

CONTRIBUTION HYDROGÉOLOGIQUE À LA CONNAISSANCE DES AQUIFÈRES DISCONTINUS DU DÉPARTEMENT DE FERKÉ (NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE) POUR UNE MEILLEURE ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Théophile LASM^{1*}, Rosine Marie N'Guessan FOSSOU¹, Oscar Zahibo ONETIE¹, Derving BAKA¹, Marc YOUAN TA^{1,2}, Marie Solange OGA¹ et Nagnin SORO¹

¹*Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement, U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

²*Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.*

* Correspondance, e-mail : theophile.lasm@gmail.com

RÉSUMÉ

La région de Ferké est située au nord de la Côte d'Ivoire et couvre une superficie de 17700 km². Les conditions climatiques défavorables de cette région limitent les ressources en eau superficielle, il est alors nécessaire de se tourner vers les ressources en eau souterraine des aquifères discontinus. L'objectif principal de ce travail est d'étudier les propriétés hydrodynamiques et hydrochimiques des aquifères fissurés de la région de Ferké en vue d'une meilleure connaissance et gestion de leurs ressources en eau souterraine. La base de données comporte 130 essais de pompages sur des forages isolés et 50 fiches d'analyses hydro chimiques. Les rabattements ont été corrigés avant la détermination de la transmissivité et du débit spécifique selon la méthode de Forkasiewicz. L'analyse en composantes principales a été utilisée pour comprendre les processus intervenant dans l'acquisition du chimisme des eaux souterraines et les paramètres influençant la productivité des forages.

Le débit spécifique et la transmissivité varient entre 0,01 et 2,56 m².h⁻¹ et entre 4,62E-06 à 2,75E-04 m².s⁻¹, et s'échelonnent sur une magnitude de deux ordres de grandeur.

L'analyse en composantes principales a mis en évidence les différents processus intervenant dans la minéralisation des eaux souterraines : temps de séjours, oxydation et origine superficielle des substances dissoutes. Elle a aussi montré que la profondeur des forages influence la productivité.

Les résultats obtenus dans cette étude sont importants et contribuent à une meilleure connaissance des aquifères discontinus de la région de Ferké.

Mots-clés : *aquifères fissurés, transmissivité, débit spécifique, perte de charge quadratique, minéralisation, ACPN, Ferké, Côte d'Ivoire.*

ABSTRACT**HYDROGEOLOGICAL KNOWLEDGE CONTRIBUTION OF DISCONTINUOUS AQUIFERS OF FERKÉ REGION (NORTHERN CÔTE D'IVOIRE) FOR A BETTER SUPPLY IN DRINKING WATER**

Ferké area is located in Northern Côte d'Ivoire and covers 17700 km². Unfavorable climatic conditions limit surficial water resources in this area; it then becomes necessary to use groundwater resources the local discontinuous aquifers. This work aims to study the hydrodynamics and hydrochemicals properties of fractured aquifers in Ferké for a better understanding of these aquifers and a more efficient management of groundwater resources.

The data base consists of 130 pumping test data from isolated boreholes and 50 chemical analysis data points.

Drawdowns were corrected for turbulent head losses before evaluating transmissivities and specific capacities according to Forkasiewicz method.

Normalized principal component analysis (NPCA) have been carried out to understand the groundwater mineralization process and to identify parameters that influence the borehole productivity. Specific capacity and transmissivities values oscillate between 0.01 and 2.56 m².h⁻¹ and between 4.62E-06 to 2.75E-04 m².s⁻¹ and spread over two orders of magnitude.

Normalized principal component analysis (NPCA) showed evidence of different processes occurring in groundwater mineralization: residence time, oxidation and surficial origin of substances. It also showed that the borehole depth influences the productivity.

Findings of this study are important and contribute to a better knowledge of discontinuous aquifers in Ferké area.

Keywords : *fissured aquifers, transmissivity, specific capacity, turbulent head losses, mineralization, NPCA, Ferké, Côte d'Ivoire.*

I - INTRODUCTION

En zone de socle, les épaisses couches d'arènes grenues situées à la base des couches d'altérites constituent des zones favorables à la circulation d'eau souterraine. Cependant les principales réserves d'eau restent et demeurent celles contenues dans les aquifères de fissures. L'horizon fissuré constitué majoritairement de fissures horizontales mises en place par le processus d'altération [1-4] joue le rôle de drains pour l'écoulement régionale [5,6]. C'est la raison pour laquelle au cours des prospections hydrogéologiques en milieux cristallin et métamorphique, les aquifères fissurés sont les plus recherchés. Les nœuds de fractures, les fractures d'extension régionale et les fractures secondaires les plus nombreuses, sont les plus recherchés lors de l'implantation des forages.

En Côte d'Ivoire, depuis 1964, 68 % des villages souffraient déjà de problèmes d'eau conduisant les autorités à initier à partir de 1973, un vaste programme national d'hydraulique villageoise. L'objectif de ce programme était l'adduction d'eau potable dans tous les chefs-lieux de sous-préfectures et plus généralement dans toutes les agglomérations de plus de 3000 habitants. Ce programme a permis la réalisation de 15000 points d'eaux dans les villages uniquement à partir des eaux souterraines. Les besoins en eau ont augmenté depuis ces trois dernières décennies. En effet, les besoins en eau sont de 10 à 15 L/jour/habitant dans les années 1970 sont passés 15 à 20 L/jour/habitant dans les années 80 et 40 à 100 L/jour/habitant dans les années 2000 [7].

Le département de Ferké comme tous les départements du pays a bénéficié de plusieurs projets de réalisation de forages dont les projets UNICEF, Don Japonais, FNE, etc. Malheureusement, aujourd'hui encore le problème d'alimentation en eau des milieux ruraux demeure ; car très souvent les débits des forages réalisés sont faibles, cela est dû à la méconnaissance des aquifères discontinus. Rappelons que les études hydrogéologiques dans cette région sont rares. Les seuls travaux connus sont ceux de Géomines [8,9], lesquels sont malheureusement très fragmentaires. Des investigations ont été cependant menés de part et d'autre de cette région, c'est-à-dire à l'Ouest et à l'Est respectivement à Korogho [10-13] et Bondoukou [14-17]. Une meilleure connaissance des propriétés hydrogéologiques notamment hydrodynamiques, hydrochimiques des aquifères discontinus et la caractérisation géométrique des réseaux de fractures peuvent favoriser la réduction du taux d'échec et une meilleure exploitation et gestion des ressources en eau souterraine.

C'est dans cette optique que la présente étude qui présente deux volets a été initiée. Le premier porte sur les propriétés hydrodynamiques et hydrochimiques des aquifères discontinus de la région de Ferké et le second porte sur la cartographie par imagerie spatiale aéroportée, satellitaires et radar des réseaux de fractures ; et la caractérisation de leurs propriétés géométriques. Ici, sera abordé seulement le premier volet de cette étude. Le second volet qui sort du cadre de ce présent travail fera l'objet d'une autre étude. Cette étude a pour objectif principal de caractériser les propriétés hydrodynamiques et hydrochimiques des aquifères discontinus de la région de Ferké en vue d'une meilleure connaissance et gestion efficace et efficiente de leurs ressources en eau.

II - PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Située au nord de la Côte d'Ivoire, le département de Ferké est localisé entre les longitudes 10°30 et 8°35 Ouest et les latitudes 5°55 et 3°30 Nord, avec une superficie de 17700 km². Ce département se trouve dans une pénéplaine et est formée d'un vaste plateau dont l'altitude varie entre 300 et 400 m. Des dômes granitiques sous forme de petites collines rompent la monotonie du relief. Le climat

de la région est de type soudanais et est caractérisé par deux saisons dont une longue saison sèche de 7 mois (de novembre à Mai) et une courte saison des pluies qui dure 5 mois (Juin à Octobre). Les précipitations annuelles au cours de ces trois dernières décennies varient entre 800 et 1500 mm avec une moyenne de 1300 mm. Les températures moyennes enregistrées varient entre 22 et 28°C. L'évapotranspiration moyenne évaluée sur la période 1989-1998 est de 1 006 mm soit 77 % des précipitations moyennes, les 23 % restant se répartissent entre l'infiltration et le ruissellement.

L'absence d'études isotopiques dans cette région n'a pas permis d'évaluer la recharge des eaux souterraines. La végétation est constituée majoritairement de savanes arborées et herbeuses, on y rencontre aussi des forêts claires.

Le réseau hydrographique est constitué de deux grands fleuves dont le Comoé à l'est et le Bandama à l'ouest avec de nombreux affluents : Kinkéné, N'zi supérieur, Tabourougou, Gbéné, Kolonkoko, et Lingba, Léraba, Badéni et Lopkoho.

Au plan hydrogéologique, on y rencontre les aquifères des niveaux supérieurs (altérites), des fissures (horizon fissuré) et de failles [1-4]. Le profil d'altération est variable selon la nature lithologique de la roche encaissante [5]. La fracturation de la zone d'étude est importante à l'instar des autres régions de socle de la Côte d'Ivoire [10-12].

La taille des fractures est très variable allant d'une dizaine de mètres à plusieurs kilomètres, elle s'échelonne donc sur plusieurs ordres de grandeur. Le contexte tectonique semble complexe avec plusieurs phases de déformation. La densité de fracturation est variable d'un secteur à un autre. La rosace directionnelle met en évidence une seule famille de fractures dites majeures, c'est la classe N-S avec 13 % en fréquence. Les autres familles de fractures présentent des fréquences oscillant entre 3 et 7 %. La fracturation de la région de Ferké peut être considérée comme homogène. Au plan pétrographique deux grands ensembles se distinguent, Géomines [8,9] : i) les formations volcaniques, volcano sédimentaires et sédimentaires qui ont été métamorphisées et ii) les granitoïdes qui comportent plusieurs générations de granites et de granodiorites (*Figure 1*).

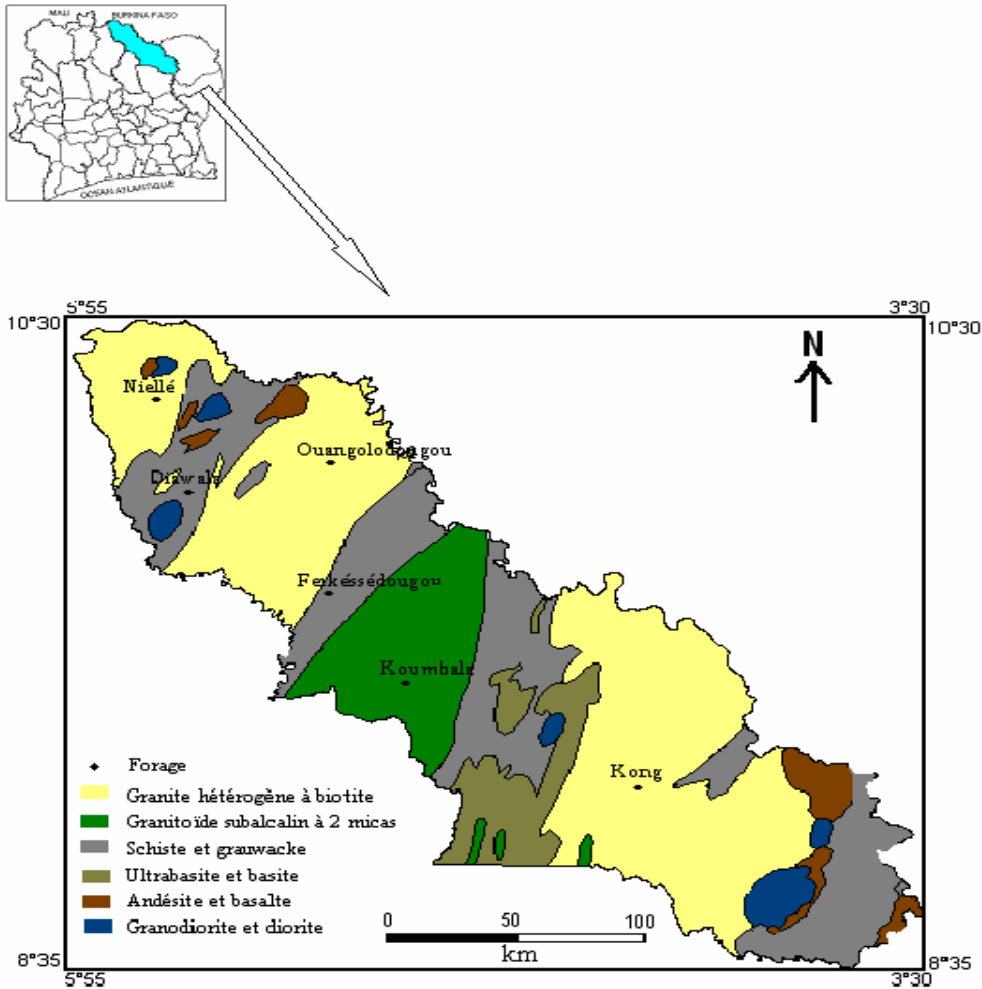


Figure 1 : Carte géologique du département de Ferké

III - DONNÉES ET MÉTHODES

III-1. Données

Les données utilisées proviennent de 130 fiches techniques de forages réalisés lors des projets BID2 (Banque Islamique de Développement) et Don Japonais. Les profondeurs des forages varient généralement entre 30 et 70 m et captent des eaux des aquifères fissurés. Les analyses physico-chimiques ont été effectuées par le laboratoire d'analyse privé (LPA). Les paramètres physiques tels que la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous ont été mesurés *in situ* pendant les prélèvements.

Plusieurs échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons pour le dosage des

ions au laboratoire. Le pH et la conductivité ont été mesurés respectivement à l'aide d'un pH-mètre et d'un conductimètre numérique dont les incertitudes sont de $\pm 0,1$ et $\pm 0,1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La température a été mesurée à l'aide d'un thermomètre dont l'incertitude est de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Les échantillons ont été conditionnés et stockés à l'abri de la poussière et de la lumière à une température de 4°C . Les éléments majeurs et autres ont été dosés au laboratoire par différentes techniques. Les ions HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} et Fe^{2+} ont été dosés quelques jours après les prélèvements. Les ions Cl^- et HCO_3^- ont été déterminés par titration et les nitrates ont été dosés par colorimétrie. Les incertitudes des mesures d'analyses sont respectivement de 2 % pour les cations et 1% pour les anions.

III-2. Méthodes

III-2-1. Détermination de la transmissivité

La transmissivité a été déterminée à l'aide de la méthode de Cooper-Jacob en utilisant l'approche par calage. Cette méthode de calage consiste à superposer les courbes expérimentales et théoriques du rabattement en jouant sur les valeurs de transmissivité (T) et du coefficient d'emmagasinement (S). Le rabattement théorique est calculé suivant l'équation de [18]. Au départ on choisit des valeurs de T et de S arbitrairement mais qui doivent être en accord avec celles obtenues généralement en milieu de socle. Sur un même graphique, on représente les deux types de rabattements, c'est-à-dire mesurés et théoriques. Après plusieurs calculs itératifs à l'aide du module Solveur du logiciel Excel de MS office, les deux courbes sont superposées et les vraies valeurs de la transmissivité et de l'emmagasinement sont déterminées automatiquement. Nous renvoyons le lecteur à consulter pour plus de détails les travaux de [13].

Ces auteurs suggèrent de rapprocher davantage les deux courbes pour faciliter les calculs itératifs et donc la superposition de ces courbes. Les deux courbes peuvent se superposer parfaitement ou être très proches. Dans tous les cas les deux paramètres sont déterminés. Il peut arriver de rare fois où la superposition des courbes reste impossible. Dans ces conditions, l'on peut utiliser la méthode classique de détermination graphique. La méthode de détermination par calage est une méthode efficace et rapide, elle permet d'obtenir des transmissivités fiables.

Dans le cas de pompage sur des forages isolés comme c'est le cas ici, les rabattements doivent être corrigés avant la détermination de la transmissivité afin de s'affranchir des effets des pertes de charges quadratiques. Les pertes de charges quadratiques sont calculées et les rabattements sont corrigés selon la méthode de [19]. La transmissivité corrigée se détermine de la même façon que précédemment par calage avec les rabattements corrigés. Dans ces conditions, les deux courbes à faire superposer sont les courbes de rabattements corrigés et théoriques.

III-2-2. Analyse en composantes principales normées (ACPN)

L'analyse statistique à plusieurs variables a été utilisée sur un nombre de paramètres hydrodynamiques et hydro-chimiques. Elle a permis d'apprécier les corrélations entre les paramètres étudiés par rapport à un phénomène. L'ACPN est en effet utilisée pour les études englobant plusieurs paramètres dont les interprétations sont déterminantes pour la compréhension de certains phénomènes. Elle permet de mettre en évidence les liens éventuels que présenteraient deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution. Cette méthode synthétise, classe les données et supprime les hétérogénéités entre les unités d'expression des variables.

Dans ce travail, le logiciel STATISTICA 6.1 a été utilisé pour l'ACPN. Cette analyse a consisté à l'étude de 8 variables hydrodynamiques de 130 forages (u.s.) : la profondeur totale (Pt), la profondeur de socle (Ps), l'épaisseur d'altération (Ea), l'arrivée d'eau 1 (AE1), le débit spécifique (Q/s), la transmissivité corrigée (Tc), le niveau statique (NS), le débit (Q) et 9 paramètres physico-chimique (variables) de 50 forages (u.s.) : dont le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), les chlorures (Cl^-), les nitrates (NO_3^-), le fer (Fe), le bicarbonate (HCO_3^-), la pression partielle de CO_2 (pCO_2), le pH, la conductivité (cond.).

L'ACPN fournit des cercles de communauté, des projections des unités statistiques dans des plans factoriels et de nombreux tableaux. Nous renvoyons le lecteur pour plus de détails aux ouvrages généraux sur l'analyse en composantes principales.

IV - RÉSULTATS

IV-1. Épaisseur d'altération et arrivées d'eau

L'épaisseur d'altération varie de 8 à 63 m avec une moyenne de 26 m. La *Figure 2* illustre la répartition spatiale des épaisseurs d'altération sur l'ensemble du secteur d'étude.

Cette carte met en évidence trois types d'épaisseurs d'altération : forte, moyenne et faible. La région étudiée est majoritairement constituée d'épaisseurs d'altération moyennes (18 à 33m), soit 70 % du territoire. Les fortes épaisseurs d'altération (> 30 m) représentent seulement 5 % et sont localisées au nord-ouest de la zone d'étude.

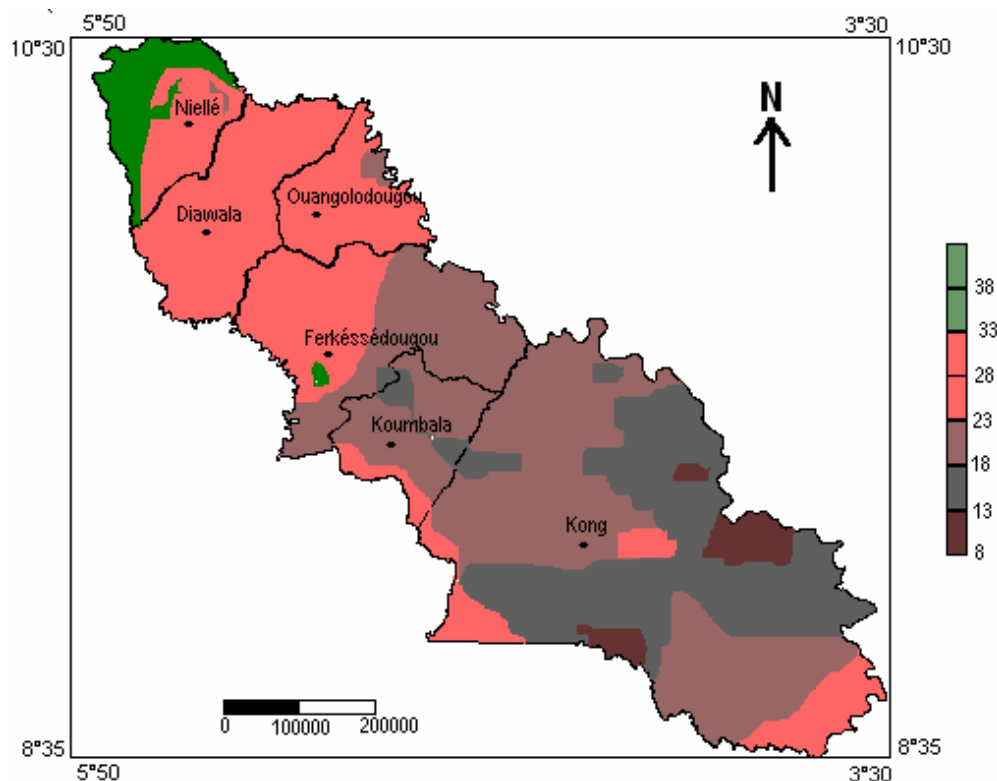


Figure 2 : Carte de répartition spatiale des épaisseurs d'altération de Ferké

Les faibles épaisseurs d'altération représentent 15 % et se rencontrent généralement dans le secteur sud. En dessous de cette couche d'altération, on enregistre des arrivées d'eau au niveau de l'horizon fissuré dont l'épaisseur atteint par endroit 60 m. Le nombre des arrivées d'eau (EA) varie d'un forage à un autre (entre 1 et 4). Ces arrivées d'eau ne sont pas toutes équivalentes, certaines sont plus productives que d'autres. Les plus productives se localisent généralement dans les trente premiers mètres sous la couche des altérites. Au delà de 65 m par rapport à la base des altérites, les AE se font très rares.

IV-2. Transmissivités et débits spécifiques

Les débits spécifiques calculés oscillent entre $0,01$ et $2,56 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ avec une moyenne de $0,27 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$. Les forages dont le Q/s est supérieur à $1 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ représentent 6% de l'ensemble des forages étudiés (soit 8 forages sur 130). Ces forages à $Q/s > 1$ sont majoritairement situés dans la localité de Ferké. Cette région est caractérisée par des épaisseurs d'altération moyenne à forte. La (Figure 3) présente les graphes des rabattements mesurés c'est-à-dire non corrigés (s_{mes}) et corrigés (s_{corr}) en fonction du temps.

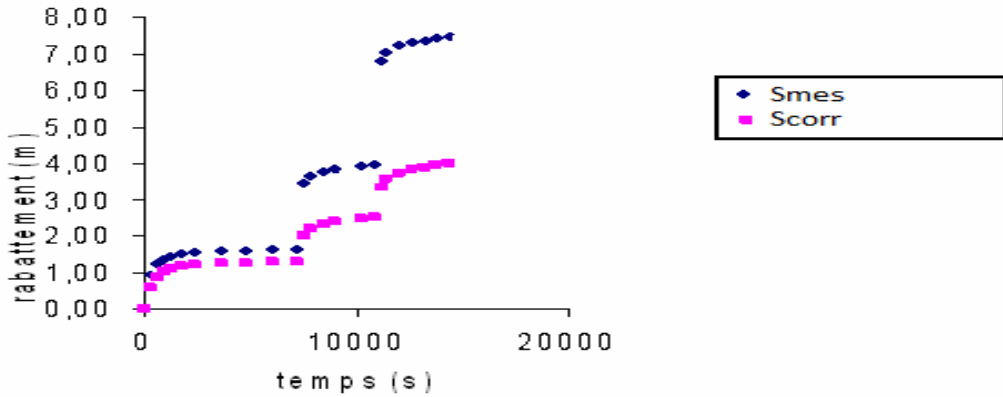


Figure 3 : Courbes de rabattements mesurés (s_{mes}) et corrigés (s_{corr}) corrigé (Yédianekaha)

Ces graphes mettent en évidence l’influence des pertes de charge sur la transmissivité évaluée sur un forage isolé. , plus le débit est fort plus l’écart entre les deux graphes est important. L’écart entre courbes de rabattements corrigés et non corrigés augmente graduellement avec le débit.

Les transmissivités brutes déterminées varient de $1,35E-06$ à $1,97 E-04 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ tandis que les transmissivités corrigées (T_c) oscillent entre $4,62E-06$ et $2,75E-04 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ avec respectivement une moyenne géométrique de $3,04E-05$ et de $4,90E-05 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Les (Figures 4a et b) représentent les courbes de rabattements corrigés et théoriques (calculés à partir de l’équation du rabattement) obtenues avant et après la procédure de calage.

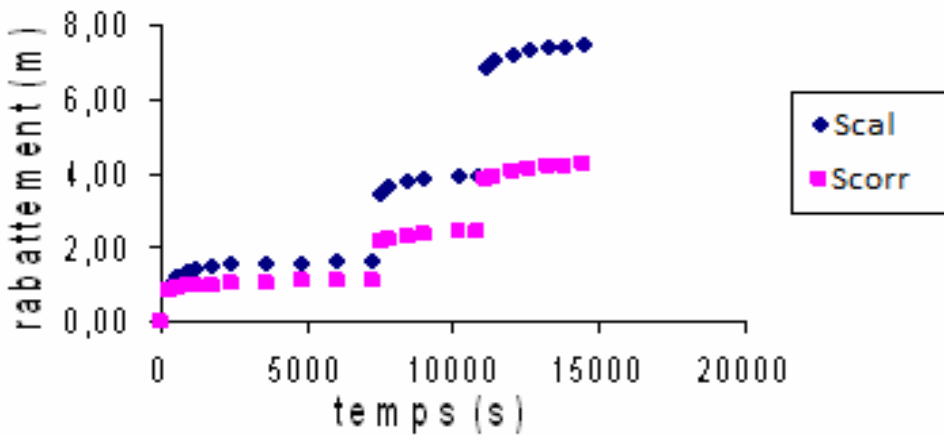


Figure 4.a : Courbes de rabattements corrigés (s_{corr}) et calculés (s_{scal}) avant la procédure de calage. Cas d’un pompage à trois paliers.

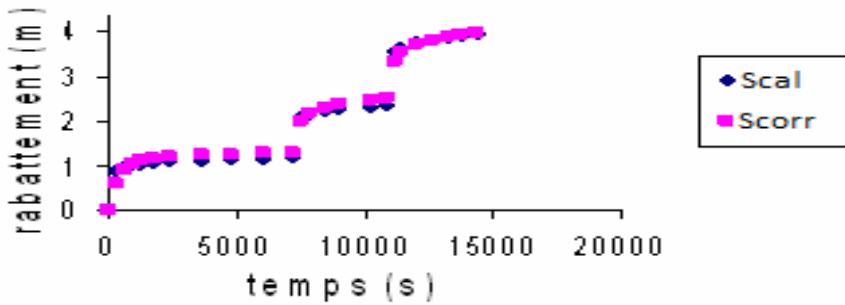


Figure 4.b : Courbes de rabattements corrigés (s_{corr}) et calculés (s_{scal}) après la procédure de calage. Cas d'un pompage à trois paliers.

Sur la *Figure 4b*, la superposition des deux courbes est remarquable et satisfaisant. Dans les deux cas la transmissivité déterminées s'échelonne sur deux ordres de grandeurs mettant en évidence l'hétérogénéité du milieu. D'une manière générale, les transmissivités corrigées sont supérieures aux transmissivités brutes. Les incertitudes affectant les transmissivités brutes oscillent entre 5 et 65 % avec une moyenne de 41 %. L'influence des pertes de charges sur la transmissivité est une sous-estimation de celle-ci. En effet, lorsque que les rabattements issus de la descente d'un pompage sur un forage isolé ne sont pas corrigés, la transmissivité déterminée est alors sous estimée.

L'analyse statistique de ces deux paramètres (T_c et Q/s) indique que ces deux paramètres sont distribués suivant la loi log-normale. La représentation de T_c et Q/s dans un diagramme bi logarithme a permis de mettre en évidence la relation empirique existant entre ces paramètres (*Figure 5*).

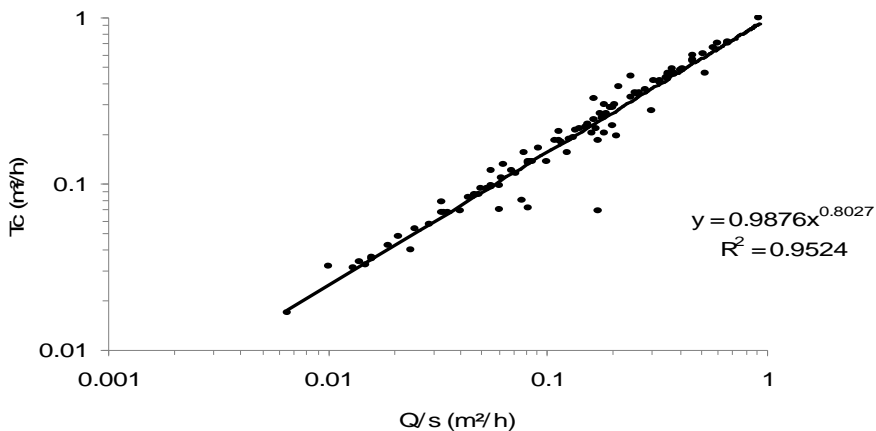


Figure 5 : Relation entre la transmissivité (T_c) et le débit spécifique (Q/s) dans un diagramme bi-logarithmique

Les points constituant le nuage de points s’organise suivant une droite sur laquelle il est possible d’ajuster une droite de régression. Ces points se répartissent au moins sur deux cycles logarithmiques. Cette relation dans les aquifères fissurés de Ferké s’écrit sous la forme (*équation 1*) :

$$T_c = 0,9876 Q/s^{0,8027} \quad (R^2 = 0,9524) \quad (1)$$

où T et Q/s sont exprimés en m².h⁻¹.

Lorsque Tc et Q/s sont exprimés en m².j⁻¹, l’équation précédente s’écrit alors sous la forme (*équation 2*) :

$$T_c = 1,8489 Q/s^{0,8027} \quad (R^2 = 0,9524) \quad (2)$$

IV-3. Caractérisation hydrodynamique des aquifères discontinus

La matrice de corrélation des différentes variables analysées est présentée dans le *Tableau I*.

Tableau I : Matrice de corrélation

Variables	Pt	Ea	Ps	AE1	Q/s	Tc	Q	NS
Pt	1	0,289	0,603	0,601	-0,499	-0,448	-0,174	0,175
Ea		1	-0,588	0,611	-0,028	0,011	0,029	0,356
Ps			1	-0,002	-0,397	-0,387	-0,171	-0,143
AE1				1	-0,271	-0,233	-0,084	0,293
Q/s					1	0,827	0,562	0,037
Tc						1	0,585	0,071
Q							1	-0,121
NS								1

La plus forte corrélation a été enregistrée entre la transmissivité corrigée (Tc) et le débit spécifique (Q/s). Des corrélations moyennes ont été enregistrées entre Ps et Pt (0,603), AE1 et Pt (0,601) et entre AE1 et Ea, (0,611). Les valeurs propres, le pourcentage de variances et les pourcentages des variances cumulées exprimées par les 3 premiers facteurs sont résumés dans le *Tableau II*.

Tableau II : Valeurs propres, variances exprimées et cumulées des variances

Facteurs	Val. Propres	% Total variance	Cumul val. propre	Cumul %
1	3,071	38,399	3,071	38,399
2	2,121	26,511	5,192	64,91
3	1,156	14,455	6,349	79,365

Les 3 premiers facteurs enregistrent 79,36 % de la variance totale exprimée. Cette variance est suffisante pour exprimer l'essentiel des interactions entre les paramètres hydrodynamiques des aquifères fissurés de Ferké. Les saturations sont présentées dans le *Tableau III*.

Tableau III : Coordonnées des variables selon les facteurs F1, F2 et F3

	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
Pt	0,783	-0,223	-0,519
EA	0,118	-0,927	0,131
Ps	0,562	0,578	-0,548
AE1	0,512	-0,689	-0,244
Q/s	-0,869	-0,146	-0,236
Tc	-0,848	-0,193	-0,286
Q	-0,614	-0,137	-0,607
NS	0,111	-0,579	0,034

L'analyse de ce tableau montre que le facteur F1 est déterminé principalement par les paramètres tels que Q/s, Tc et Pt et dans une certaine mesure par Q. Le dernier paramètre est opposé aux deux premiers sur cet axe. Le facteur F2 est caractérisé par EA, AE1 et à un degré moindre par NS. Ces trois variables sont localisées dans la partie négative de ce facteur. Le facteur F3 est caractérisé moyennement par Pt, Ps et Q.

Le cercle de communauté ou espace des variables du plan factoriel F1-F2 représentant 64,43% de la variance totale est illustré à la *Figure 6*.

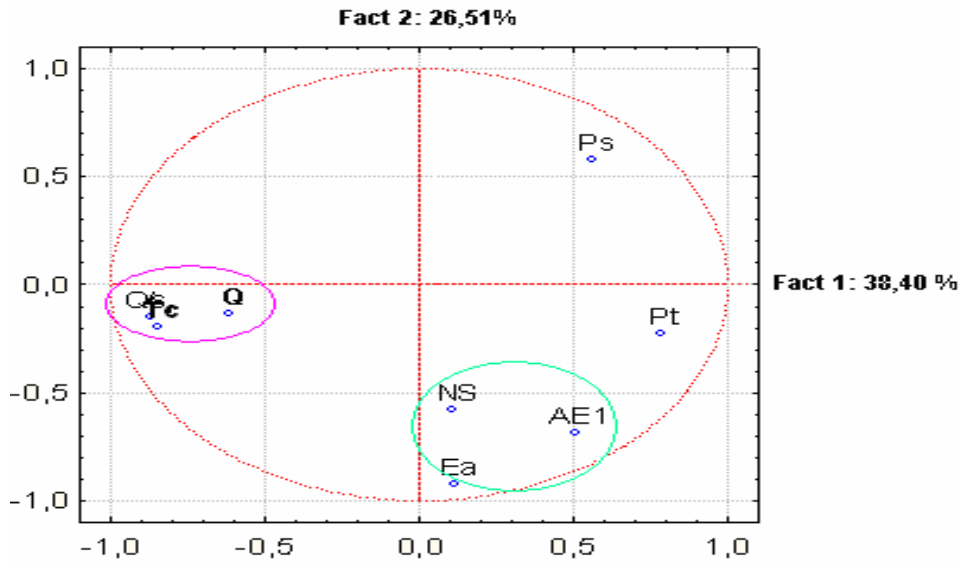


Figure 6 : Cercle de communauté dans le plan factoriel F1-F2

Ce graphe met en évidence deux regroupements préférentiels. Le groupe 1 est composé de Q, Q/s et Tc, situé dans la partie négative de F1. Le groupe 2 est constitué de NS, AE, et Ea, il est situé à l'extrémité négative de F2. Ces regroupements traduisent une corrélation entre ces variables. Ces résultats sont en conformité avec la matrice de corrélation (*Tableau I*). Au niveau de chaque regroupement les variables sont gouvernées par un phénomène commun. Les variables du groupe 1 représentent les paramètres hydrodynamiques en relation avec la productivité des forages. Le facteur F1 exprime donc la productivité des forages. La variable Pt occupe une position opposée par rapport aux variables du groupe 1. La productivité du forage diminuerait quand la profondeur totale augmente.

Au niveau du facteur 2, les variables AE et NS représentent les paramètres qui déterminent le niveau de l'eau dans les forages. Leur regroupement à l'extrémité négative de F2 pourrait exprimer la variation du niveau d'eau dans les forages. La position de Ps à mi-chemin entre F1 et F2 montre que cette variable intervient dans la définition des deux axes factoriels dans une certaine mesure.

L'analyse dans le plan factoriel F1-F3 (*Figure 7*) montre que le facteur F1 exprime la productivité car on enregistre quasiment le même regroupement que dans le plan F1-F2 (*Figure 6*).

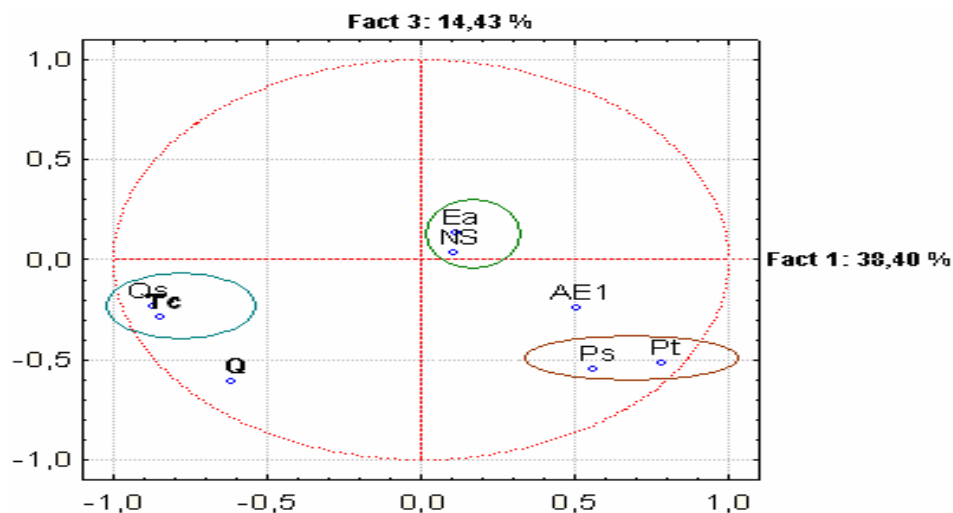


Figure 7 : Cercle de communauté dans le plan factoriel F1-F3

Le facteur F3 est mal défini dans ce plan factoriel, il est moyennement déterminé par les variables Q, Ps et Pt. Il pourrait exprimer l'influence de la profondeur sur la productivité des forages. L'EA et NS, sont situés à l'origine du cercle. Cette position montre que l'information contenue dans ces variables n'est pas accessible aux facteurs F1-F3.

IV-4. Caractérisation hydro-chimique des aquifères discontinus

La matrice de corrélation des paramètres hydrochimiques est présentée au niveau du *Tableau IV*.

Tableau IV : Matrice de corrélation

Variables	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	Fe	NO ₃ ⁻	pCO ₂	cond	pH
HCO ₃ ⁻	1	0,573	0,567	0,454	0,033	-0,169	0,142	0,594	0,437
Ca ²⁺		1	0,225	0,466	0,153	-0,027	0,071	0,526	0,313
Mg ²⁺			1	0,371	-0,007	0,174	0,058	0,503	0,156
Cl ⁻				1	-0,082	-0,116	-0,126	0,421	0,239
Fe					1	-0,048	0,234	-0,134	0,206
NO ₃ ⁻						1	0,124	0,148	-0,146
pCO ₂							1	-0,164	0,086
cond								1	0,258
pH									1

D'une manière générale, les corrélations entre les différents paramètres sont moyennes car elles ne dépassent guère 0,7. On note une corrélation entre HCO_3^- et trois paramètres (Ca^{2+} (0,573), Mg^{2+} (0,567) et Cond (0,594)) d'une part et entre Cond et deux autres paramètres (Ca^{2+} (0,526), Mg^{2+} (0,503) d'autre part. Le *Tableau V* regroupe les valeurs propres, le pourcentage de variances, et les pourcentages des variances cumulées exprimées par chacun des 4 premiers facteurs.

Tableau V : Valeur propre, variances exprimées et cumulées des variances

facteurs	val. propre	% total variance	cumul val. propre	cumul %
1	3,093	34,367	3,093	34,367
2	1,424	15,823	4,517	50,191
3	1,248	13,872	5,765	64,064
4	0,804	8,943	6,577	73,007

Ces 4 facteurs enregistrent 73 % de la variance totale exprimée. Les saturations des différentes variables sont présentées dans le *Tableau VI*.

Tableau VI : Coordonnées des variables selon les facteurs F1, F2, F3 et F4

variables	facteur 1	facteur 2	facteur 3	facteur 4
HCO_3^-	-0,865	0,109	-0,003	0,254
Ca^{2+}	-0,745	0,146	-0,055	-0,283
Mg^{2+}	-0,657	-0,173	0,388	0,265
Cl^-	-0,682	-0,207	-0,226	0,046
Fe	-0,059	0,756	0,061	-0,451
NO_3^-	0,043	-0,213	0,856	-0,331
pCO ₂	-0,027	0,655	0,476	0,467
cond	-0,782	-0,306	0,142	-0,221
PH	-0,521	0,42	-0,238	-0,081

Les variables caractérisant le facteur F1 ont toutes des saturations négatives. Il s'agit de HCO_3^- , Cond, Ca^{2+} , Mg^{2+} et Cl^- . Au niveau du facteur F2, les variables caractéristiques sont Fe et pCO_2 . Le facteur F3 est caractérisé seulement par le NO_3^- .

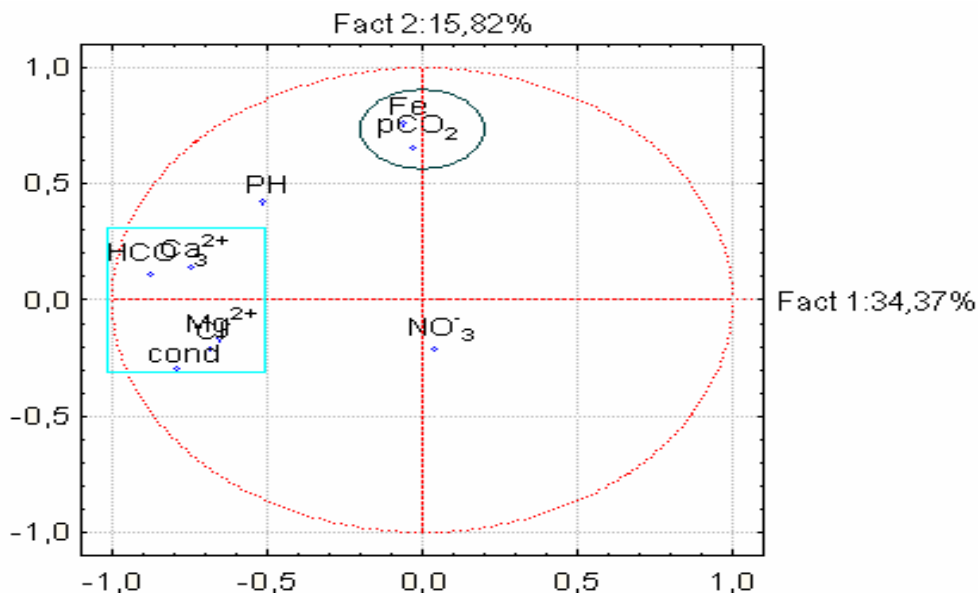


Figure 8 : Cercle de communauté dans le plan factoriel F1-F2

Dans le plan factoriel F1-F2 (Figure 8), on note deux regroupements significatifs de variables. Le premier est celui formé par Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- et cond, situé à l'extrémité négative de l'axe F1. Le second est celui formé par Fe et pCO_2 situé à l'extrémité positive de l'axe F2. Les variables du premier groupe interviennent dans la minéralisation des eaux. Le facteur F1 traduit donc un mécanisme de minéralisation, il rend compte des conditions d'acquisition du chimisme de l'eau. Le facteur F1 exprime la minéralisation temps de séjours. En effet, les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , apparaissent dans l'eau après un contact prolongé des eaux souterraines avec les roches encaissantes. Dans le second regroupement, la proximité du Fe et de la pCO_2 traduit une évolution commune de ces variables. Le facteur 2 exprime le phénomène d'oxydation.

L'analyse de l'espace factoriel F1-F3 confirme que le facteur F1 représente la minéralisation temps de séjours dans les eaux souterraines de la zone d'étude (Figure 9).

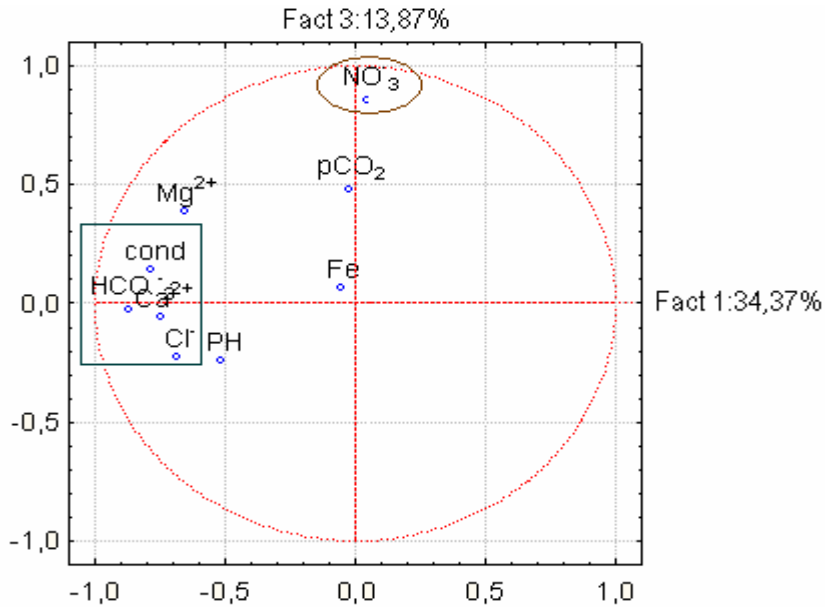


Figure 9 : Cercle de communauté dans le plan factoriel F1-F3

Les variables, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , et cond sont toujours localisées à l'extrémité négative de l'axe F1. Le facteur F3 est caractérisé par NO_3^- . Le NO_3^- provient de l'utilisation d'engrais, de pesticides et de la décomposition de la matière organique. Le facteur F3 exprime l'origine superficielle des substances dissoutes dans les eaux souterraines.

V - DISCUSSION

Les épaisseurs enregistrées sont très variables à l'instar des épaisseurs d'altération rencontrées en zone de socle tropicale. La variation des épaisseurs d'altération dépend de plusieurs paramètres dont la composition minéralogique des roches, de l'intensité des fractures, le type de climat, le processus d'altération, des conditions de drainage [5]. Le secteur nord de la zone étudiée caractérisé par de fortes épaisseurs d'altération est constitué majoritairement de granites hétérogènes à biotite.

Les AE diminuent avec la profondeur, et la zone la plus productive se localise sous les couches d'altération, là où les fractures sont les plus décomprimées et les mieux ouvertes. Au-delà de cette zone les débits des arrivées d'eau chutent avec la fermeture progressive des fractures sous l'effet de la charge lithostatistique [5,20]. Ces observations sont en accord avec les résultats des travaux récents menés en région de socle [1-4]. Ces auteurs ont montré qu'au niveau de l'horizon fissuré, la

fréquence des fissures diminue avec la profondeur. Ils indiquent aussi que le développement de la fissuration est lié au processus d'altération, principalement à l'altération des minéraux phylliteux (biotites en particulier) dont le gonflement provoque la fissuration [3]. Le débit spécifique calculé reste d'une manière générale assez faible à l'instar des autres régions de Côte d'Ivoire [5,16,21-23]. Selon [20,24], l'explication de ce résultat est à rechercher dans la méthode d'implantation des forages, basée essentiellement sur des considérations géomorphologiques. La géophysique intervient quand le taux d'échec devient élevé. En dehors de la stratégie d'implantation, [24] indique que d'autres facteurs comme le colmatage des fractures et l'effet de limite imperméable qui peuvent influencer le débit spécifique.

Les transmissivités calculées s'apparentent à celles rencontrées dans d'autres régions de socle du pays [5,13,16,21,22,25]. L'influence des pertes de charge sur la transmissivité est souvent importante comme l'ont montré [13]. Ces auteurs ont montré dans la région de Korhogo que cette influence variait entre 3 et 27 %. Ces auteurs recommandent de corriger les rabattements mesurés (lors de la descente) dans le cas d'un pompage sur des forages isolés. En effet, la modélisation des écoulements souterrains et la gestion des ressources en eau nécessitent les connaissances des paramètres hydrodynamiques plus fiables.

La relation existant entre la transmissivité (T_c) et le débit spécifique (Q/s) obtenue dans le cadre de cette étude (éq. 3) pour la région de Ferké reste significative et satisfaisante. En effet, la relation empirique a été déterminée au moins sur deux cycles logarithmiques. Cette relation est fonction de plusieurs paramètres [13] et est caractéristique d'une région donnée, c'est-à-dire qu'elle n'est pas transposable à une autre région.

Au niveau de l'analyse multidimensionnelle des paramètres hydrodynamiques, la corrélation entre AE, NS et EA, pourrait signifier qu'une augmentation de l'épaisseur d'altération entraînerait une augmentation du niveau d'eau dans les aquifères. Plus la profondeur de forage augmente plus la productivité diminue et ceci en relation avec la réduction du nombre de fissures et la fermeture progressive de celles-ci. La signature chimique des eaux de la région de Ferké est assurée par trois principaux processus : minéralisation-temps de séjour, oxydation et origine spatiale des substances dissoutes.

Le mécanisme de minéralisation des eaux en alcalino-terreux et bicarbonates est une hydrolyse acide des roches contenant des minéraux silicatés (feldspaths, amphiboles et micas). Le regroupement de Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- à l'extrémité négative de F1 indique que le processus de minéralisation est rapide et facile, cela peut être dû à la dissolution des sels dans les aquifères. La dissolution des sels entraîne la libération des ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- . La présence de nitrates dans les eaux souterraines se fait par infiltration des eaux à partir des zones superficielles. Le cortège pétrographique de la région de Ferké est riche en minéraux ferromagnésien

(amphibole, biotite, pyroxène, etc.). L'altération de ces roches libère essentiellement des ions comme Mg^{2+} , Ca^{2+} et Fe^{2+} qui sont par la suite entraînés vers les eaux souterraines [16]. Des résultats analogues ont été obtenus par [26] dans la région d'Agboville et [16] dans la région de Tiassalé (Sud de la Côte d'Ivoire).

VI - CONCLUSION

De nombreux résultats ont été obtenus au terme de ce travail et se résument comme suite. La région de Ferké est caractérisée au niveau de son sous sol par des épaisseurs d'altération majoritairement moyennes. A la base de ces altérites se rencontrent des arrivées d'eau dans l'horizon fissuré dont la dernière est enregistrée à 63m à partir du toit du socle. Le débit spécifique est d'une manière générale faible avec seulement 8 % des Q/s supérieurs à $1 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$.

Les transmissivités corrigées s'échelonnent sur deux ordres de grandeurs. Les pertes de charges quadratiques ont tendance à sous-estimer entre 5 et 65% la transmissivité déterminée au niveau des pompages sur des forages isolés. La caractérisation hydrodynamique des aquifères fissurés a montré que la profondeur des forages a une influence sur la productivité. La caractérisation hydrochimique a permis de mettre en évidence les différents processus responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines de Ferké. Il s'agit du temps de séjours des eaux en contact avec l'encaissant, l'oxydation et l'infiltration des substances dissoutes issues de la décomposition de la matière organique.

Les résultats obtenus dans cette étude sont certes intéressants mais méritent d'être complétés par d'autres investigations notamment la caractérisation géométrique des réseaux de fractures. Ces travaux permettront de disposer d'une base de données pour entreprendre la modélisation hydrogéologique.

Remerciements

Les Auteurs voudraient remercier les services du Ministère des infrastructures économiques de la région de Korhogo qui ont mis à leur disposition toutes les données nécessaires à cette étude. Ils remercient également tous les instructeurs anonymes pour leurs remarques et critiques qui ont permis d'améliorer ce présent article.

RÉFÉRENCES

- [1] - WYNS R., QUESNEL F., SIMON-COINÇON R., GUILLOCHEAU F., & LACQUEMENT F., Major weathering in France related to lithospheric deformation. *Géologie de France*, 1, (2003) 79–87.
- [2] - WYNS R., GOURRY J.-C., BALTASSAT J.-M., LEBERT F., Caractérisation multiparamètres des horizons de surfaces (0-100m) en contexte de socle altéré, in : *2^e Colloque GEOFCAN*, BRGM, IRD, UPMC, (1999) 105-110.
- [3] - MARECHAL J.-C., WYNS R., LACHASSAGNE P., SUBRAHMANYAM K., & TOUCHARD F., Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Geoscience*, 335 : (2003) 451–460.
- [4] - LACHASSAGNE P., WYNS, R. & DEWANDEL B., The fracture permeability of hard rock aquifer is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23 : (2011) 145-161
- [5] - LASM T., Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistique et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de doctorat, Université de Potiers, France, (2000) 274p.
- [6] - KOUAMÉ K.F., LASM T., DE DREUZY J.R., AKAFFOU A.G., BOUR O. & DAVY P., Contribution d'un modèle hydrogéologique à fractures discrètes à l'étude des aquifères fracturés du socle Archéen de Touba (Nord-Ouest, Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences de l'Eau*, 22 (5), (2010) 617-632.
- [7] - SORO G., SORO N., AHOUSSE K. E., LASM, T. ; KOUAME, F.K. ; SORO, T. D. ; BIEMI J., Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères fracturés des formations cristalline et métamorphique dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire). *Estudios Geológicos*, 66(2), (2010) 227-242
- [8] - GEOMINE Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Niellé, cahier n°3, (1982a) 20 p.
- [9] - GEOMINE Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise. Carte de Kong, Cahier n°7, (1982b) 19 p.
- [10] - JOURDA J.P., Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'ouest. Concept de l'Hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire, Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2005) 429 p.

- [11] - JOURDA J. P., SALEY M. B., DJAGOUA E. V., KOUAME K. J., BIEMI J., RAZACK M., 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, *Téledétection*, Vol. 5, n°. 4, (2006a) 339-357.
- [12] - JOURDA J. P., DJAGOUA E. V., KOUAME K., SALEY M. B., GRONAYES C., ACHY J. J., BIEMI J., RAZACK M., Identification et cartographie des unités lithologiques et des accidents structuraux majeurs du département de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) : apport de l'imagerie ETM+ de Landsat, *Téledétection*, Vol. 6, 02, (2006b) 123-142.
- [13] - ONETIE Z O., LASM T., BAKA D., FOSSOU N. M. R., KOUAKOU S. O., YOUANTA M., DE LASME O., OGA M.S., SORO N., influence des pertes de charges quadratiques sur la transmissivité et le débit spécifique déterminés sur des forages isolés : cas de la région de Korhogo (au nord de la Côte d'Ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, n°16, (2011) 261-283.
- [14] - YOUAN TA M., Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat unique, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2008) 236 p.
- [15] - YOUAN TA M., LASM T., JOURDA J. P., KOUAME K. F., RAZACK M., Cartographie des accidents géologiques par imagerie satellitaire Landsat-7 ETM+ et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (nord-est de la Côte d'Ivoire). *Téledétection*, 8(2), (2008) 119-135.
- [16] - LASM T., RAZACK M., YOUAN TA M., Geostatistical assessment of the transmissivity of crystalline fissured aquifer in the Bondoukou Region, northeast Côte d'Ivoire. in the IAH-Selected Papers book series titled : Applied Groundwater Studies in Africa - Segun Adelana, Alan MacDonald, Tamiru Alemayehu & Callist Tindimugaya (editors); Publishers: Taylor & Francis, The Netherlands, (2008) 473-485.
- [17] - YOUAN TA M., LASM T., JOURDA J. P., SALEY M. B., MIESSAN G. A., KOUAME K., BIEMI J., Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère. Cas de Bondoukou (Côte-d'Ivoire). *Revue de Géomatique*, Vol. 21, n°. 1, (2011) 43-71.
- [18] - COOPER H., JACOB C., A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, *Trans, Am. Geophys. Union*, Vol. 27, 04 (1946) 526-534.

- [19] - FORKASIEWICZ J., Essais de puits par paliers de débit. Analyse et interprétation des données. *Doc. B.R.G.M.*, Orléans (1978).
- [20] - BIEMI J., Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants sub-sahéliens du socle précambrien de l'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, (1992) 493p.
- [21] - LASM T., KOUAME F., OGA M., JOURDA J., SORO N., KOUADIO H., Etude de la productivité des réservoirs fracturés des zones de socle Cas du noyau archéen de Man-Danané (Ouest de la Côte de la d'Ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, n°5, (2004) 97-115.
- [22] - RAZACK M., LASM T., Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast), *J. Hydrol.* 325, (2006) 164-178
- [23] - DE LASME O., LASM T., OGA M-S., YOUAN TA M., BAKA D., ETTIEN F. B., KOUAKOU S., ONETIE O. Z., YAO T. K., Analyse des propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Hydrodynamic properties analysis of fissured aquifers of San-Pedro area (South-western Côte d'Ivoire). *Estudios geologicos*, (Sous Presse)
- [24] - FAILLAT J.P., Hétérogénéité et effet d'échelle dans les fissures. Approche par pompage d'essai sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest). *Hydrogeol.* n°1, (1986) 65-76.
- [25] - BAKA D., LASM T., OGA M-S., YOUAN TA M., DE LASM O., KOUAKOU S. O., ETTIEN F. B. Characterization of transmissivity in the fractured reservoirs in the Oumé area (Centre of Cote d'Ivoire). *American Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 2, n° 2, (2011) 310-322.
- [26] - GONE D., SAVANE I., GOBLE., Caractérisations physico-chimiques majeures des eaux souterraines des aquifères fissurées de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, n°05, (2004) 117-133.