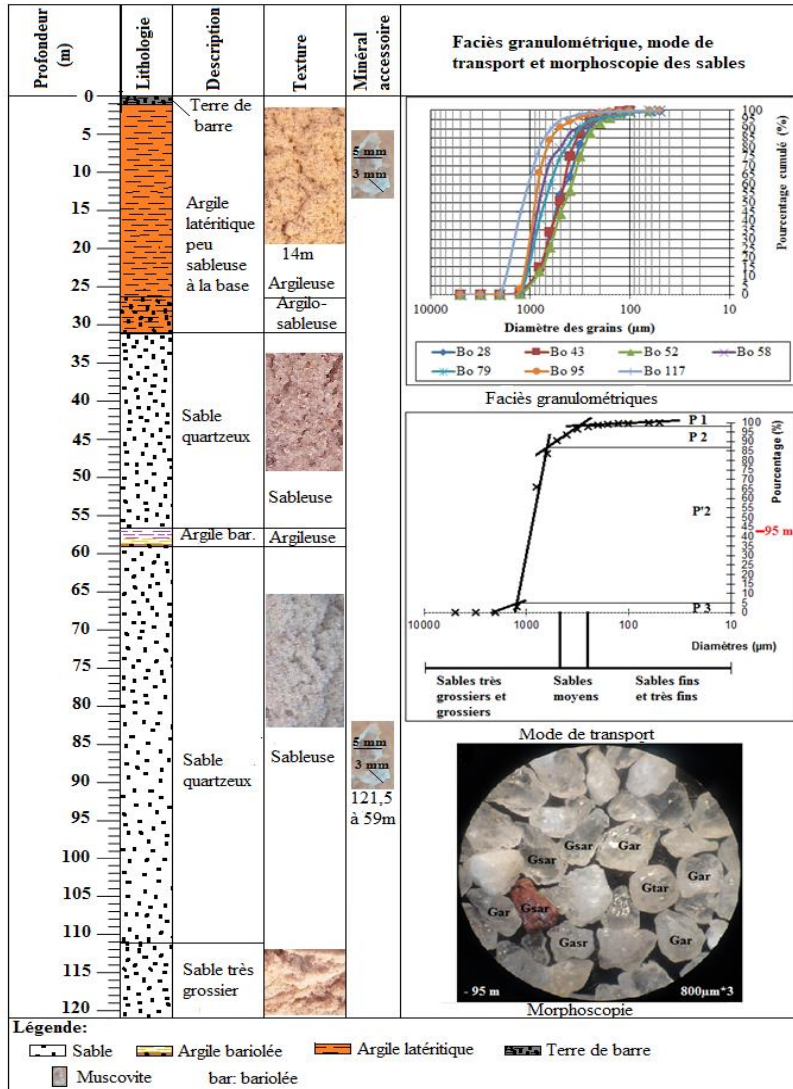


Figure 7. Coupe lithologique du puits Bonoua II (A4)

3-2. Hydrodynamisme des sédiments (hydrosédimentologie) des formations aquifères

3-2-1. Puits Bonoua I (A3)

3-2-1-1 : Indices totaux Nt

Les valeurs des indices totaux sont soit décroissantes soit croissantes. Du fond du puits jusqu'à 82 m, les indices totaux connaissent une diminution régulière. Le faciès total est de type parabolique à 109 m. Il devient logarithmique de 109 à 85 m puis hyperbolique à 82 m. Le granofaciès est de type logarithmique du fond du puits jusqu'à 85 m mais de type parabolique à 82 m. De 82 m à 43 m, les indices totaux connaissent une augmentation

régulière passant du faciès total hyperbolique à 82 m de profondeur au faciès total logarithmique à 71 m, subparabolique de 65 m à 55 m de profondeur puis au faciès total parabolique à 43 m de profondeur. Le granofaciès est de type logarithmique de 71 m à 65 m, composite (hyperbolique et logarithmique) à 52 m et à nouveau logarithmique de 49 m à 43 m. De 43 m à 30 m, les indices totaux connaissent une diminution à nouveau passant du faciès total parabolique de 43 m à 38 m de profondeur, au faciès total subparabolique entre 38 m et 34 m puis au faciès total hyperbolique à 30 m de profondeur. Le granofaciès segmentaire est de type logarithmique. Les sédiments à faciès parabolique sont déposés par excès de charge en déséquilibre avec le courant transporteur et suggère un dépôt non loin du lieu d'érosion. Les sédiments à faciès logarithmique sont déposés par excès de charge à l'équilibre avec le courant après un long transport.

3-2-1-2. Indices segmentaires Ns

Variation du taux du transport ou TT : d'une manière générale, du fond du puits jusqu'à 82 m (Figure 8-b), l'importance du transport diminue de 86 % à 64 %. Il est dit élevé ; de 82 m à 65 m, le transport augmente de 64 % à 88 % avant de diminuer globalement de 88 % à 46,25 % entre 65 m à 38 m. Le transport est dit élevé à moyen. Il augmente à nouveau de 46,25 % à 74 % de 38 m à 30 m. Il est dit moyen à élevé. Les particules de 52 m enregistrent le plus faible taux de transport (38 %).

Compétence de l'écoulement à l'équilibre ou CEE : la compétence (Figure 8-c : zone en gris) qui est moyenne du fond du forage jusqu'à 82 m, augmente de 82 m à 71 m puis diminue et reste plus ou moins constante de 65 m à 30 m.

Energie de l'écoulement à l'équilibre ou EEE : l'énergie de l'écoulement à l'équilibre (Figure 8-c : courbe marquée) est constante à 2000 μm du fond du forage jusqu'à 82 m puis augmente à 5000 μm à 71 m de profondeur avant de diminuer à 1250 μm où elle reste plus ou moins constante jusqu'à 30 m. Ces variations correspondent aux variations lithologiques. L'énergie de l'écoulement à l'équilibre est maximale dans le niveau argileux car ce dernier renferme des granules de 5000 μm qui seraient cogénétiques à l'argile.

Indices de tri des particules grossières ou IDT : D'une manière générale, les valeurs des indices de tri (Figure 8-d) ont comprises entre -0,9 et -2,2. Elles sont constantes à -1,1 du fond du forage jusqu'à 82 m. La constance de l'énergie de l'écoulement à l'équilibre à 2000 μm sur ce même intervalle suggère que cet indice est capable de trier les particules très grossières. A 71 m, l'indice de tri est -1,2. De 71 m à 30 m, les indices sont demeurés inférieurs à -1,2 et l'énergie de l'écoulement à l'équilibre y varie montrant que ces

indices ne sont pas capables de trier les particules grossières ou une classe granulométrique donnée.

Comportement de la fraction fine et/ou ultrafine ou PF-PU : la fraction fine (Figure 8-g) dérive d'un granofaciès de type parabolique à ultraparabolique sauf de 85 m à 82 m, puis de 65 m à 52 m où elle est hyperbolique. La fraction fine se corrèle toujours avec le pourcentage de particules, à faciès logarithmique, transportées à l'équilibre sauf à 52 m et à 30 m où il n'y a pas de corrélation. Cette corrélation signifie que l'écoulement responsable du dépôt des particules fines est cogénétique de celui à l'équilibre. Les fines ont été piégées par les sédiments grossiers transportés à l'équilibre. Ce piégeage pourrait diminuer la porosité voire la perméabilité de l'aquifère. Cependant, il demeure un bon aquifère grâce à la faible proportion des particules fines ($PF \leq 2,6 \%$) et de ce que ce piégeage diminuerait quand l'importance du transport augmenterait vue la corrélation négative. A 52 m et à 30 m, la fraction fine n'a pas été piégée par la fraction transportée à l'équilibre. Ces deux populations ne sont pas cogénétiques et n'ont été mélangées qu'après le dépôt.

3-2-1-3. Corrélation X, Nt : les points représentatifs des échantillons du forage Bonoua I ne sont pas tous compris dans l'intervalle de confiance de la régression (Figure 8-h), notamment ceux de 109 m, 52 m, 43 m et 38 m de profondeur. Ce fait traduit un caractère de maturation ($0 < Nt < 1 ; 4,8 \leq X \leq 4,9$). Cette maturation (Ma) égales à -0,72 et d'origine fluviale (aspect luisant dominant des grains de quartz) serait de sources diverses. Celle de 109 m est due à un long transport (86 %) par l'eau alors que celles de 52 m, 43 m et 38 m sont engendrées par un changement climatique qui aurait provoqué une crue à l'origine de l'élévation des indices totaux Nt.

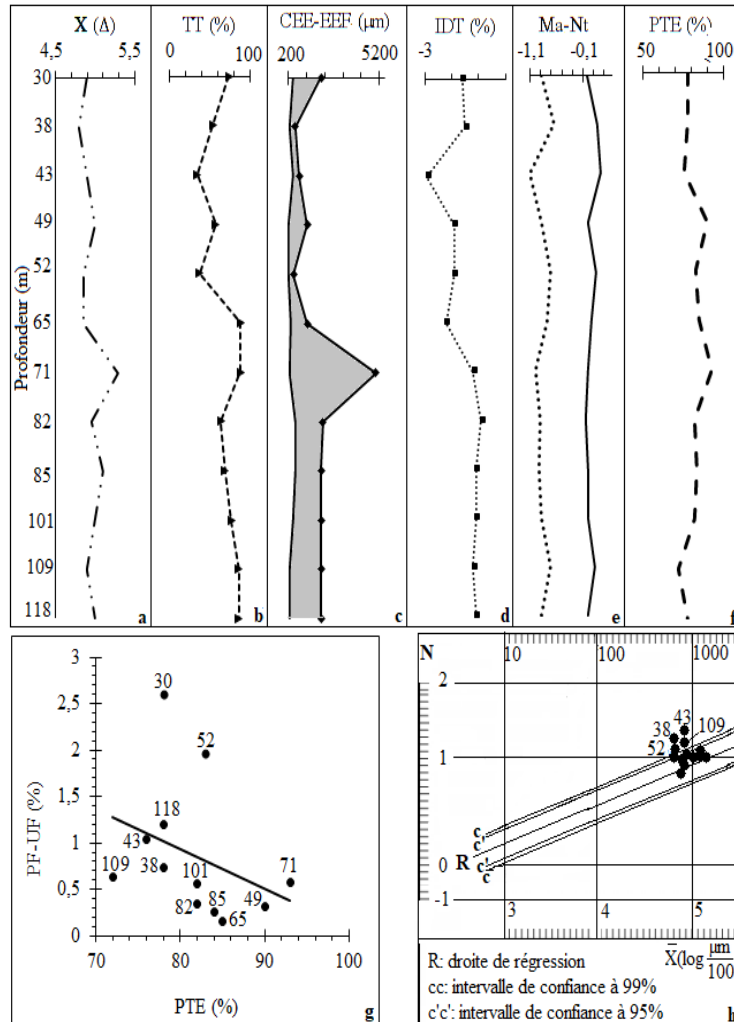


Figure 8. Corrélation des indices totaux et segmentaires (hydrodynamiques : a à f) ; corrélation du pourcentage de particules fines et/ou ultrafines par rapport au pourcentage de particules transportées à l'équilibre (g) et corrélation entre la moyenne X et Nt (h).

3-2-2. Puits Bonoua II (A4)

3-2-2-1 : Indices totaux Nt

Les valeurs des indices totaux sont soit décroissantes soit croissantes. Du fond du puits jusqu'à 58 m, les indices totaux connaissent une diminution passant du faciès total logarithmique au faciès total hyperbolique. Le granofaciès segmentaire est de type hyperbolique. De 58 m à 52 m, l'indice total passe du faciès total hyperbolique au faciès total parabolique. Le granofaciès est de type logarithmique à 52 m. De 52 m à 28 m, les indices totaux diminuent à nouveau passant du faciès total parabolique de 52 m à 43 m au faciès total logarithmique à 28 m. Les sédiments à faciès parabolique

sont déposés par excès de charge en déséquilibre avec le courant transporteur alors que les sédiments à faciès logarithmique sont déposés par excès de charge à l'équilibre avec le courant.

3-2-2-2. Indices segmentaires Ns

Variation du taux du transport ou TT : d'une manière générale, l'importance du transport (Figure 9-b) diminue du fond du puits jusqu'à 28 m. Il est dit élevé (78 % à 64 %).

Compétence de l'écoulement à l'équilibre ou CEE : la compétence (Figure 9-c : zone en gris) observe une diminution régulière depuis le fond du forage jusqu'en subsurface à 28 m.

Energie de l'écoulement à l'équilibre ou EEE : l'énergie de l'écoulement à l'équilibre (Figure 9-c : courbe marquée) diminue de 2000 μm à 1250 μm du fond du forage jusqu'à 95 m. Elle reste constante à 1250 μm jusqu'à 58 m avant de diminuer à nouveau de 1250 μm à 800 μm entre 58 m et 28 m.

Indices de tri des particules grossières ou IDT : D'une manière générale, les valeurs des indices de tri (Figure 9-d) diminuent du fond jusqu'en subsurface et varient entre -0,1 et -2,3. Elles sont comprises entre -0,1 et -0,5 du fond du forage jusqu'à 58 m et l'énergie de l'écoulement à l'équilibre est constante à 1250 μm sur ce même intervalle. Les valeurs de l'indice de tri sont comprises entre -1 et -2,3 de 58 m à 28 m avec des particules de 800 μm .

Comportement de la fraction fine et/ou ultrafine ou PF-PU : la fraction fine (Figure 9-g) dérive d'un granofaciès de type parabolique à ultra parabolique ($N_t > 1$) ou linéaire ($N_t = 1$) à 95 m. Les particules fines et celles transportées à l'équilibre sont cogénétiques à 58 m, 43 m et 28 m. Les fines ont été piégées par les sédiments à l'équilibre. Le pourcentage de particules fines est faible ($PF \leq 2,47 \%$) et ne sont pas cogénétiques aux particules transportées à l'équilibre de 117 m à 79 m et à 52 m. La fraction fine n'a donc pas été piégée par la fraction transportée à l'équilibre. Ces deux populations n'ont été mélangées qu'après le dépôt. Cette absence de piégeage augmente la porosité et la perméabilité de l'aquifère.

3-2-2-3. Corrélation X, Nt : les points (Figure 9-h) représentatifs des échantillons du forage Bonoua II ne sont pas tous compris dans l'intervalle de confiance de la régression, notamment à 52 m et 43 m et 38 m. Ce fait traduit un caractère de maturation ($0 < N_t \leq 1$; $X = 4,7$). Les valeurs de la maturation (Ma) sont supérieures ou égales à -0,67. L'absence de faune marine ne suggère pas une origine marine de cette maturation. Elle serait d'origine fluviale (aspect luisant dominant des grains de quartz) certainement due à un long transport (74 % à 64 %) dans le milieu aqueux.

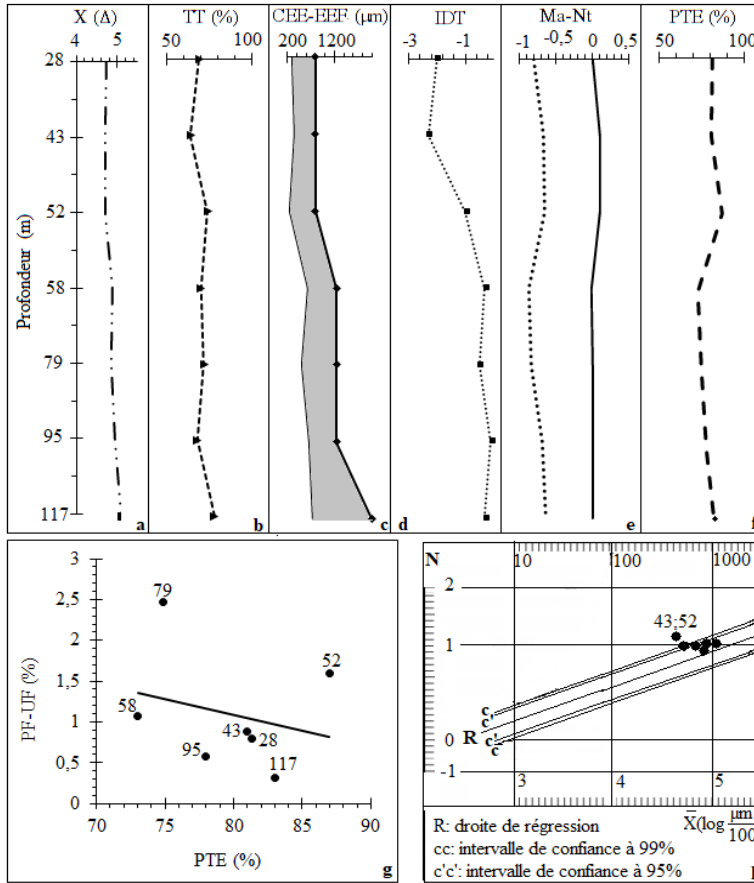


Figure 9. Corrélation des indices totaux et segmentaires (hydrodynamiques : a à f) ; corrélation du pourcentage de particules fines et/ou ultrafines par rapport au pourcentage de particules transportées à l'équilibre (g) et corrélation entre la moyenne X et Nt (h).

3-3. Corrélation hydrodynamique et cartographie des aquifères de Bonoua

Le tracé (Figure 10-A) des isogrades (courbe d'égal indice Nt) et la variation des faciès granulométriques ont permis de mettre en évidence la répartition des différentes classes granulométriques. La variation de la moyenne granulométrique montre une diminution de Bonoua I à Bonoua II. La moyenne diminue de 873,33 μm à 513,33 μm (43 m), de 766,67 μm à 503,33 μm (52 m) et de 1900,00 μm à 71 m (Bonoua I) à 800,00 μm à 58 m (Bonoua II). La variation de la moyenne granulométrique (dans les deux puits) couplée à celle des faciès granulométriques ont permis de déterminer le sens du paléocourant (Figure 10-B). Le courant ayant présidé au dépôt des trois aquifères I, II et III, était fort à Bonoua I et diminuait en direction de Bonoua II. Les aquifères II et III forment un seul aquifère car ils ne sont pas séparés par une formation imperméable.

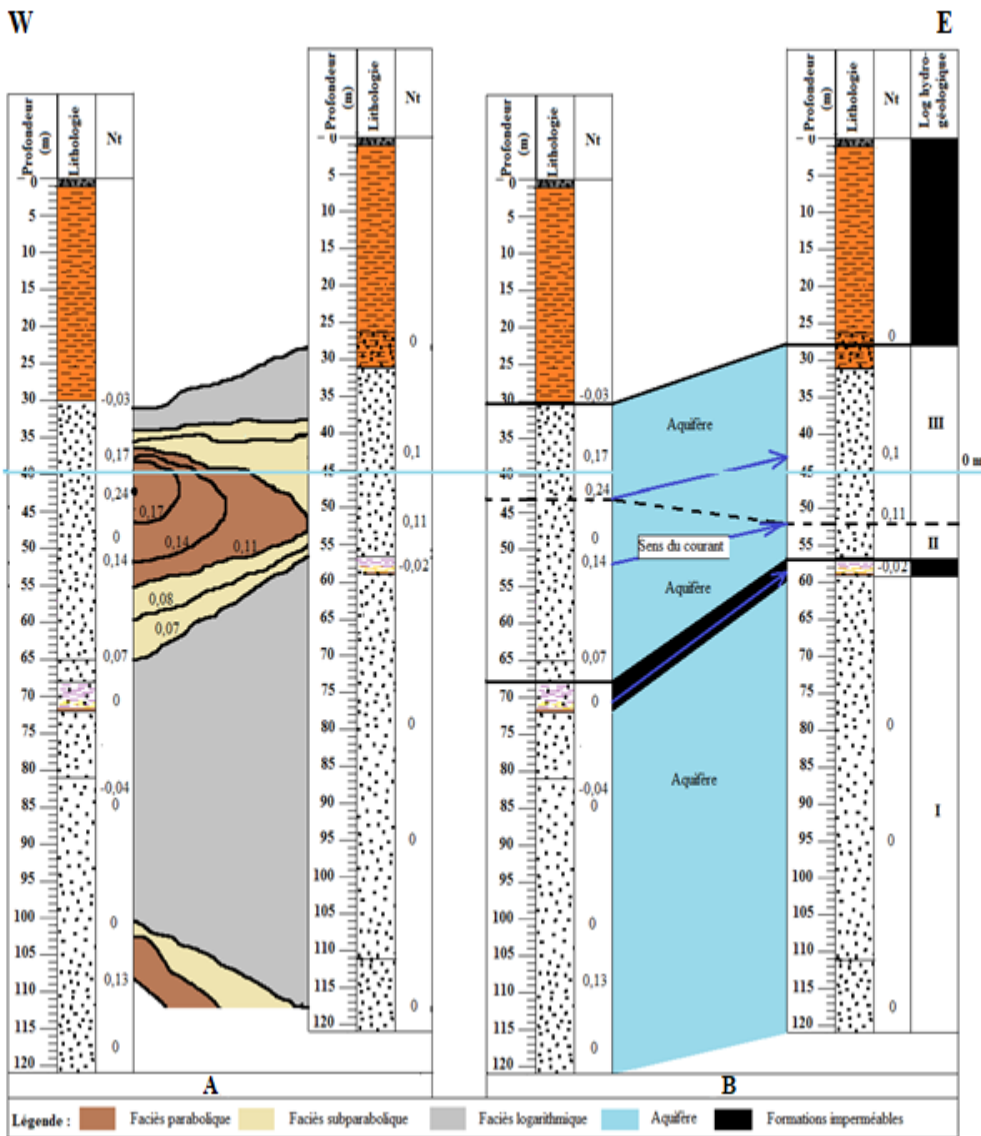


Figure 10. Cartographie des isogrades Nt (A) et des aquifères (B)

3-4. Caractérisation du système aquifères de Bonoua

Trois aquifères ont été distingués dans la zone d'étude. Les aquifères II et III ne constituent qu'un seul car il n'y a pas de formation imperméable qui les sépare. Les aquifères I et II sont séparés par de l'argile bariolée qui se présente en biseau. Finalement, on a un seul aquifère qui se différencie en deux ou trois aquifères en fonction de la zone dans un contexte de paléogéographie. La strate sableuse rencontrée au fond des puits fait plus de 49 m d'épaisseur à Bonoua I et 62,5 m à Bonoua II. Les arrivées d'eau y ont été observées. Cette formation qui constitue l'aquifère (I) principal est surmontée d'un niveau

d'argile bariolée de faible épaisseur qui en est le toit. Il se situe à 64,5 m en moyenne et est exploité pour l'alimentation en eau potable de la population riveraine. Sa puissance augmente de l'Ouest à l'Est. L'équipement des forages a été exécuté en retenant cette formation comme la zone de captage de la nappe. A Bonoua I, l'aquifère est caractérisé par un faciès logarithmique (60 %), parabolique (20 %) et hyperbolique (20 %). Les sables sont très bien classés (86,66 %), grossiers (60 %) à très grossiers (40 %) et de forme arrondie (40 %) à subarrondie. A Bonoua II, l'aquifère est caractérisé par un faciès logarithmique (100 %). Les sables sont également très bien classés (100 %), grossiers (66,67 %) à très grossiers (33,33 %) et dominé de forme subarrondie (53,57 %). Un bon aquifère est fondamentalement lié au bon classement des particules que par la taille des particules même si elle est demeure importante.

4. Discussion

L'étude lithologique à Bonoua montre des sables, des argiles sableuses et des argiles qui définissent des aquifères homogènes latéralement, continus et très perméables mais d'extension latérale complexe (Aghui et Biémi, 1984 ; Jourda, 2002 ; Kouassi *et al.*, 2014). On rencontre globalement à Bonoua, un seul aquifère qui se décompose en deux (Kouassi *et al.*, 2014) ou trois couche. Les sables majoritairement grossiers sont très bien à bien classés et de faciès parabolique ou logarithmique (Baltzer, 1982 ; Pimmel, 1984 ; Aka, 1991). La lithologie, la granulométrie et la porosité du principal aquifère sont identiques à celui de Dabou (Gbangbot, 2019). La variation de la moyenne granulométrique dans chaque puits laisse paraître un granoclassement positif qui suggère un dépôt de type turbidite (Aka, 1991 ; Fournier *et al.*, 2012). La variation des indices N_t montre une direction NW-SE des paléocourants. Selon Aké (2010) cette direction est NS. La rencontre de grains multiformes à une même profondeur suggère que ceux-ci sont d'origine diverse (Assalé, 2013). Les sédiments sont généralement sujets d'un long transport (64 % à 86 %) qui serait à l'origine de la maturation de certains sédiments ayant un faciès parabolique avec $X > 3,2$ (Pimmel, 1984). Les particules fines présentent un faciès segmentaire de type parabolique à ultraparabolique. Ce résultat ne diffère pas fondamentalement de celui de Pimmel (1984) qui stipule que les fines ont un faciès segmentaire parabolique. Cette étude montre une fraction fine de faible proportion, piégée par les grossières à l'équilibre pendant le dépôt et donc déposée dans un milieu plus au moins agité (Brahim et Abdelfattah, 2009). Dans le cas de Pimmel (1984) cette fraction est importante et s'est déposée dans un milieu calme.

Conclusion

Ce travail a caractérisé les aquifères exploités dans la localité de Bonoua en s'appuyant sur les caractéristiques lithologiques et

hydrodynamiques des sédiments prélevés dans les deux forages exécutés. Les niveaux sableux constituent des aquifères et les argiles, imperméables, forment les murs et les toits de ces aquifères. Les indices d'évolution N, total (Nt) et segmentaire (Ns), définis ont révélé que les sédiments des aquifères sont majoritairement d'un faciès total de type logarithmique. Ces sédiments multiformes d'origine fluviatile ont subi un long transport (par saltation) à l'origine de leur maturation. Elle peut être due au phénomène de crue dans un contexte de changement climatique suggéré par des indices totaux élevés. Les particules très grossières et grossières sont pour la plupart cogénétiques avec la fraction fine selon un système de piégeage des fines par les grossières à l'équilibre. La faible proportion de la fraction fine confère une très bonne porosité et une bonne perméabilité à l'aquifère avec des grains presque homogènes et très bien classés. L'analyse de la variation des indices totaux et celle de la lithologie dans les deux puits a permis de proposer un essai de cartographie satisfaisante de ces aquifères. Cette localité présente un aquifère unique mais avec des caractéristiques lithologiques et hydrodynamiques qui varient d'une zone à l'autre.

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

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

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

Références:

1. AGHUI N. & BIEMI J. (1984). Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan. Risques de contamination. Annales des Sciences Naturelles, Côte d'Ivoire, série C, volume 20, 34 p.
2. AKA K. (1991). La sédimentation quaternaire sur la marge de Côte d'Ivoire : essais de modélisation. Thèse Doctorat Etat, ès Sciences Naturelles, Université Côte d'Ivoire, numéro 146. 233 p.
3. AKE, G. E. (2010). Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, 3^e cycle. Université de Cocody, Abidjan. 207 p.
4. ASSALE Y. (2013). Caractérisation sédimentologique, palynologique, Géochimie et paléoenvironnementale des formations sédimentaires connexes à la faille des lagunes (Est du bassin Onshore, Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, 3^e cycle. Université de Cocody, Abidjan. 401 p.

5. BALTZER F. (1982). Géodynamique de la sédimentation et diagénèse précoce sur un delta tropical à mangroves en domaine ultrabasique (Nouvelle-Calédonie). Thèse, Université Paris Sud - Orsay. 284 p.
6. BRAHIM M. & ABDELFAH A. (2009). Dynamique sédimentaire et répartition granulométrique des sédiments de surface dans la frange littorale Ras Taguermess-Ras Marmour (Golfe de Gabes). Bulletin, Institut Nationale Sciences et Technologie. Volume 36. 19 p.
7. DJAA K. A., TAPE Z. P., & KARIM B. (2014). Le secteur de l'eau en République de Côte d'Ivoire, Swelia, le réseau des entreprises du cycle de l'eau, 15 p.
8. FOURNIER J., BONNOT-COURTOIS C., PARIS R., & LEVOT M. (2012). Analyses granulométriques, principes et méthodes. Centre National de Recherche Scientifique, Dinard, 100 p.
9. GBANGBOT J-M. K. (2012). Caractérisation stratigraphique des aquifères des formations de subsurface de la région des lagunes de côte d'ivoire : essai de modélisation des environnements de dépôts du Tertiaire. Thèse de Doctorat, 3ème cycle. Université Cocody, Abidjan. 196 p.
10. GBANGBOT J-M. K., YAO N. J. P., NIANGORAN K. C., & SORO G. (2019). Caractérisation lithostratigraphique et hydrodynamique de deux puits dans la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire). Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences. Vol. 10, No. 1. 12 p.
11. JOURDA J-P. (2002). Les ressources en eau souterraine de la Côte d'Ivoire et le cas des aquifères transfrontaliers entre la Côte d'Ivoire et le Ghana.
12. KOUAME K. J., AKE G. E., KOBLAN A. K., DJE K. B., & JOURDA J. P. (2017). Simulation de l'évolution du rabattement de la nappe de Bonoua (Sud-Est, Côte d'Ivoire) par modélisation hydrogéologique. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, numéro 32, 23 p.
13. KOUASSI A. K., KOUASSI F. W., MANGOUA J. O. M. & ISSIAKA S. (2014). Modèle conceptuel de l'aquifère du Continental Terminal d'Abidjan. Environmental and Human Dimensions Proceedings of Friend-Water, Montpellier, France, International Association of Hydrological Sciences, 19 p.
14. MAMADOU F. (1986). Environnements sédimentaires quaternaires et actuels des tourbières des niayes de la grande côte du Sénégal. Thèse de Doctorat, 3e cycle, sédimentologie, Université Dakar, 153 p.
15. PIMMEL A. (1984). Contribution à l'étude sédimentologique des mangroves de Casamance (Sénégal) : étude granulométrique et exoscopique. Thèse de Doctorat de spécialité, 3ème cycle géologie, Institut de Géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France,

- 132 p. RIVIERE A. (1952). Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. Bulletin, Société Géologique Française, 155 p.
16. RIVIERE A. (1957). Sur le caractère intrinsèque de l'indice d'évolution de la méthode des faciès granulométriques. Comptes Rendus Académie des Sciences, 244 p.
17. RIVIERE, A. (1977). Méthodes granulométriques, techniques et interprétation, Paris, Masson, 170 p.
18. VERNHET S. & RIVIERE A. (1976). Interprétation sédimentologique des paramètres granulométriques X et N. Notion d'évolution granulométrique normale. Distributions granulométriques anormales. Indice de maturation. Comptes Rendus Académie des Sciences. 18 p.