

Productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)

Productivity of water wells in crystalline and crystallophyllian environment in Daoukro region (center-east of the Ivory Coast)

Odile BLE Louan^{1*}, Soro Tanina¹, Ake Gabriel Etienne¹, Ahoussi Ernest Kouassi¹, Marie Solange OGA¹, Jean Biémi¹, Akossi Douampo²

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE)
UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody
22 B.P. 582 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire)

²Bureau National d'Etude Technique et de Développement (BNETD), section hydraulique 04 BP 945
Abidjan Côte

Soumis le : 15.05.2014

Révisé le 22.12.2014

Accepté le : 07.01.2015

Résumé

L'évaluation du potentiel des ressources en eau souterraine de la région de Daoukro passe par une approche qui prend en compte la variabilité climatique, l'épaisseur des altérites, la profondeur totale des forages et les débits d'exploitation. Une analyse statistique des données pluviométriques s'étalant sur 65 ans et des paramètres hydrogéologiques de 64 forages a été effectuée afin d'apprécier la productivité des forages d'eau de la région. Les résultats du bilan hydrologique montrent que la région de Daoukro reçoit en moyenne 1179,8 mm de pluie par an et la quantité d'eau infiltrée est de 305,2 mm soit 25% des précipitations.

Les formations géologiques rencontrées sont des roches cristallines et cristallophylliennes dont les transmissivités varient de $1,0310^{-4}$ à $3,4610^{-4}$ m²/s pour les schistes et de $2,3810^{-7}$ à $2,610^{-4}$ m²/s pour les granites. L'influence de l'épaisseur des altérites n'est pas linéaire, cependant celles qui sont productives varient entre 60 et 80 m. La profondeur totale des forages n'influence pas la productivité de ceux-ci parce que les débits les plus élevés 36m³/h sont obtenus autour de 70 m pour les deux types de formation géologique. Les formations schisteuses qui représentent 80% des formations géologiques de la région sont en général les plus productives.

L'analyse statistique multivarée dont l'Analyse en Composante Principale Normée (ACPN) a été utilisée pour d'une part mettre en évidence les phénomènes à l'origine de la productivité des forages et d'autre part la mise en évidence des phénomènes de minéralisation des eaux de ladite localité.

Mots clés : Productivité - variabilité climatique- cristallophylliennes- transmissivité

Abstract:

The subterranean evaluation of the potential of the water resources of the region of Daoukro passes by an approach which takes into account the climatic variability, the thickness of altérites, the total depth of the drillings and the debits of exploitation. A statistical analysis of the pluviometric data spreading out over 65 years and hydrogeological parameters of 64 drillings was made to appreciate the productivity of the drillings of water of the region. The results of the hydrological balance assessment show that the region of Daoukro receives on average 1179,8 mm of rain a year and the quantity of infiltrated water is 305,2 mm that is 25 %. The geological formations are crystalline rocks and cristallophylliennes whose transmissivités varies from $1,0310^{-4}$ to $3,4610^{-4}$ m² for schists and of $2,3810^{-7}$ in $2,610^{-4}$ m² for granites. The influence of the thickness of altérites is not linear, however those who are productive vary between 60 and 80 m. The total depth of the drillings does not influence the productivity of these because the debits the most raised a 36m³ / h are obtained around 70 m for both types of geological formation. The slaty formations which represent 80 % of the geological formations of the region are generally the most productive.

The statistical analysis multivarée with which the Analysis in Main Normalized Component (ACPN) was used to highlight on one hand the phenomena at the origin of the productivity of the drillings and on the other hand the highlighting of the phenomena of mineralization of waters of the aforementioned locality.

Key words: Productivity- climatic variability- cristallophylliennes- transmissivité

*Auteur correspondant : louanfr2000@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Les eaux souterraines constituent le troisième réservoir mondial d'eau douce après celui des glaciers et des calottes polaires [1]. L'exploration des eaux en milieu cristallin et cristallophyllien prend en compte deux principaux types de réservoirs se développant, d'une part, dans les altérites et d'autre part, dans les réseaux de fractures. Ces deux types de réservoir sont le plus souvent superposés et constituent un système bicouche [2]. Les premiers, superficiels, ont une fonction essentiellement capacitive et les seconds généralement profonds ont une fonction conductrice [3].

On parle de "productivité" la capacité d'un ouvrage de captage à fournir un débit minimal susceptible d'être exploité. En hydraulique villageoise, les débits recherchés sont généralement inférieurs à 20 m³/h [4]. La majorité de ces eaux est capté dans les roches fracturées du socle cristallin et cristallophyllien avec des débits acceptables. Des études en Afrique de l'Ouest ont montré que l'exploitation des eaux souterraines pouvait être significativement améliorée en captant directement les zones fracturées de la roche saine avec une profondeur optimisée autour de 50 m [5], cependant, d'autres travaux soutiennent que la possibilité d'obtenir des débits productifs est réelle à de grandes profondeurs [6]. Ces dix dernières années le réchauffement climatique de la région, a contribué à la raréfaction de cette ressource. Pour satisfaire les besoins fondamentaux en eau potable des populations rurales, le gouvernement ivoirien a initié plusieurs projets de renforcement des équipements hydrauliques existants sur toute l'étendue du pays. Le "Projet Local de Développement Agricole" (PLDA) notamment a permis la réalisation de 64 forages d'eau dans la région de Daoukro. La présente étude entend montrer les potentialités en eau souterraine de cette région et permettre une optimisation de l'alimentation en eau

potable, au regard des données caractérisant les forages de cette zone. Elle vise en définitive à montrer la relation débits d'exploitation/épaisseurs d'altérite et débits d'exploitation/ profondeur total de forage et la caractérisation hydrodynamique en rapport avec les formations géologiques dans un contexte de variabilité climatique exacerbé. La résolution de cet objectif passe par la caractérisation hydroclimatique et l'optimisation des profondeurs de forage.

1.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le Département de Daoukro est situé dans la région du N'Zi Comoé au Centre-Est de la Côte d'Ivoire, au cœur de l'ancienne boucle du cacao. Il est compris entre les longitudes 3° et 4° Ouest et les latitudes 7° et 8° Nord. Ce département comprend les sous-préfectures d'Ettrokro, Ouéllé Koumanou, Koffi Ségbégbékro et s'étend sur une superficie de 3619 km² (Fig.1).

La pluviométrie moyenne annuelle de 1940 à 2005 est de 1174.5 mm. Le département est drainé par la Comoé et ses affluents et les petits cours d'eau dérivés du Nzi. Les débits des rivières sont très faibles 3m³/h en moyenne pendant les mois de janvier à avril [7]. Les formations géologiques du département de Daoukro sont essentiellement schisteuses avec quelques intrusions granitiques par endroit [8].

L'altération de ces formations produit d'épaisses couches d'altérites dont l'épaisseur varie en moyenne entre 60 et 80 m.

Dans le socle schisteux de Daoukro (fig. 2), les Granitoïdes de la région de sont constituées essentiellement de granites à deux micas, les granites à biotite homogènes et hétérogènes, et de granodiorites. Les métasédiments sont constitués en majeure partie de grès et de schistes. Les grès et filons de quartz entre les feuilletés de schistes peuvent acquérir par endroit une perméabilité de fissure très élevée.

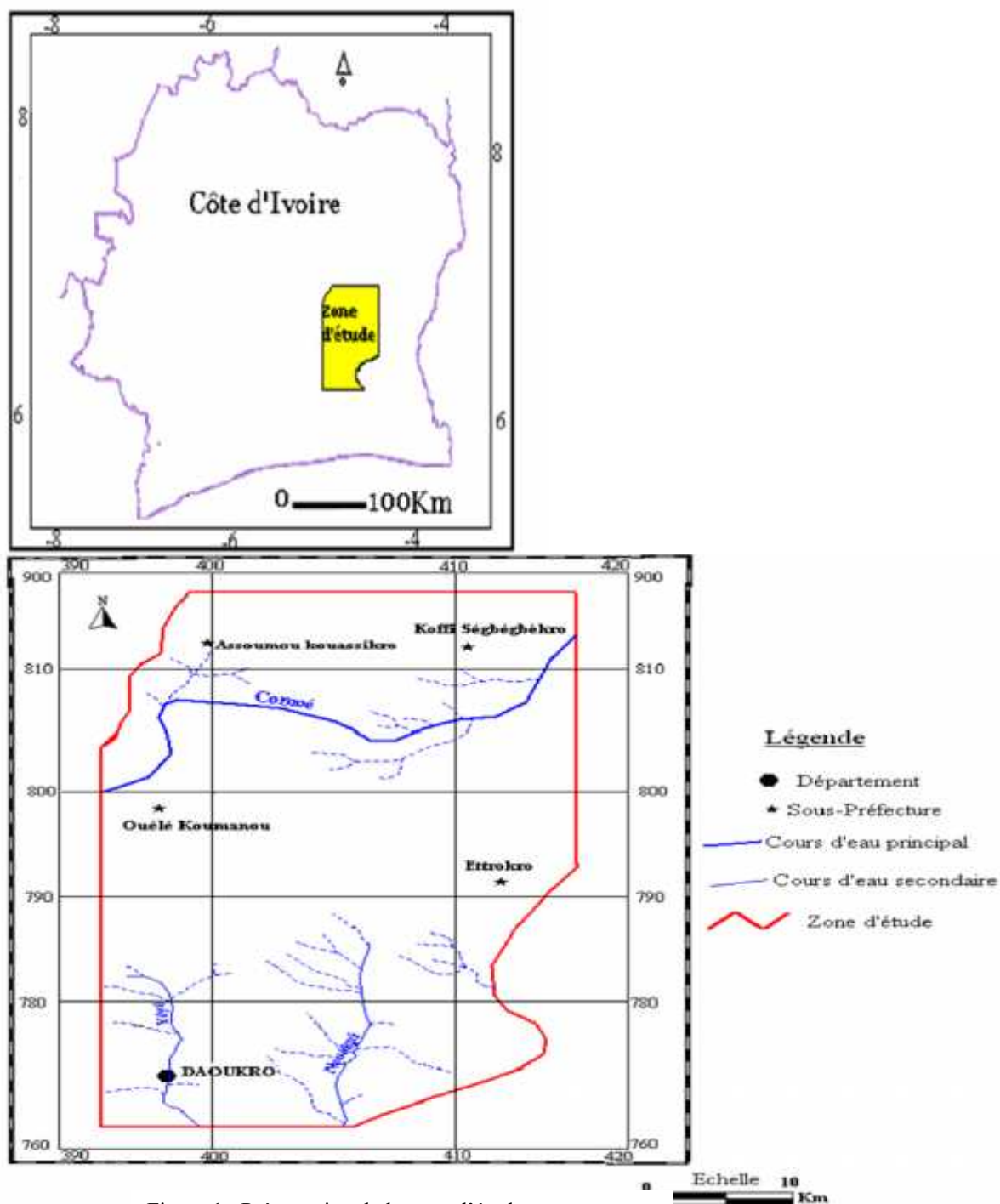


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

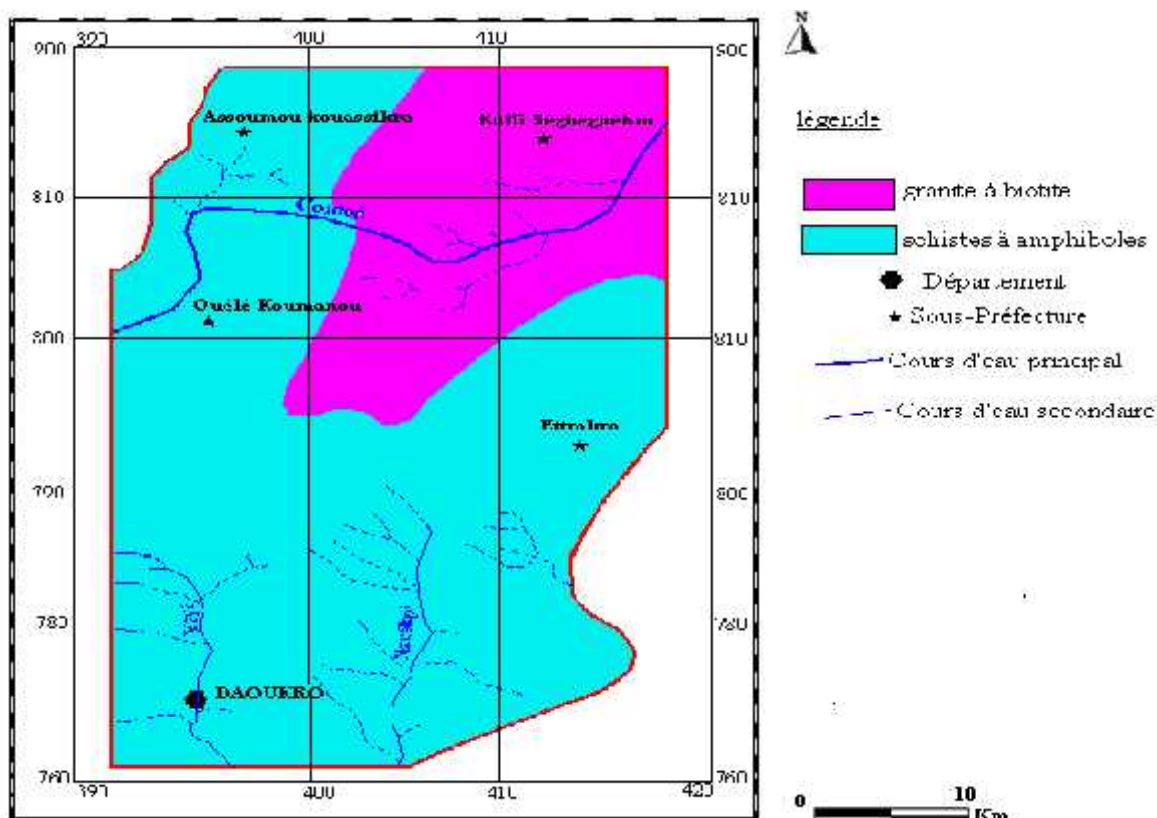


Figure 2: Carte géologique de la zone d'étude

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 Matériel et Données

Les données sont extraites des fiches techniques de forages réalisés lors des campagnes d'hydrauliques villageoise du Projet PLDA de Daoukro en 2005. Les paramètres physiques des forages (température, pH) et les valeurs de transmissivité proviennent de l'exploitation et de l'interprétation des données des essais de pompages de la région, recueillies auprès des services de la section hydraulique du (Bureau National d'Etude Technique et de Développement, BNETD). Les cartes géologiques au 1/5000 sont celles du degré carré de M'bahiakro et de Agnibilékro-dari qui contiennent chacune une portion du département de Daoukro. Les données hydroclimatologiques nécessaires pour la réalisation de cette étude ont été fournies par la Société de Développement et d'Exploitation Maritime et Aéroportuaire (SODEXAM). Les

données pluviométriques proviennent des stations Daoukro et M'bahiakro. Les données

de température sont de la station de Dimbokro. L'étude des paramètres hydroclimatiques permet de comprendre les variations climatiques qui ont affecté la région de Daoukro et surtout de la placer dans un contexte régional. Les effets des variations climatiques présentent parfois des impacts sur les ressources en eau superficielles et souterraines de la région, d'où leur intérêt dans cette étude. Cette variabilité climatique a été caractérisée par une étude de l'évolution de la pluviométrie sur 65ans.

2.2 METHODOLOGIE

2.2.1 Les Variables Centrées Réduites : Indice de Nicholson

Plusieurs approches permettent d'identifier les variabilités climatiques. Dans notre étude, il a été utilisé la méthode des variables centrées

réduites [9], le filtre passe-bas de hanning d'ordre 2 et le bilan hydrologique.

Nous avons utilisé des données qui s'étendent sur une période de 65 ans. Ceci est en accord avec les exigences [10] qui explique qu'il faut un minimum de 30 ans pour une étude valable. L'indice pluviométrique ou variable centrée et réduite de la station est calculé à partir de la formule de Nicholson dont l'expression mathématique est résumée dans l'équation 1:

$$I_p = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (1)$$

Avec :

I_p : indice pluviométrique ;

X_i : la pluviométrie de l'année i ;

\bar{X} : la moyenne sur la période d'observation ;

σ : l'écart type de la pluviométrie sur la période d'observation

2.2.2 Le Filtre Passe Bas de Hanning

La méthode le filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 appelée aussi "moyennes mobiles pondérées", permettant d'éliminer les variations saisonnières dans une série chronologique a été utilisée. Le calcul de ce filtre est effectué au moyen des équations de Tyson. Selon ces équations, chaque terme de la série chronologique est calculé de la manière suivante :

$$X(t) = 0.06 x_{(t-2)} + 0.25 x_{(t-1)} + 0.38 x_{(t)} + 0.25 x_{(t+1)} + 0.06 x_{(t+2)} \dots \dots \dots (2)$$

pour $3 \leq t \leq (n-2)$

Où $X(t)$ est le total pluviométrique pondéré du terme t ;

$X_{(t-2)}$ et $X_{(t-1)}$ sont les totaux pluviométriques observés de deux termes qui précèdent immédiatement le terme t ;

$X_{(t+2)}$ et $X_{(t+1)}$ sont les totaux pluviométriques observés des deux premiers [$X_{(1)}, X_{(2)}$] et des deux derniers [$X_{(n-1)}, X_{(n)}$] termes de la série. Ils sont calculés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

$$X_1 = 0.54 x_1 + 0.46 x_2 \quad (3)$$

$$X_2 = 0.25 x_1 + 0.5 x_2 + 0.25 x_3$$

$$X_{n-1} = 0.25 x_{(n-2)} + 0.50 x_{(n-1)} + 0.25 x_n$$

$$X_{(n)} = 0.54 x_n + 0.46 x_{n-1}$$

Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique les moyennes mobiles ont été centrées et réduites au moyen de la formule suivante :

$$Y_t' = (X(t) - m)/s \quad (4)$$

Où "m" est la moyenne de la série des moyennes pondérées et "s" est l'écart-type de la série des moyennes mobiles pondérées.

2.2.3 Détermination du Bilan Hydrologique

Pour la détermination quantitative de la recharge des nappes, plusieurs méthodes ont été proposées et testées. Des approches hydrodynamiques, géochimiques, hydrologiques et des modèles mathématiques ont été utilisés. La méthode du bilan hydrologique est la méthode que nous avons utilisée. L'infiltration ou la recharge des aquifères est évaluée à partir de l'équation:

$$I = P - (ETR + R) \quad (5)$$

Avec I, la lame d'eau infiltrée (mm); P la pluviométrie (mm); ETR l'évapotranspiration réelle (mm) et R la lame d'eau ruisselée (mm). La pluie étant connue, il faut estimer l'ETR et le ruissellement, afin d'en déduire l'infiltration. Le bilan hydrique a été établi à partir de 1970, date à partir de laquelle les mesures de la température sont disponibles.

Pour déterminer les paramètres susceptibles d'influencer la productivité des ouvrages, une analyse comparative a été réalisée. Elle a concerné d'une part les débits d'exploitation des forages et les épaisseurs des altérites, les débits d'exploitation et les profondeurs totales des forages, les débits d'exploitation et les formations géologiques afin d'évaluer les potentialités en eau de cette région.

2.2.4 Méthode d'analyse multivariée

L'analyse en composante principale Normée (ACPN) est une méthode statistique de description qui permet de synthétiser et de classer un nombre important de données. L'ACPN a été réalisé à partir du logiciel NCSS6.0 . Les analyses ont été effectuées à partir de 6 variables physiques dont : l'épaisseur des altérites (E. alt), l'épaisseur du socle (E. Socl), la profondeur totale (PT), les arrivées d'eau (A.E), le débit air lift (QAL) et la transmissivité (T).

L'origine des ions majeurs dans les eaux souterraines a été déterminée à partir de 12 variables dont le pH, la conductivité (cond), le Cl-, le NO3-, le SO42-, le PO43-, le Ca2+, le Mg2+, le HCO3-, l'épaisseur d'altération (Ealt) , la profondeur totale (PT) et la minéralisation totale (Mt).

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

3.1.1 Variation du régime pluviométrique interannuel

3.1.2 Evolution Temporelle de la Pluviométrie

Le calcul de l'indice pluviométrique moyen a permis d'analyser la variabilité temporelle des précipitations de Daoukro. L'étude menée à la station de Daoukro a permis d'observer trois

périodes; une période sèche de 1940 à 1953 caractérisée par une moyenne interannuelle de (1057.90 mm) et un écart type de 123.95 mm, une période humide de 1954 à 1968 avec une moyenne interannuelle de 1264.70 mm et un écart type de 186.54 mm . La période de 1970 à 2005 est définie comme une période sèche avec une moyenne interannuelle de 1123.50 mm. On observe des séquences pluvieuses de 1995 à 1998.

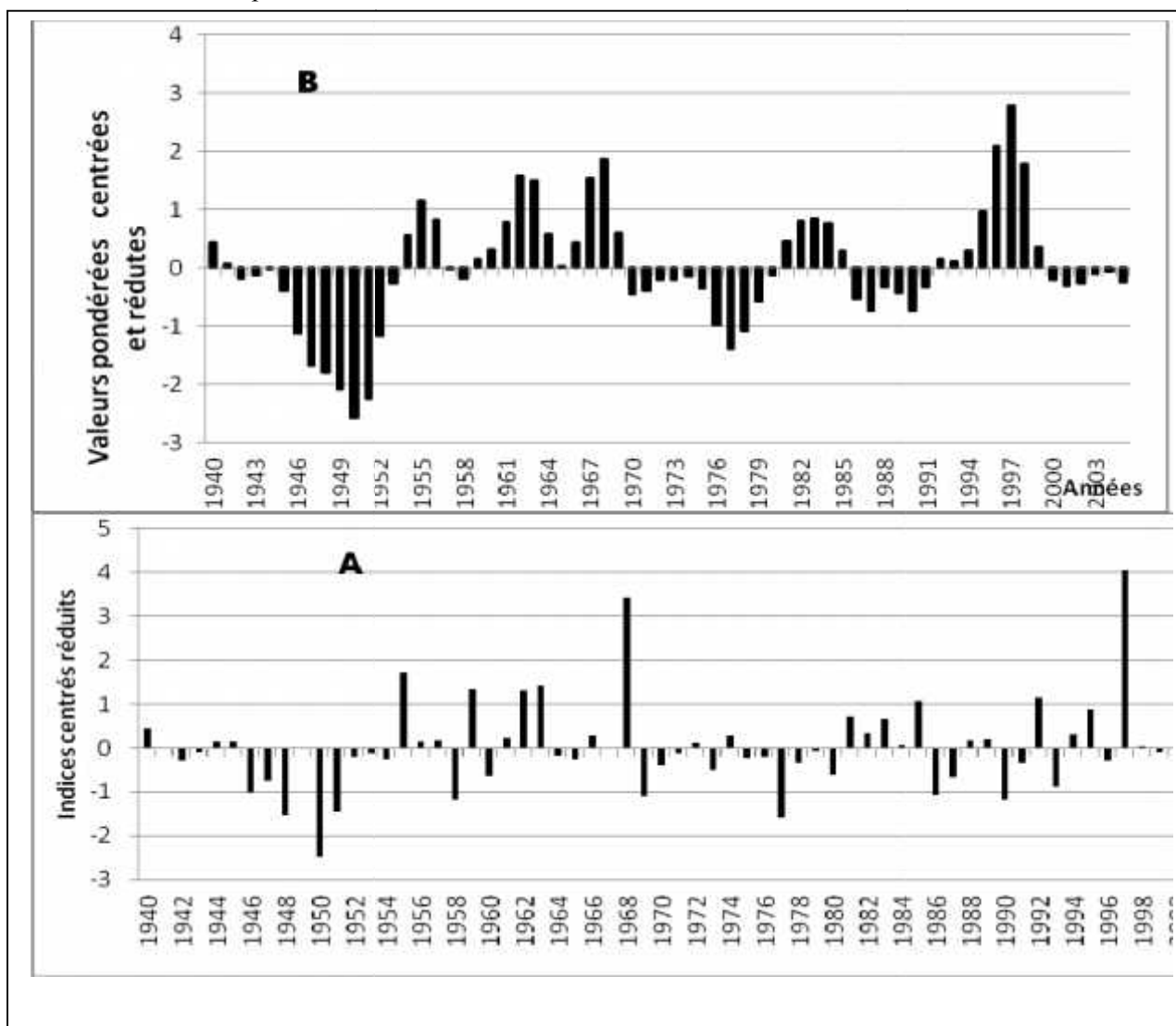


Figure 3 : évolution interannuelle des indices centrés réduits des modules annuels (A) et des modules annuels pondérés(B) à la station de Daoukro de 1940-2005

3.1.3 Bilan Hydrologique

Daoukro se trouve à la fois dans le bassin versant du N'zi qui est un sous bassin du Bandama et de celui de la Comoé. Pour le calcul du bilan hydrologique, nous avons utilisé les données pluviométriques et hydrométriques

du sous- bassin du N'zi à Dimbokro. Les résultats du bilan hydrologique obtenus dans le sous-bassin du Nzi sur la période de 1970 à 2005 sont consignés dans le tableau 1.

Tableau 1: Bilan hydrologique de la région de Daoukro (1970-2005)

P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
1179.8	1522	859.5	125.8	305.2

L'analyse du tableau montre que la région de Daoukro reçoit en moyenne 1179.8 mm de pluie chaque année et l'évapotranspiration potentielle (ETP) interannuelle est de 1522 mm. La quantité d'eau infiltrée est de 305.2 mm soit 25% de la lame d'eau précipité. L'ETR qui constitue la frange d'eau qui retourne dans l'atmosphère sous forme de vapeur est de 859.5 mm.

3.2 Productivité des aquifères du département de Daoukro

Les 64 forages réalisés avec 86% de succès ont permis d'analyser certaines caractéristiques des aquifères. Des analyses statistiques effectuées sur ces forages ont permis de montrer des relations entre différents paramètres tels que : débits d'exploitation / épaisseur d'altération, débits d'exploitation/profondeurs totale de foration et débits d'exploitation / formation géologiques.

3.2.1 Relation débit- épaisseur d'altération

L'étude de la variation des débits en fonction de l'épaisseur d'altération montre que l'importance des débits des ouvrages ne semble pas être nécessairement lié à la puissance des altérites d'une manière générale. En effet, les ouvrages de certaines localités comme "Scaf F2" bénéficiant d'une forte épaisseur d'altérites (106.2m) à un débit d'exploitation relativement faible (07m³/h). La majorité des ouvrages à débits élevés ont des épaisseurs d'altération inférieure ou égale à 60 m. Prikro est la seule localité dont le forage a un débit de 5,4m³/h avec une épaisseur d'altération de 89 m. Les débits élevés ($Q > 5$ m³/h) s'observent dans la région de Daoukro entre 20 et 50 m d'épaisseur ; tel est le cas des forages de Broukro (19 m³/h) et de Bangalikro (17 m³/h), (Figure 4). Dans la majorité des cas, au delà de 60 m d'épaisseur d'altérites, aucun débit intéressant n'a été obtenu dans la région.

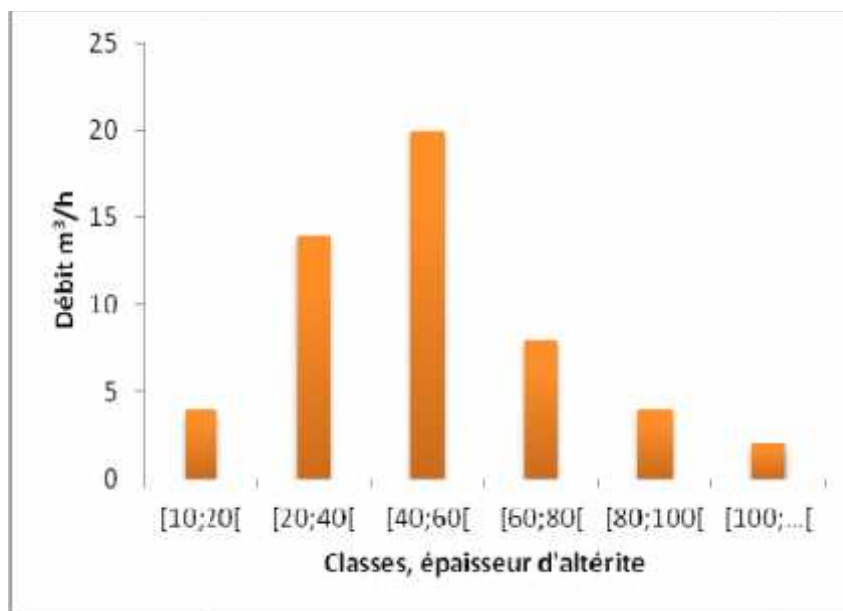


Figure 4 : Variation des débits moyens par classe d'épaisseur d'altération

3.2.2 Relation débit- profondeur totale

En vue de déterminer la profondeur optimale d'obtention des forages productifs dans La

région de Daoukro, un graphe de répartition des débits en fonction de la profondeur Totale de l'ouvrage a été établi (Fig. 5). A l'analyse, la tranche de profondeur optimale À proposer

pour réaliser des forages économiques est comprise entre 60 et 80 m. Les profondeurs comprises entre 60 m et 80 m sont caractérisées par des débits plus importants pouvant atteindre $30 \text{ m}^3/\text{h}$ mais les débits des ouvrages tendent à baisser au-delà de 80 m. Au regard des forages

étudiés dans cette région, la zone optimale de productivité est comprise entre 60 et 80 m. La productivité n'est donc pas liée à la profondeur de l'ouvrage.

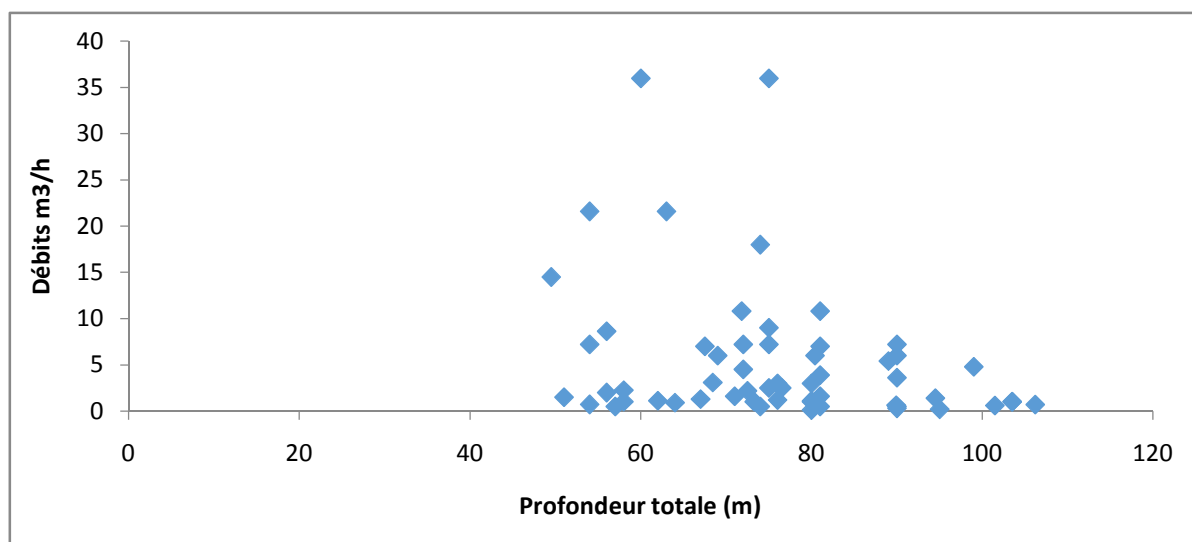


Figure 5 : Répartition des débits d'exploitation en fonction de la profondeur totale de l'ouvrage

3.2.3 Productivité des forages et formations géologiques

Daoukro est une région essentiellement schisteuse avec des intrusions granitiques par endroit. Les formations schisteuses sont plus productives avec un taux de succès de 85 % (Fig. 6). Cependant, ce taux est inférieur au taux de succès moyen de cette même formation à l'échelle nationale, qui est de 87%.

Le taux de réussite est très faible dans les granites environ 15% comparativement aux schistes qui font 85% (Figure 6).

Les gros débits ($Q > 5 \text{ m}^3/\text{h}$) s'observent aussi bien dans les granites que dans les schistes en

général en Côte d'Ivoire. Dans le cas de Daoukro, les débits d'exploitation des granites sont inférieurs à ceux des schistes, notamment dans les forages de Bangalikro et Ya N'drikro dont les débits sont respectivement de 0,5 et $0,7 \text{ m}^3/\text{h}$ dans les granites. Les débits supérieurs à $20 \text{ m}^3/\text{h}$ s'observent dans les forages de Samanza F1 et F2 constitués de formations schisteuses. Cette observation pourrait laisser à penser que les schistes ont une meilleure productivité que les granites.

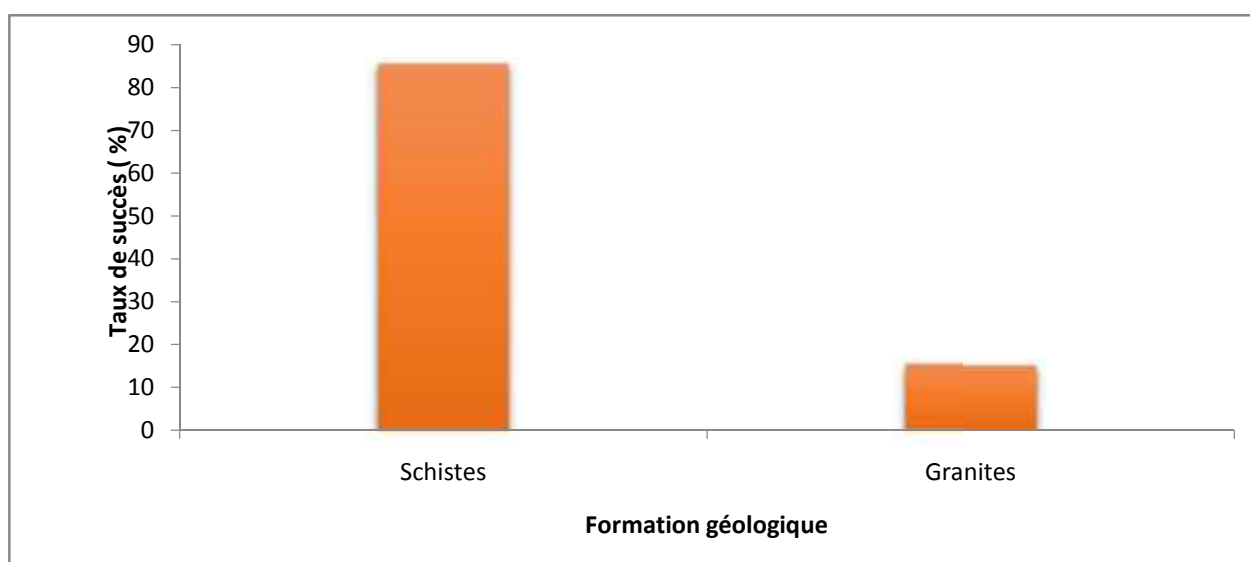


Figure 6 : Taux de succès des forages en fonction des unités géologiques

3.2.4 Productivité et paramètres hydrodynamiques

Les données du tableau de transmissivité permettent de préciser la prépondérance de la productivité des schistes par rapport aux granites (Tableau. 2). Les transmissivités calculées par la méthode de Cooper-Jacob donnent de fortes valeurs dans les granites alors que celles calculées par la remontée de Jacob-Theis donne des valeurs élevées dans les schistes.. La transmissivité déterminée par la remontée est plus élevée dans les schistes que dans les granites sur l'ensemble des forages analysés. Le caractère fiable de la remontée de Theis-Jacob, pourrait nous permettre de dire que les schistes sont plus productifs que les granites. De plus, dans une majorité de forages en Côte d'Ivoire, les schistes sont plus transmissifs que les granites [11].

Il ressort de leurs travaux que les schistes sont plus transmissifs que les granitoïdes qui le sont plus que les quartzites et les amphibolites. Les

structures feuilletées et redressées à la verticale des schistes birimiens qui constituent des zones de moindre résistance, leur confère l'avantage d'être plus transmissifs que les autres formations. En fait, compte tenu de leur aspect feuilleté, ils ont tendance à se débiter plus facilement. La position subverticale à verticale acquise par les sillons schisteux à la suite de la tectonique tend à faciliter leur altération. Par contre, l'existence de fracturation reste un élément essentiel dans la capacité transmissive des roches cristallines et cristallophylliennes car, en l'absence de phénomènes tectoniques et de désagrégation, ces roches sont pratiquement imperméables [12].

Les fractures générées conditionnent une bonne ou une mauvaise transmissivité selon qu'elles sont ouvertes ou colmatées par des débits d'altération. On peut se trouver en présence de fractures fermées où l'eau reste captive (emmagasinée), dans ce cas, la transmissivité et le débit baissent considérablement.

Tableau: 2 Transmissivité et formations géologiques

Formation	Transmissivités moyennes m ² /s			
	Theis	Cooper-Jacob	Remontée (Theis-Jacob)	Moyenne
Granites	2,6.10 ⁻⁴	2,38.10 ⁻⁵	2,98.10 ⁻⁵	3,13.10 ⁻⁴
Schistes	3,46.10 ⁻⁴	1,03.10 ⁻⁴	6,46.10 ⁻⁵	5,13.10 ⁻⁴

3.3 Résultat de l'étude statistique multivariée

3.3.1 Présentation des paramètres physiques

Les valeurs propres des facteurs sont présentées dans le tableau ci-dessus. Les trois premiers facteurs représentent 86.05% de la variance exprimée (tableau 3). Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour traduire l'information recherchée. La matrice de corrélation entre les différentes variables est présentée par le (tableau 4).

- l'épaisseur des altérites (E.alt) est corrélée négativement ($r = -0,71$) avec l'épaisseur du socle (E.Socl).

- l'épaisseur des altérites (E.alt) est très corrélée avec la profondeur totale (PT), ($r = 0,77$).

- la transmissivité (T) et le débit air lift (QAL) sont moyennement corrélés ($r = 0,51$).

L'analyse des variables de l'ACPN dans le plan factoriel F1-F2 dans la figure 7. Au niveau du

graphe A, la variable (E.Socl) évolue de façon inversement proportionnelle au groupement (E.alt, PT et A.E), cela signifierait que quand l'E.Socl augmente, (E.alt, PT et A.E) diminuent d'intensité.

En d'autres termes, quand le toit du socle est peu profond, l'épaisseur des altérites est réduite, l'arrivée d'eau est atteinte très vite et le forage s'arrête pour une profondeur assez réduite. Le facteur F1 exprime le phénomène « influence du toit du socle sur les caractéristiques physiques des forages ».

En revanche, le groupement (E.Socl, QAL, et T), évoluent de façon proportionnelle dans le plan factoriel F1-F3, cela signifie que le débit air lift (QAL) augmente quand la transmissivité (T) est importante. Par conséquent le facteur F2 exprime le phénomène « productivité des forages en fonction de la transmissivité ».

Tableau 3: Valeurs propres, pourcentage cumulés

Facteurs	Valeurs propres	% Variances exprimées	% Cumulé
F1	2,91	48,56	48,56
F2	1,23	20,51	69,07
F3	1,02	16,98	86,05

Tableau 4: Matrice de corrélation

Variables	E.alt (m)	E.Socl (m)	PT(m)	A.E(m)	QAL(m ³ /h)	T(m ² /s)
E.alt	1					
E.Socl	-0,71	1				
PT	0,77	-0,09	1			
A.E	0,56	-0,06	0,74	1		
QAL	-0,27	0,08	-0,31	-0,31	1	
T	-0,29	0,15	-0,28	-0,30	0,51	1

3.3.2 Origine des ions dans les eaux souterraines

Le facteur F1 exprime 31.82 % des informations liées à l'axe 1, le facteur F2 exprime 20.20% des informations liées à l'axe 2. Le plan F3 exprime 12.02% des informations (Tableau 5).

A l'analyse du graph B (fig 7), les valeurs extrêmes se caractérisent par 3 regroupements dans le plan F1-F2

- le groupement 1: représenté par deux variables E.alt et PT,

©UBMA - 2015

- le groupement 2: représenté par les variables NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- et la minéralisation totale (Mt),

- le groupement 3: représenté par les variables pH, Conductivité (Cond) et Cl^-

La profondeur (PT) évoluent de façon proportionnelle avec la variable E.alt. Cela signifie que la profondeur totale du forage augmente quand l'épaisseur des altérites augmente, cependant le couple de variables (PT), (E.alt) évolue de façon contraire aux variables NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-

et (Mt) dans la partie négative de F1. Cela signifie que ces derniers ions ont une origine superficielle et ne sont pas liés à la profondeur du forage.

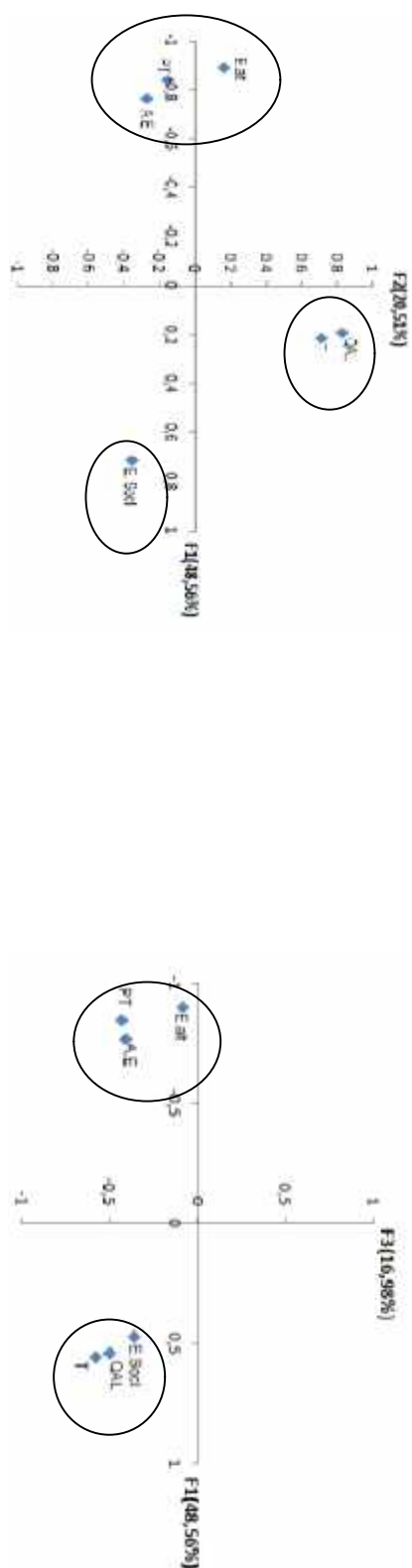
On en déduit que le facteur F1 exprime la dissolution des roches dans les couches superficielles du sol.

En revanche le pH et le Cl⁻ se regroupent autour de la conductivité (cond) dans la partie positive de F2 (graphe B). Par conséquent le F2

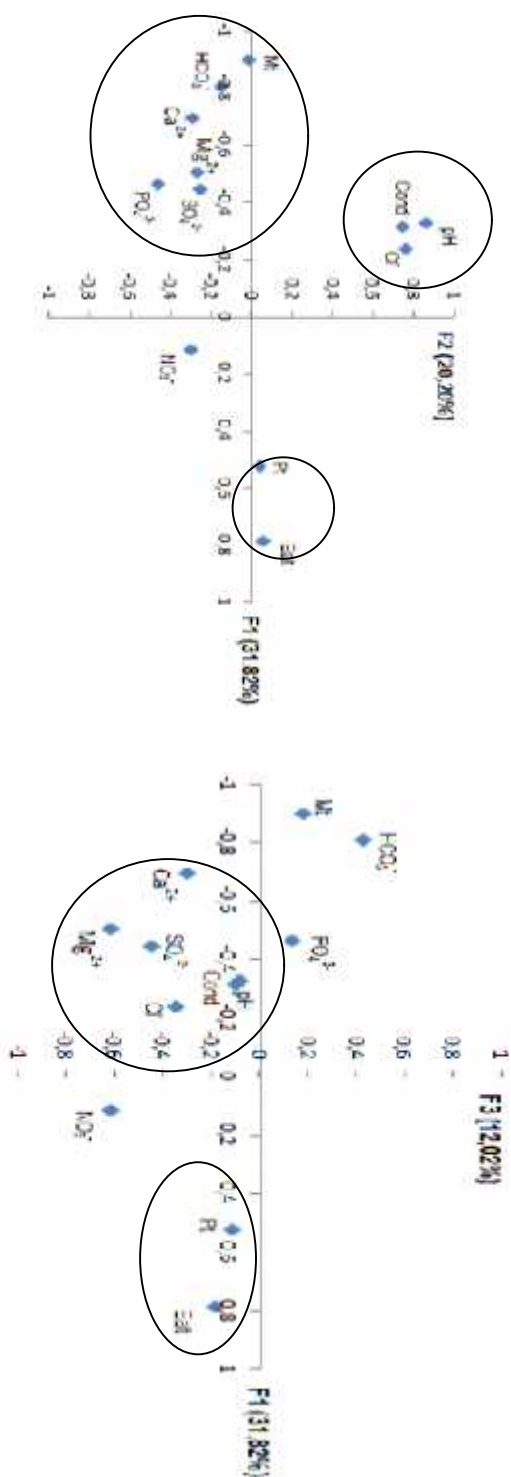
renseigne sur le degré de minéralisation des eaux dans la région. En effet la zone étant particulièrement agricole, le défrichage avant culture, l'élevage, la production de charbon de bois, l'utilisation des fertilisants dans les plantations de café et cacao contribueraient à la production des ions dans les eaux souterraines. Le facteur F2 exprime le phénomène minéralisation due à la décomposition de la matière organique.

Tableau 5: Valeurs propres, pourcentage cumulés

Facteurs	Valeurs propres	% Variances exprimées	% Cumulé
F1	3,82	31,82	31,82
F2	2,42	20,20	52,03
F3	1,44	12,02	64,04



A : Projection des Paramètres physiques dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3



B : Projection des variables chimiques dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3

Figure 7: Projection des variables dans les plans factoriels

4. DISCUSSION

Les années 1970, constituent une période très représentative de l'importante chute de la pluviométrie en Côte d'Ivoire. Ainsi des travaux ont montré une diminution des précipitations de 13 et de 14 % respectivement sur les bassins versants du N'zi et du N'zo [13]. Dans le même ordre d'idée, d'autres mettent en évidence des déficits pluviométriques importants, allant de 15 % à plus de 30 %, sur le bassin transfrontalier de la Comoé [14].

Le bilan hydrologique déterminé dans cette étude par la méthode de Thornthwaite dans la région de Daoukro montrent que pour une moyenne de 1174,51 mm de pluie, la quantité d'eau infiltrée est de 305,2 mm soit 25% des précipitations. Des études similaires réalisées en Côte d'Ivoire concernant le bassin versant de la Mé, le bassin de la Marahoué [15], la région d'Odienné [16], ont montré que les valeurs de recharges des aquifères varient entre 43 et 168 mm sur toute l'étendue du pays.

La recherche d'un forage productif étant axée sur les discontinuités de la roche, une attention particulière a été apportée aux paramètres épaisseurs d'altération, profondeur totale et formation géologique. Nos résultats ont montré qu'au-delà de 60 m d'épaisseur d'altération aucun débit intéressant n'a été trouvé. Ces résultats obtenus sont en accord avec les conclusions des travaux antérieurs réalisés en Côte d'Ivoire, [17]. Ainsi, ces auteurs ont proposé des profondeurs de foration à ne pas excéder dans le socle (80 m dans les granites et 100 m dans les schistes) pour des raisons purement économiques. Cependant d'autres auteurs tels que [18] soutiennent que la possibilité d'obtenir des forages productifs est réelle à de grandes profondeurs. Nos résultats sont donc en conformité avec ceux des études antérieures effectuées en Côte d'Ivoire et dans la sous région, permettant de conclure que cette profondeur optimale pourrait se situer autour de 70 m.

La transmissivité dans la zone de Daoukro varie entre $2,98 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ et $4,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ avec des moyennes respectives de $3,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les granites et $5,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les schistes. Elles s'apparentent aux valeurs obtenues en Côte d'Ivoire [19], dans la région de Grand Lahou, et dans la région d'Aboisso, [20] dans la région d'Agboville. De plus, le caractère fiable des méthodes utilisées pour les déterminer notamment la remontée de Theis-Jacob nous

©UBMA - 2015

permet d'affirmer que les schistes sont plus productifs que les granites. Cette observation corrobore les travaux [21], affirmant que les schistes sont plus transmissifs donc plus productifs que les granites, dans une majorité de forages réalisés en Côte d'Ivoire. En effet, selon leur travaux les schistes sont plus transmissifs que les granitoïdes qui le sont plus que les quartzites et les amphibolites. Les structures feuilletées et redressées à la verticale des schistes birimiens qui constituent des zones de moindre résistance, leur confère l'avantage d'être plus transmissifs que les autres formations. En fait, compte tenu de leur aspect feuilleté, ils ont tendance à se débiter plus facilement. La position subverticale à verticale acquise par les sillons schisteux à la suite de la tectonique tend à faciliter leur altération. Par contre, l'existence de fracturation reste un élément essentiel dans la capacité transmissive des roches cristallines et cristalloyphylles car, en l'absence de phénomènes tectoniques et de désagrégation, ces roches sont pratiquement imperméables [22]. Les fractures générées conditionnent une bonne ou une mauvaise transmissivité selon qu'elles sont ouvertes ou colmatées par des débits d'altération. On peut se trouver en présence de fractures fermées où l'eau reste captive (emmagasinée), dans ce cas, la transmissivité et le débit baissent considérablement.

Les résultats de l'analyse multivariée ont montré d'une part que le toit du socle a une influence positive sur la productivité des forages, lorsque le toit du forage est peu profond, l'épaisseur des altérites est réduite, l'arrivée d'eau est atteinte très vite et le forage s'arrête. ce qui réduit le coût de l'ouvrage. D'autre part cette étude a révélé que la minéralisation des eaux souterraines de Daoukro est liée aux phénomènes de dissolution des roches et à l'apport superficiel d'ion d'origine organique. Ces résultats corroborent ceux obtenus dans la région d'Agboville [23].

5 - CONCLUSION

Sur le plan géologique, la région de Daoukro est caractérisée essentiellement par les formations schisteuses et granitiques. Cette lithologie par rapport aux paramètres hydrodynamiques (transmissivité notamment) permet de mettre en évidence les potentialités en eaux souterraines de la région. Il ressort de

cette étude que les eaux souterraines sont les formations schisteuses. L'intervalle de profondeur comprise entre 60 et 80 m est généralement la plus favorable. Cette étude a également montré qu'il n'existe pas de relation d'une part entre la productivité et l'épaisseur des altérites, et d'autre part entre la productivité et la profondeur des forages. En outre, elle a permis de conclure que les formations schisteuses sont les plus productives avec un taux de succès de 85%. Les transmissivités obtenues ($2,98 \cdot 10^{-5}$ pour les granites et $4,26 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour les schistes) selon les méthodes utilisées ont permis d'avoir non seulement une meilleure idée du fonctionnement des aquifères mais une bonne compréhension des essais de pompages. La minéralisation des eaux de Daoukro est contrôlée par plusieurs phénomènes dont le pluvioléssivage des sols, l'hydrolyse des roches sous-jacente et les activités anthropiques de la zone.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Castany G. (1998). «Hydrogéologie : principes et méthodes». 2e cycle, DUNOD, Paris, 237 p. [2] Margat, J. (1983) « Rapport sur le thème 3 du colloque : Les milieux discontinus en hydrogéologie. Orléans 16-17 novembre 1982 », Hydrogéol. Géol. Ing., 1, BRGM, Orléans, 25-33.
- [3] Faillat J. P. (1985). «Synthèse et commentaires d'études de forage en zone de socle fissuré éruptif et métamorphique, principalement en Afrique». 110^{ème} Congrès National. Géologie Afrique, Montpellier, Fascicule VI, pp. 317–329
- [4] Cairon D. (1981). «Étude sur les forages d'eau de la boucle de cacao. D.M.G. Abidjan-Côte d'Ivoire», 54p.
- [5] Guiraud R. (1992). «L'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest. Synthèse des connaissances : socle cristallin et sédiment ancien». Ministère de la coopération et du Développement, collection Maîtrise de l'Eau, 2^{ème} Edition ; 147p
- [6] Berger J ; J. Camerlo, J.C Fahy. et M. Haubert. (1980-81) « Etudes des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin : la boucle du cacao (Côte d'Ivoire) ». Bull. BRGM, section III, 2^e série, n°4, 273-291.
- [7] DGTX (Direction de contrôle des Grands travaux) ; (1995): «Projet local de Développement agricole de Daoukro, Ministères de l'agriculture et des ressources animales», 145P.
- [8] Faillat J. P. (1986) « Aquifères fissurés en zone tropicale humide: structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'Ouest) », Thèse Université. Languedoc (Montpellier), 534 p.
- [9] Nicholson S.E., Kim J., Hoopingarner J. (1988) - *Atlas of African rainfall and its interannual variability*. Édité.
- disponibles et généralement exploitables dans Department of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Floride, USA, 237 p.
- [10] OMS 1992 Directives de la qualité pour l'eau de boisson. Vol. 1, 192 p
- [11] Dibi B., Inza D., Goula B. T. A., Savané et Biémi J. (2004). «Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)». Sud Sciences Technologies, N° 13, pp.22-39.
- [12] Emmanuel K; Soro N; Savané I. (2008) « Stratégie d'optimisation de la profondeur des forages en contexte de socle : application à la région du Denguélé, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire »
- [13] Paturol J.E., Servate. et Delattre M.O. (1998) - Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 43, n° 6, p. 937-945.
- [14] Goula B.T.A., Savané I., KONAN B., Fadika V. et Kouadio B.G. (2006) - Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'zo et N'zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *VertigO*, vol. 7, n° 1, p. 1-12
- [15] Kouakou K. E., Goula B.T.A. et Savané I. (2007) - Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface en zone tropicale humide : cas du bassin frontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire-Burkina Faso). *European Journal of Scientific Research*, vol. 16, no 1, p. 31-43
- [16] Soro N. (1987). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du sud-est de la Côte d'Ivoire, bassin versant de la Mé; Thèse 3^{ème} cycle, Université scientifique, technique et médicale de Grenoble, 243 p.
- [17] Savané I. (1997). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest) de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et un système d'information hydrogéologique à référence spatiale. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelle, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 396 p
- [18] Kouassi A.M., Kouame K.F., Saley M.B., Koffi Y.B. (2007). Identification de tendances dans la relation pluie-débit et recharge des aquifères dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 16 (3), pp.412-427.
- [19] N'go Y. A., Gone D.L., Savané I., Goble M.M. (2005). Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud Ouest de la Côte d'Ivoire): caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique Science*, Vol. 1 (1), pp. 127-144.
- [20] Soro N. (2002) - Hydrochimie et Géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody, 272 p.

[21] Kanohin Fulvie epse Otchoumou, Saley Mahaman Bachir, Aké Gabriel Etienne, Savané Issiaka et Djé Kouakou Bernard (2012): Variabilité climatique et productions de café et cacao en zone tropicale humide : cas de la région de Daoukro (Centre-est de la Côte

productivité des aquifères fissurés de la région du n'zi-comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 10, Mars 2012, pp. 57-74.

[23] Kouassi Amani Michel, Okaingni Jean Claude, Kouakou Koffi Eugène et Biemi Jean (2013) : Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle

d'ivoire). International Journal of Innovation and Applied Studies. ISSN 2028-9324 Vol. 1 No. 2 Dec. 2012, pp. 194-215.

[22] Kouassi A.M., Ahoussi K.E., Yao K.A., Ourega W.E.J.A, Yao K.S.B. et Biemi J. (2012) : Analyse de la cristallin et cristallophyllien: Cas de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). International Journal of Innovation and Applied Studies. ISSN 2028-9324 Vol. 2 No. 1 Jan. 2013, pp. 61-71.