

# 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)*

O. Zéphir De Lasme<sup>1</sup>, T. Lasm<sup>1</sup>, M.-S. Oga<sup>1</sup>, M. Youan Ta<sup>1, 2</sup>, D. Baka<sup>1</sup>, F. Boni Ettien<sup>1</sup>, S. Kouakou<sup>1</sup>, O. Zaïbo Onetie<sup>1</sup>, T. Koffi Yao<sup>1</sup>

### RESUME

La région de San-Pedro est localisée dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire et couvre une superficie de 6 912 km<sup>2</sup>. Les ressources en eau exploitées dans cette région sont constituées des eaux de surface et des eaux souterraines des aquifères des altérites et de fissures du socle précambrien. La présente étude a pour objectif d'analyser les propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de San-Pedro d'un point de vue statistique et géostatistique, en vue d'une meilleure connaissance et gestion des ressources en eau souterraine. La base de données comporte 110 forages captant les eaux des fissures profondes. La transmissivité a été déterminée par interprétation des essais de pompage à l'aide des méthodes classiques. Le débit spécifique (Q/s) a été calculé pour tous les forages au niveau du troisième palier, après correction des rabattements. Les valeurs de la transmissivité et du débit spécifique oscillent respectivement entre  $1,27 \times 10^{-6}$  et  $8,59 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> et entre  $1,09 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> et 13,2 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>. Ces deux paramètres s'échelonnent sur trois ordres de grandeurs montrant l'hétérogénéité du milieu. Une relation empirique a été établie entre la transmissivité et le débit spécifique pour la région de San-Pedro. Cette relation peut être utilisée pour la détermination de la transmissivité dans les secteurs où elle fait défaut. Le variogramme de la transmissivité est caractérisé par une double structuration. L'estimation de la transmissivité par krigeage est satisfaisante car les valeurs observées et estimées sont comparables. Les résultats acquis dans cette étude concourent à une meilleure compréhension des propriétés hydrogéologiques du sud-ouest de la Côte d'Ivoire.

**Mots clés:** aquifère fissuré, San-Pedro, transmissivité, débit spécifique, relation empirique, krigeage.

### ABSTRACT

San-Pedro area is localized in south-western Côte d'Ivoire and covers a surface of 6 912 km<sup>2</sup>. Water resources exploited in this area are constituted of surface waters and groundwater of weathered and fissured aquifers. The aims of this study are to analyze hydrodynamic properties of fissured aquifers of San-Pedro on statistical and geostatistical viewpoints for a better knowledge and management of groundwater resources. Data base includes 110 drillings tapping fissured aquifers. Transmissivity was calculated by interpreting of pumping tests with classical methods. Specific capacity was calculated at the end of the third step for all drillings after correction of drawdowns. Transmissivity and specific capacity values oscillate between  $1.27 \times 10^{-6}$  and  $8.59 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> and between  $1.09 \times 10^{-2}$  and 13.2 m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup> respectively. These two parameters span three orders of magnitude showing the strong heterogeneity of the medium. An empirical relationship was established between transmissivity and specific capacity of San-Pedro area. This relationship can be used to determine transmissivity in the sectors

<sup>1</sup> Département 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). Email: theophile\_lasm@yahoo.fr, oga\_oms@yahoo.fr, youanta@yahoo.fr, omerzephir@hotmail.com, dervingb@yahoo.fr, etboni2000@yahoo.fr, yakoft@yahoo.fr, onetieoscar@yahoo.fr, suzikouakou@yahoo.fr

<sup>2</sup> Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), U.F.R des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, 22 B.P. 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

where this data is lacking. Variogram of transmissivity is characterized by a double structuring. Transmissivity assessment by kriging is satisfactory, observed and estimated values are comparable. The findings obtained in this study lead to a better understanding of hydrogeological properties of south-western Côte d'Ivoire.

**Keywords:** fissured aquifer, San-Pedro, transmissivity, specific capacity, empirical relationship, kriging.

## Introduction

Le socle ivoirien est majoritairement constitué de roches dures cristallines et cristallophylliennes abondamment fracturées et déformées par les différents événements tectoniques qui se sont succédés dans les domaines archéen et protérozoïque de Côte d'Ivoire. Ce socle occupe environ 97,5% du territoire ivoirien. Les principales ressources en eau souterraine sont contenues dans les réservoirs des altérites et de fissures du socle. Ces aquifères sont issus respectivement de l'altération des roches et de la fracturation du socle. Dans le souci d'une meilleure gestion des ces ressources en eau pour l'approvisionnement des différentes populations, il apparait nécessaire de maîtriser les propriétés hydrogéologiques de ces aquifères. Depuis ces trois dernières décennies, de nombreux travaux (Faillat, 1986; Biémi, 1992; Lasmé, 2000; Jourda, 2000; Saley, 2003; Kouamé *et al.*, 2005; Diop & Tijani, 2008; Youan Ta, 2008; Youan Ta *et al.*, 2008; Koita, 2010; Soro, 2010; Kouamé *et al.*, 2010) ont été réalisés en Afrique de l'Ouest dans le cadre de la connaissance des aquifères développés en milieu de socle. D'importants résultats ont été obtenus: les aquifères des altérites et de fissures sont caractérisés respectivement par des fonctions capacitatives et conductrices. Les premiers sont superficiels et les seconds plus profonds. Ces deux aquifères sont généralement superposés. Les aquifères fissurés sont des réservoirs assez intéressants pour l'alimentation en eau potable des populations car ils sont moins vulnérables à la pollution occasionnée par les activités humaines. Les aquifères des altérites jouent un rôle de filtre et de barrière à la pollution. En effet, ces derniers sont sujets à de fréquentes pollutions (polluants azotés, bactériologiques et parasitologiques, etc.). Du fait de la garantie qu'offre leur profondeur, les aquifères fissurés constituent les réservoirs les plus recherchés et exploités en zone de socle.

Le réseau de fractures joue le rôle de drains dans l'écoulement des eaux souterraines. Lorsque les fractures sont d'extension kilométrique à plurikilométrique, elles favorisent la connexion avec les petites fractures généralement plus nombreuses et

contribuent à l'écoulement souterrain régional (Lasmé, 2000; Kouamé *et al.*, 2005; Koita, 2010; Kouamé *et al.* 2010). C'est la raison pour laquelle, les aquifères fissurés constituent les principaux réservoirs recherchés dans le cadre des programmes d'hydraulique villageoise et urbaine en Afrique en général et en Côte d'Ivoire en particulier. Les longueurs de fractures sont de tailles variables et peuvent s'échelonner sur plusieurs ordres de grandeurs (Bodin et Razack, 1999; Lasmé, 2000; De Dreuzy, 2000; Lasmé & Razack, 2001; Darcel, 2002; Kouamé *et al.*, 2005; Youan Ta, 2008, Youan Ta *et al.*, 2008).

Depuis les années 1970, de nombreux efforts ont été consentis en Côte d'Ivoire dans le cadre de l'implantation des forages pour l'approvisionnement en eau potable des populations avec l'aide des partenaires nationaux et internationaux. Ces programmes ont permis la réalisation de plus de 15 000 forages dont la répartition spatiale est fonction de la densité de population. Les forages d'hydraulique villageoise sont équipés de pompes à motricité humaine dont le débit d'exploitation est généralement supérieur ou égal à  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Malheureusement à l'heure actuelle, de nombreux ouvrages sont hors d'usage pour des raisons d'entretien et de dysfonctionnement. A cela s'ajoute une démographie croissante qui a entraîné une augmentation des besoins en eau. Le taux de couverture des besoins en eau à l'échelle nationale et au niveau de la région de San-Pedro varie respectivement de 32 à 100% et de 43 à 54%. Il apparait impératif d'effectuer des nouvelles recherches en vue d'implanter des points d'eau à gros débit pour l'approvisionnement en eau des populations.

De nombreuses études hydrogéologiques ont été menées en Côte d'Ivoire ces deux dernières décennies dans le cadre de la connaissance des propriétés hydrochimiques et isotopiques (Biémi, 1992; Oga, 1998; Soro, 2002, Adiaffi, 2008; Ahoussi, 2008), hydrodynamiques (Faillat, 1986, Lasmé, 2000; Razack & Lasmé, 2006; Soro, 2010) et géométriques (Kouamé, 1999; Lasmé, 2000; Lasmé & Razack, 2001; Saley, 2003; Jourda, 2005, Jourda *et al.*, 2006; Lasmé *et al.*, 2008; Youan Ta, 2008; Youan Ta

*et al.*, 2008; Yao, 2009). Malheureusement dans le sud-ouest ivoirien, les travaux portant sur l'hydrogéologie sont très rares et fragmentaires, les seuls travaux connus sont ceux de Géomines (1982) et de Lasm *et al.* (2011). C'est dans le souci de mieux connaître les réservoirs fissurés de cette région que cette étude a été entreprise. Elle a pour objectif principal, une meilleure connaissance des propriétés hydrodynamiques des réservoirs fissurés de la région de San-Pedro en vue d'une meilleure gestion de leur ressource en eau.

### Présentation de la zone d'étude

Située dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes 4°15' N et 5°30' N, et entre les longitudes 6°15' W et 7°20' W, la région étudiée couvre une superficie d'environ 6912 km<sup>2</sup>. La population de cette région a été estimée en 1998 à 442204 habitants (Géohive, 2008). Selon les estimations du Ministère des Infrastructures Economiques, cette population avoisinerait 639000 habitants à l'horizon 2012.

Au plan géomorphologique, le relief est assez monotone avec de vastes plaines parsemées de petites collines dont la pente n'excède pas 13% favorisant l'écoulement des eaux vers la mer. Le coefficient de ruissellement moyen du principal fleuve de la région a été estimé à 24%. Le réseau hydrographique est dense avec 4 principaux fleuves côtiers. Les cours d'eau ont un régime hydrologique qui est calqué sur celui des précipitations. La végétation se caractérise par une forêt sempervirente et une savane herbeuse marquée par des rôniers et arbustes. Cette forêt présente par endroits des dégradations dues aux activités anthropiques. Le régime climatique est de type équatorial de transition avec deux saisons de pluies et deux saisons sèches. La pluviométrie annuelle sur la période allant de 1995 à 2010 est comprise entre 1200 et 1900 mm avec une moyenne de 1490 mm. Les températures moyennes enregistrées oscillent entre 25 et 30° C. L'évapotranspiration évaluée sur cette période est égale à 1206 mm. L'absence d'études isotopiques dans cette région n'a pas permis d'évaluer la recharge des eaux souterraines. Les sols sont majoritairement de types ferrallitiques et hydro-morphes.

Le sous-sol de la région de San-Pedro appartient au domaine Protérozoïque de Côte d'Ivoire. Elle est constituée au plan pétrographique de roches cristal-

lines et cristallophylliennes: gneiss, migmatites, granites, granodiorite et micaschistes (figure 1). D'un point de vue tectonique et structural, cette région se caractérise par une poly déformation constituée de mécanismes d'aplatissement et de cisaillement ductile avec un métamorphisme de type rétrograde. Deux déformations majeures ont affecté cette partie du pays selon les travaux de Papon et Lemarchand (1973) et Yacé (2002): i) une tectonique tangentielle caractérisée par le style pliatif et la mise en évidence des plis isoclinaux à plans axiaux sub-verticaux, ii) une tectonique cassante caractérisée par de nombreuses fractures d'extension locale à régionale. Les différents événements tectoniques qui se sont succédés dans cette région, ont abouti à une fracturation bien développée.

### Données et méthodes

#### Données

Les données hydrogéologiques utilisées sont essentiellement les fiches techniques de forages réalisés par les sociétés FORACO-CI (Compagnie de forages en Côte d'Ivoire) et CGC-CI (Compagnie d'Ingénierie Géologique Chinoise en Côte d'Ivoire) respectivement en 1996-1997 et 1998-1999. Ces fiches comportent des informations sur les épaisseurs d'altération, la profondeur totale du forage, la lithologie des formations traversées, les profondeurs des arrivées d'eau, le débit air-lift, le rapport des essais de pompage, etc. La figure 1 illustre la répartition des différents forages étudiés. Cette répartition n'est pas homogène sur l'ensemble de la zone d'étude. Ces forages captent essentiellement les eaux des réservoirs fissurés.

#### Méthodes

Les données de pompage disponibles sont les données de pompage de courte et de longue durée, ils durent 6 à 12 heures et 24 heures respectivement avec une remontée généralement de 4 heures. En Côte d'Ivoire en dehors du bassin sédimentaire côtier, il n'existe pas de piézomètres d'observation dans les régions de socle pour des raisons essentiellement économiques. En effet, le coût de réalisation d'un piézomètre est sensiblement égal à celui d'un forage normal d'où le choix des autorités de

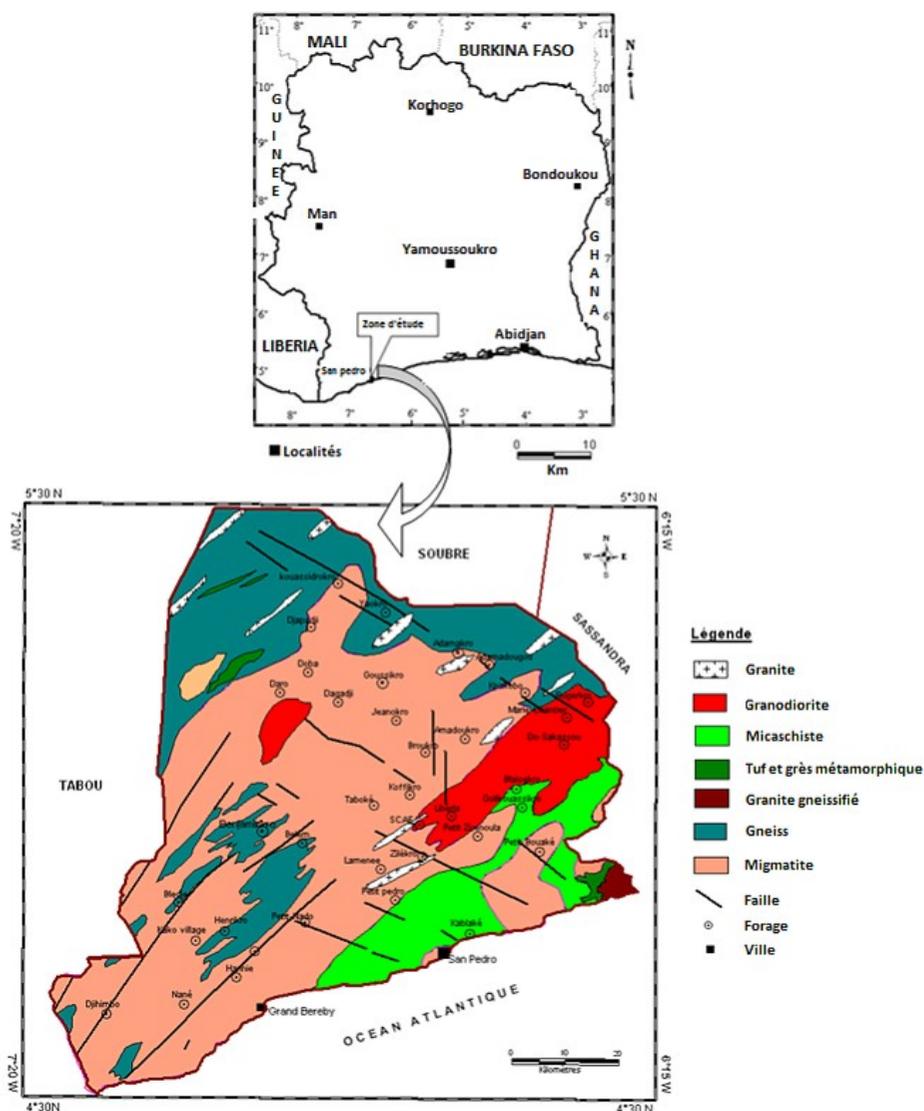


Fig. 1.—Présentation de la zone d'étude et carte géologique de la région de San Pedro.

réaliser un forage dans une autre localité plutôt qu'un piézomètre d'observation. Les mesures de rabattements disponibles sont donc celles du forage de pompage. La transmissivité peut être évaluée aussi bien avec les données de la descente que de la remontée du forage de pompage. Dans le premier cas, la valeur de la transmissivité est entachée d'erreur due aux incertitudes dans les mesures causées par les pertes de charges dans le forage, pouvant atteindre 50% voire plus dans certains cas (Lasm, 2000, Kouakou *et al.*, 2010; Onétié *et al.*, 2010). Dans le second cas, la valeur de la transmissivité obtenue est beaucoup plus fiable car les pertes de charges dans le forage sont négligeables. La transmissivité a été évaluée à l'aide de la méthode de

Cooper-Jacob (1946), en utilisant les données de la remontée afin d'éliminer les effets des pertes de charges quadratiques dans le forage et autour du forage comme l'ont suggéré Kawecky (1993, 1995), Lasm (2000) et Razack & Lasm (2006). La théorie de cette méthode ne sera donc pas présentée ici car elle est devenue classique, le lecteur pourra consulter l'abondante littérature disponible sur ce sujet (voir Kruseman & de Ridder, 1990). Le socle ivoirien étant abondamment fracturé comme l'attestent les travaux de différents auteurs (Lasm & Razack, 2001; Youan Ta *et al.*, 2008; Kouamé *et al.*, 2010), le milieu peut être considéré comme un milieu poreux équivalent (Lasm, 2000; Lasm *et al.*, 2008). Les méthodes d'interprétation développées

pour le milieu poreux peuvent être donc utilisées dans ce contexte.

Le débit spécifique ( $Q/s$ ) a été calculé à la fin du troisième palier au niveau de tous les forages. Les rabattements ont été corrigés selon la méthode de Forkasiewicz (1978) avant la détermination de la transmissivité et du débit spécifique. Les pertes de charges quadratiques sont calculées par interprétation des tests de pompage par palier (Kruseman & de Ridder, 1990). La base de données étudiée comporte 110 forages sur lesquels des essais de pompes ont été exécutés.

La transmissivité ( $T$ ) peut également être déduite des données de débits spécifiques ( $Q/s$ ) disponibles, en utilisant une approche analytique, empirique ou géostatistique (Mace, 2000; Srivastav *et al.*, 2007). En effet, les valeurs du débit spécifique ( $Q/s$ ) sont généralement plus nombreuses que celles de la transmissivité dans les différentes bases de données du fait que  $Q/s$  constitue un paramètre facilement mesurable (Razack & Lasm, 2006).

L'approche analytique dérive le plus souvent des équations théoriques de Thomasson *et al.* (1960), Brown (1963) et Théis (1963). L'approche empirique est basée sur la détermination d'une relation empirique entre  $T$  et  $Q/s$  et requiert au moins 25 couples de données ( $T$ ,  $Q/s$ ) mesurés dans les mêmes forages (Mace, 1997). Dans l'approche géostatistique,  $T$  est estimée par les techniques du co-krigeage (Aboufirassi & Marino, 1984; Ahmed & de Marsily, 1987; Lasm, 2000; Razack & Lasm, 2006) ou par krigeage simple (Razack & Lasm, 2006, Lasm *et al.*, 2008). Dans le co-krigeage de  $T$ ,  $Q/s$  est utilisé comme une variable secondaire ou auxiliaire. Le co-krigeage suggère que le débit spécifique soit connu en beaucoup plus d'endroits que la transmissivité, ce qui n'est pas le cas ici. La transmissivité sera donc estimée par les techniques du krigeage.

La transmissivité a été estimée par les approches empiriques et géostatistique. La première approche va consister à déterminer une meilleure relation empirique entre ces deux paramètres ( $T$ ,  $Q/s$ ) pour les aquifères fissurés de la région de San-Pedro. La recherche d'une relation empirique entre ces deux paramètres est basée sur l'usage de la droite de régression dans un diagramme bi-logarithmique. Ceci est conforme au caractère lognormal de ces deux variables, largement reconnu dans la littérature: milieux poreux (Ahmed & Marsily, 1987; Razack & Huntley, 1991) et milieux fissurés (Fabbri, 1997; Jalludin & Razack, 2004; Razack & Lasm, 2006, Soro *et al.*, 2010; Baka *et al.*, 2011).

Tableau 1.—Classification des débits air lift des forages de la région de San Pedro

	$Q \leq 1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$1 < Q < 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$Q \geq 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Nombre	36	53	21
Minimum	0,32	1,2	5,1
Maximum	1	4,8	36
Moyenne	0,72	2,21	12,55
Ecart-type	0,20	0,95	7,93
CV	28,24	42,86	63,20

L'approche géostatistique est basée sur l'analyse variographique et l'estimation par krigeage. L'estimation géostatistique de la transmissivité par krigeage a été abordée par divers auteurs (Razack & Lasm, 2006; Lasm *et al.*, 2008; Baka *et al.*, 2011). Nous ne présenterons pas ici la méthode car elle est très bien développée dans la littérature. Nous renvoyons donc le lecteur à consulter les travaux de Journel & Huijbregts (1978) et d'Isaaks & Srivastava (1989) pour plus de détails sur la théorie du krigeage.

## Résultats

### Productivité des aquifères

Dans la région étudiée, le niveau de l'eau souterraine est généralement situé entre 1 et 25 m en dessous de la surface du sol. Les puits traditionnels de grand diamètre captent les eaux des altérites avec un débit modéré. L'épaisseur des couches d'altération varie entre 1 et 35 m avec une moyenne de 16 m. Ces épaisseurs sont beaucoup plus importantes sur les schistes que sur les granites. L'analyse du log des forages révèle les informations suivantes:

— le débit air-lift dans les différents forages est compris entre 0,43 et 36  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  avec une moyenne de 3,7  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , et se répartit de la manière suivante (tableau 1):

- $Q \leq 1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ : 33% des forages;
- $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} < Q < 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ : 48% des forages;
- $Q \geq 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ : 19% des forages.

— la profondeur des forages varie de 31 à 81 m avec une profondeur moyenne de 55 m. Les forages productifs ( $Q \geq 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) ont une profondeur moyenne de 56 m tandis que les forages à débit très faible ( $Q < 1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) ont une profondeur moyenne de 60 m.

Tableau 2.—Répartition des arrivées d'eau (AE) en fonction des classes de profondeur

Classe de profondeur (m)	Nombre des AE	Q <sub>moy</sub> des AE (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )
00-10	01	00,50
10-20	06	03,33
20-30	21	03,17
30-40	38	05,91
40-50	21	02,24
50-60	15	02,02
60-70	05	00,96
70-80	04	03,60

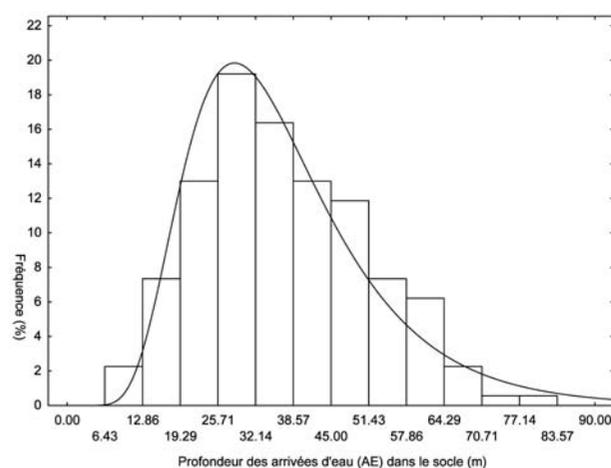


Fig. 2.—Fréquence de distribution des arrivées d'eau (AE, m) dans un diagramme arithmétique.

— les premières arrivées d'eau (AE) dans les fissures ont été observées à 9 m par rapport au niveau du sol soit 3 m par rapport au toit du socle (base des altérites).

— Le nombre des arrivées d'eau varie de 1 à 4 et l'essentiel est localisé entre 20 et 60 m. Les plus productives de ces AE ( $Q > 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) sont rencontrées à des profondeurs situées entre 30 et 40 m (par rapport base des altérites). Au delà de cette frange de profondeur, le nombre des AE diminue progressivement avec la profondeur (tableau 2). Ceci est en accord avec la distribution log normale de ce paramètre (figure 2). En effet, le test de conformité du Khi-deux est satisfaisant au seuil de signification de 10%.

— Les migmatites et les granodiorites constituent les meilleurs réservoirs hydrogéologiques du fait de leur taux de succès et des valeurs de leur débit spécifique modérés (tableaux 3 et 4). Les fortes productivités ( $Q/s = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$  et un débit  $Q \geq 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) ont été obtenues dans ces roches avec des arrivées d'eau

Tableau 3.—Répartition du débit spécifique Q/s (m<sup>2</sup>.h<sup>-1</sup>) en fonction des types de roche

	Gneiss	Granite	Granodiorite	Micaschiste	Migmatique
Nombre	24	5	15	25	41
Minimum	0,0131	0,0438	0,0223	0,011	0,0249
Maximum	1,140	0,836	3,550	0,952	13,200
Moyenne	0,197	0,232	0,609	0,254	0,735
Ecart-type	0,2589	0,341952	0,98358	0,253787	2,04807
CV (%)	131,421	147,329	161,560	99,955	278,800

CV : coefficient de variation.

rencontrées entre 40 et 60 m. Les autres types de roches présentent des AE dont le nombre et le débit ne sont pas négligeables entre 40 et 50 m.

### Transmissivité et le débit spécifique

Les valeurs de transmissivités obtenues dans la région oscillent entre  $1,27 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $2,87 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . La borne supérieure de cet intervalle constitue une valeur isolée puisque l'ensemble des valeurs oscillent entre  $1,27 \times 10^{-6}$  et  $8,59 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  avec une moyenne géométrique de  $3,46 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  (tableau 5). Cette valeur peut être donc supprimée pour conserver une certaine continuité des données. Les transmissivités calculées s'échelonnent sur trois ordres de grandeurs. La répartition des transmissivités en fonction des différents types de roches est résumée dans le tableau 4. La transmissivité oscille également sur trois ordres de grandeur au niveau de chacune de ces classes de roches. Les aquifères de migmatites et de granodiorites sont en moyenne les plus transmissifs de l'ensemble du cortège pétrographique. Les aquifères les moins transmissifs sont ceux constitués par les granites, dont la représentativité statistique au sein de l'échantillon est toutefois la plus faible (seulement 5 valeurs).

Les valeurs de débit spécifique sont majoritairement faibles, oscillant entre  $1,10 \times 10^{-2}$  et  $13,20 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$  (tableau 5). L'analyse des données montre que seulement 10% des forages ont un débit spécifique supérieur à  $1 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ . La répartition du débit spécifique en fonction des types de roches est consignée dans le tableau 3. Dans chaque cas, le débit spécifique oscille sur plus d'un ordre de grandeur. Les plus forts débits spécifiques ( $Q/s > 1 \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ) ont été enregistrés au niveau des migmatites (55%) et granodiorites (36%).

La répartition des forages sur l'ensemble du secteur d'étude n'étant pas homogène, au niveau de T et

Tableau 4.—Répartition de la transmissivité  $T$  ( $m^2.s^{-1}$ ) en fonction des types de roches

	Gneiss	Granite	Granodiorite	Micaschiste	Migmatique
Nombre	24	5	15	25	41
Minimum	$1,27 \times 10^{-6}$	$5,44 \times 10^{-6}$	$2,27 \times 10^{-6}$	$2,61 \times 10^{-6}$	$2,26 \times 10^{-6}$
Maximum	$8,59 \times 10^{-4}$	$1,94 \times 10^{-4}$	$8,19 \times 10^{-4}$	$4,17 \times 10^{-4}$	$2,87 \times 10^{-4}$
Moyenne géométrique	$2,29 \times 10^{-5}$	$1,87 \times 10^{-5}$	$4,71 \times 10^{-5}$	$2,39 \times 10^{-5}$	$6,52 \times 10^{-5}$
Moyenne arithmétique	$1,07 \times 10^{-4}$	$5,24 \times 10^{-5}$	$1,63 \times 10^{-4}$	$6,13 \times 10^{-5}$	$2,32 \times 10^{-4}$
Ecart-type	$2,08 \times 10^{-4}$	$8,13 \times 10^{-5}$	$2,25 \times 10^{-4}$	$1,14 \times 10^{-4}$	$5,19 \times 10^{-4}$
Coefficient de variation	194,574	155,133	138,4	185,644	223,706

Tableau 5.—Principales statistiques de la transmissivité ( $T$ ,  $m^2.h^{-1}$ ) et du débit spécifique ( $Q/s$ ,  $m^2.h^{-1}$ )

	Minimum	Maximum	Moyenne arithmétique	Moyenne géométrique	Ecart-type	CV (%)
$T$ ( $m^2.s^{-1}$ )	$1,27 \times 10^{-6}$	$8,59 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^{-4}$	$3,46 \times 10^{-5}$	$1,62 \times 10^{-4}$	151
$T$ ( $m^2.h^{-1}$ )	0,004572	03,09	00,39	00,1247	00,5837	151
$Q/s$ ( $m^2.h^{-1}$ )	0,011	13,20	00,47	00,1800	01,3247	283

CV : coefficient de variation.

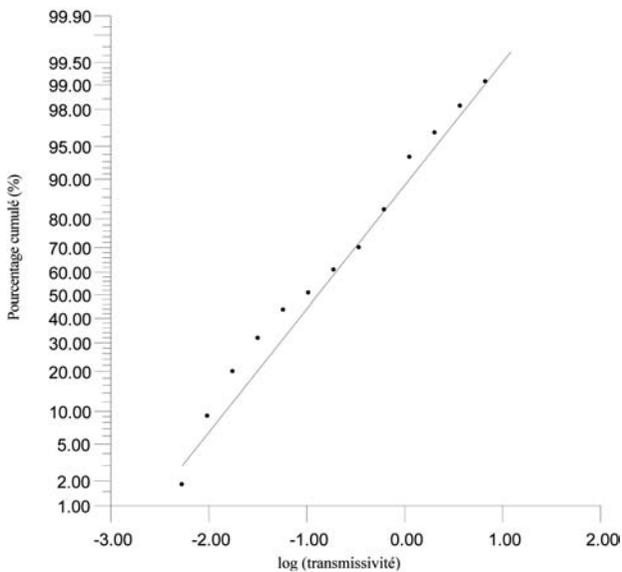


Fig. 3.—Fréquence de distribution des transmissivités ( $T$ ,  $m^2.h^{-1}$ ) dans un diagramme lognormal.

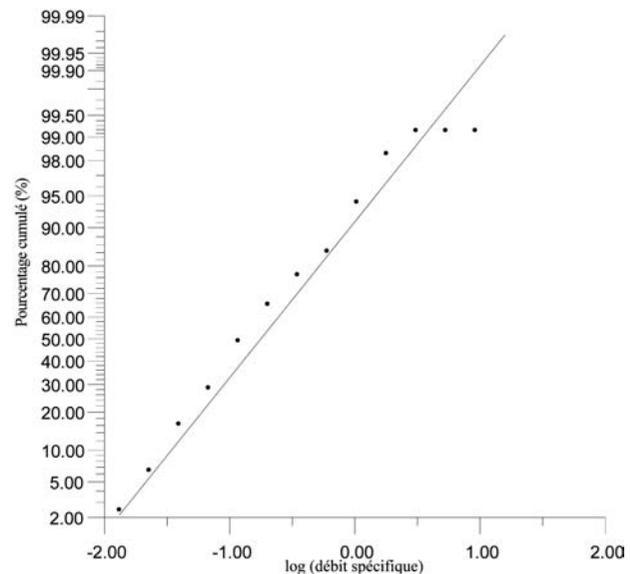


Fig. 4.—Fréquence de distribution des débits spécifiques dans un diagramme lognormal ( $Q/s$ ,  $m^2.h^{-1}$ ).

de  $Q/s$ , il n'y a pas de regroupement préférentiel des fortes et faibles valeurs. Notons que les fortes valeurs de  $T$  sont associées aux fortes valeurs de  $Q/s$  et qu'elles sont associées aux mêmes types de roches (granodiorites et migmatites). Les fréquences de distribution des valeurs transformées de  $T$  et  $Q/s$  ( $\log T$  et  $\log Q/s$ ) sont présentées dans un diagramme de probabilité (figures 3 et 4). Les différents points s'organisent suivant une droite impliquant une distribution normale des valeurs transformées. Ces dia-

grammes indiquent clairement que les variables  $T$  et  $Q/s$  sont distribués suivant la loi de log normale.

#### Estimation de la transmissivité par la méthode empirique

La transmissivité et le débit spécifique étant distribués suivant la loi log normale, ces deux variables ont été analysées dans un diagramme bi

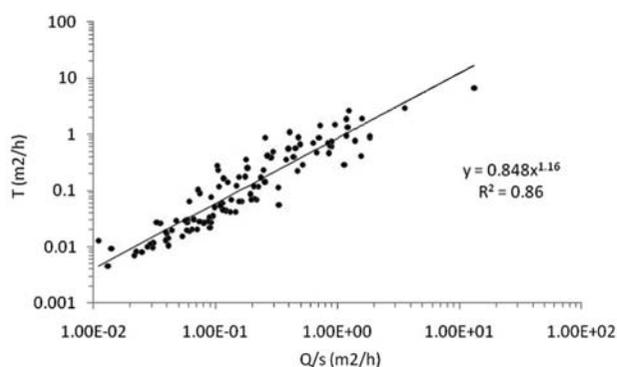


Fig. 5.—Relation entre la transmissivité  $T$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ) et le débit spécifique  $Q/s$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ).

logarithmique (figure 5). Ce diagramme met en évidence la relation empirique entre la transmissivité et le débit spécifique. Les différents points sont très peu dispersés au niveau de ce graphique. Le nuage de points présente une certaine tendance et s'organise suivant une droite sur laquelle il est possible d'ajuster une droite de régression. Cette relation dans les aquifères fissurés de la région de San-Pedro s'écrit sous la forme :

$$T = 0,848 \frac{Q}{s}^{1,16} \quad (10)$$

où  $T$  et  $Q/s$  sont exprimés en  $\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ .

Lorsque  $T$  et  $Q/s$  sont exprimés en  $\text{m}^2 \cdot \text{j}^{-1}$ , l'équation 10 s'écrit alors sous la forme:

$$T = 0,513 \frac{Q}{s}^{1,16} \quad (11)$$

avec  $R^2 = 0,86$ .

### Estimation de la transmissivité par krigeage

#### Variogramme de logT

Le variogramme expérimental de la transmissivité est illustré à la figure 6. Il présente un comportement particulier caractérisé par deux paliers. Ceci peut être l'indication d'un emboîtement de deux structures à deux échelles différentes. La transmissivité est donc caractérisée par une double-régionalisation. Les paramètres de régionalisation sont déterminés à l'aide du modèle exponentiel. Les équations des deux variogrammes élé-

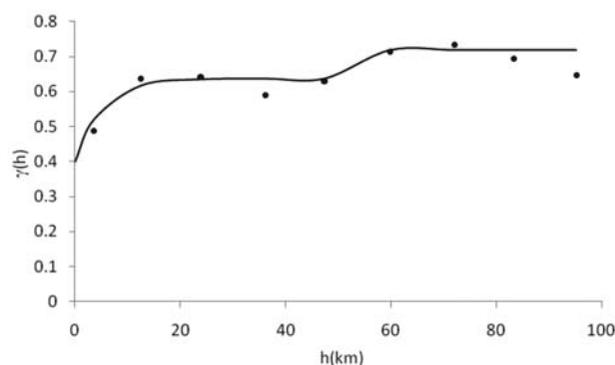


Fig. 6.—Variogramme de  $\log T$  mettant en évidence deux structures emboîtées.

mentaires sont données par les expressions suivantes (12 et 13).

$$\gamma_1(h) = 0,399 + 0,239 \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{-3h}{15}\right) \right] \quad (12)$$

$$\gamma_2(h) = 0,082 \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{-3h}{60}\right) \right] \quad (13)$$

Le variogramme global de la transmissivité modélisé correspond à la somme des deux variogrammes élémentaires dont l'équation générale est donnée par l'expression (14).

$$\gamma_g(h) = 0,399 + 0,239 \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{-3h}{15}\right) \right] + 0,082 \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{-3h}{60}\right) \right] \quad (14)$$

La dispersion est importante au niveau de ce variogramme. En effet, l'effet de pépité représente 60% de la dispersion totale. Le variogramme global est caractérisé par deux portées pratiques  $a_1 = 15$  km et  $a_2 = 60$  km.

### Estimation de la transmissivité dans les réservoirs fissurés

Le variogramme du  $\log T$  illustré sur la figure 6 et modélisé suivant l'équation 14 a été calculé avec 83 valeurs de transmissivités (forages disposant des coordonnées dans la base de données).

Les résultats de la validation croisée du variogramme sont consignés dans le tableau 6. Les deux

Tableau 6.—**Résultats du test de la validation croisée**

	logT	logT*	EC*	EC*2	logT*-logT	logT*-logT/EC*
Minimum	-2,1587	-1,8454	0,7228	0,5225	-1,4230	-1,8009
Maximum	0,4257	-0,0255	1,1160	1,2455	1,5481	2,0469
Moyenne	-0,9503	-0,8685	0,8020	0,6442	0,0624	0,0733
Variance	0,5207	0,1284			0,6326	0,9815
Ecart-type	0,7216	0,3583			0,7954	0,9907

EC : écart-type.  
\* : estimation.

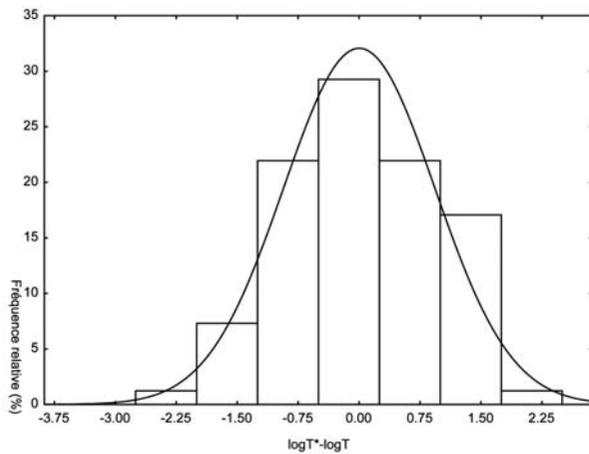


Fig. 7.—Distribution des erreurs d'estimation (logT\*-logT) du krigage.

conditions nécessaires pour cette validation sont respectées à savoir: i) une espérance mathématique des erreurs nulle; ii) le rapport de variances est minimum (condition d'optimalité). L'espérance mathématique des erreurs et le rapport de variances sont respectivement de 0,062 et de 0,9773. Ces valeurs sont respectivement proches de 0 et 1 et sont en accord avec les données théoriques. Il peut donc être conclu que le modèle de variogramme utilisé est valide.

Les fréquences de distribution des erreurs d'estimation sont illustrées à la figure 7. Les fréquences de distribution présentent une forme symétrique centrées sur 0, qui peut être décrite par une loi normale. Le test de khi-deux est positif au seuil de signification de 10%. Cette loi de distribution est une indication de la validité du modèle de variogramme utilisé. Ce qui signifie que l'essentiel des erreurs d'estimation tourne autour de la valeur 0.

Les différentes cartes krigées, c'est-à-dire les cartes d'estimation de logT, de l'écart-type d'estimation et de T sont illustrées respectivement sur les

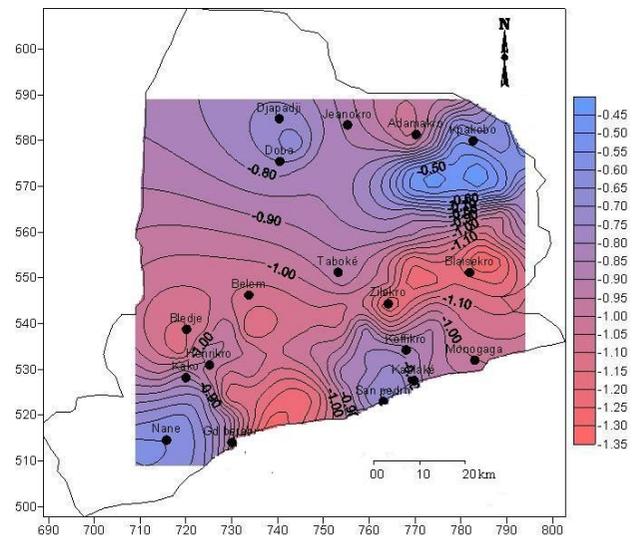


Fig. 8.—Carte d'estimation de logT\* de la région de San Pedro.

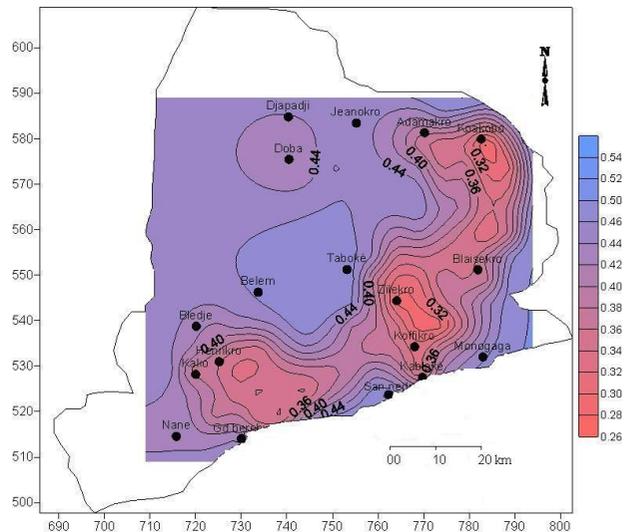


Fig. 9.—Carte des erreurs d'estimation de logT (EC\*) de la région de San Pedro.

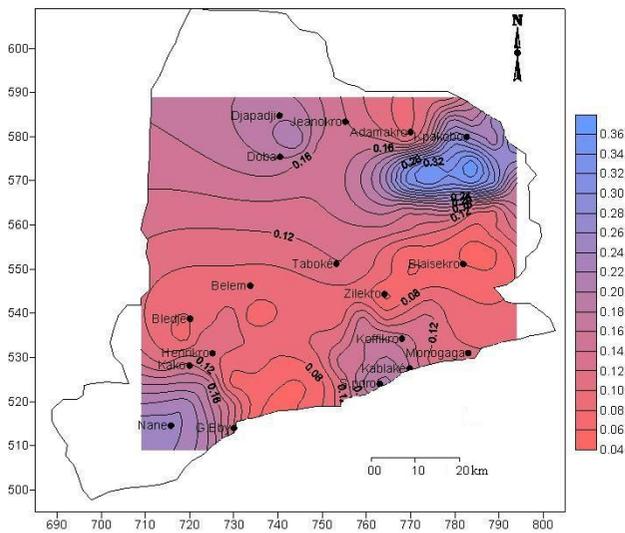


Fig. 10.—Carte d'estimation de la Transmissivité ( $T^*$ ) de la région de San Pedro.

figures 8, 9 et 10. La carte d'estimation de la transmissivité est obtenue après transformation des valeurs de  $\log T^*$  en  $T^*$  (figure 10). Les valeurs de transmissivité estimées dans cette région oscillent entre  $1,29 \times 10^{-5}$  et  $1,06 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  avec une moyenne géométrique de  $3,39 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Les valeurs des erreurs d'estimation ou d'écart-types d'estimation des  $\log T$  oscillent entre 0,27 et 0,56. Dans les secteurs où les données disponibles sont insuffisantes ou absentes, les écarts-type d'estimation sont importants ( $ED > 0,5$ ). Par contre dans les secteurs où les données sont nombreuses, l'écart-type est faible et meilleure est l'estimation.

## Discussion

### *Propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de San-Pedro*

La productivité des aquifères fissurés de la région sud-ouest de Côte d'Ivoire est variable d'un système aquifère à un autre. Elle est fonction des conditions hydrogéologiques dont la nature de la roche aquifère et les processus de fracturation (décompression superficielle, altération et tectonique) (Maréchal *et al.*, 2003; Lachassagne *et al.*, 2011). Les deux derniers processus sont les plus prépondérants. Une analyse synthétique et critique des processus de fracturation des roches dures et susceptibles de développer une perméabilité des aquifères

a été réalisée très récemment par Lachassagne *et al.* (2011). En effet, la bonne perméabilité des aquifères reste tributaire des propriétés géométriques de cette fracturation. Selon ces auteurs, le processus d'altération est le facteur principal, responsable de la perméabilité de fractures secondaires de l'horizon fissuré des roches dures. Le craton ouest africain auquel appartient le socle ivoirien est un vieux craton et donc considéré comme tectoniquement stable d'un point de vue sismique (Lachassagne *et al.*, 2011). Les faibles activités enregistrées ne sont pas suffisantes pour générer des nouvelles fractures ou réactiver celles déjà existantes (Wells et Copersmith, 1994). Attribuer la perméabilité des fractures de la région de San-Pedro à des activités tectoniques suggère que les activités tectoniques antérieures ont été de très fortes intensités. Dans l'histoire géologique du socle ivoirien, plusieurs événements tectono-métamorphiques (par exemple les orogénèses Libérienne et Eburnéenne) et mouvements tectoniques ont affecté le socle et ont effectivement conduit à la mise en place d'importantes fractures (Faillat, 1986; Djro, 1998; Lasm, 2000; Youan Ta *et al.*, 2008; Kouamé *et al.*, 2010). Faillat (1986) indique que les fractures anciennes n'ayant pas subi de réactivation ou de remobilisation ont tendance à se refermer par colmatage ou par recristallisation secondaire. C'est probablement le cas de certaines fractures dans la région de San-Pedro avec les forages négatifs ou à très faibles débits. La bonne productivité enregistrée dans certaines roches du socle de San-Pedro serait attribuable à l'importance de l'altération (Lachassagne *et al.*, 2011). Le processus d'altération en région tropicale peut conduire à la formation de couches d'altération pouvant atteindre jusqu'à 100 m d'épaisseur sur les schistes et 50 m sur les granites (Faillat, 1985) et d'un horizon fissuré développé (Maréchal *et al.*, 2003, 2004; Dewandel *et al.*, 2006, 2011; Lachassagne *et al.*, 2011). La genèse des fractures secondaires est due principalement à l'altération des minéraux phylliteux notamment la biotite, dont le gonflement provoque la fissuration (Hill, 1996; Maréchal *et al.*, 2003; Wyns *et al.*, 2003). L'altération de la biotite constitue le premier stade du processus dans les roches cristallines (particulièrement dans le granite et la granodiorite) (Tieh *et al.*, 1980). Au niveau de ces roches, la fissuration se fait préférentiellement le long de plans sub-horizontaux, perpendiculaires à la contrainte minimale (Maréchal *et al.*, 2003). Les fissures ou fractures sont généralement parallèles à la morphologie contemporaine de l'altération. Le

gonflement du minéral peut atteindre 30% de son volume (Banfield & Eggleton, 1990) et 50% au niveau de la roche totale (Folk & Patton, 1982).

Dans les roches foliées (granites foliés, gneiss) et schisteuses (schistes, micaschistes), l'altération des minéraux conduit à la mise en place d'une fissuration anarchique, c'est-à-dire sans orientation préférentielle (Maréchal *et al.*, 2003; Lachassagne *et al.*, 2011). Le dernier stade de ce processus d'altération est la production des argiles lesquelles présentent une tendance à remplir les pores nouvellement formés autour des minéraux fracturés et altérés (Bisdom *et al.*, 1982). Cet horizon fissuré assure la fonction transmissive de l'aquifère et est capté par la plupart des forages réalisés en région de socle.

La pétrographie de la région étudiée étant constituée de roches cristallines et cristallophylliennes contenant de la biotite, il n'est donc pas à exclure ce processus dans l'acquisition de la fracturation de cette région. La zone fissurée observée le long des logs des forages est donc la conséquence de l'altération des minéraux phylliteux et non de la tectonique ou de la décompression superficielle (voir Lachassagne *et al.*, 2011). L'épaisseur de la zone fissurée est approximativement deux à trois fois plus importante que la couche d'altération (Dewandel *et al.*, 2006), ce qui est conforme aux observations de terrain. En effet, le log des forages montre généralement une épaisseur de socle fracturée de 40 à 60 m en dessous des altérites. La densité de la fracturation décroît avec la profondeur à partir de la base des altérites (Baka *et al.*, 2011). Les travaux de Maréchal *et al.* (2004) et Dewandel *et al.* (2006) montrent que la baisse de la conductivité hydraulique avec la profondeur n'est pas la conséquence d'une faible perméabilité de fractures ni de leur fermeture mais la conséquence de leur disparition avec la profondeur. Ceci est en accord avec la chute du débit des arrivées d'eau (AE) avec la profondeur observée lors de la foration (Berger *et al.*, 1981; Fahy, 1981; Lasm, 2000; Baka *et al.*, 2011). Les propriétés géométriques de la fracturation secondaire du socle ivoirien en général et de San-Pedro en particulier sont tributaires du processus d'altération, longtemps attribuées aux processus de décompression superficielle et de tectonique (Faillat, 1986; Biémi, 1992, Lasm, 2000; Kouamé *et al.*, 2010).

La productivité des migmatites, granodiorites et des gneiss est plus importante que celle des micaschistes, et peut être expliquée par l'intensité du processus d'altération de la biotite qui a joué en

faveur de perméabilité du milieu (Lachassagne *et al.*, 2011). La faible productivité des micaschistes par rapport aux migmatites, aux granodiorites et aux gneiss pourrait être expliquée par l'apport de fines particules argileuses (Berger *et al.*, 1981; Fahy, 1981). Ces fines particules altèrent les propriétés géométriques des fissures et favorisent l'obtention de faibles perméabilités.

Les transmissivités calculées dans la région de San-Pedro sont en accord avec celles déterminées dans d'autres régions de Côte d'Ivoire (Faillat, 1986; Lasm *et al.*, 2004; Razack & Lasm, 2006; Lasm *et al.*, 2008; Kouakou *et al.*, 2010; Onétié *et al.*, 2010; Baka *et al.*, 2011). Le coefficient de variation est très élevé et excède 100% impliquant une forte dispersion. Cette importante dispersion des valeurs de transmissivités est liée à l'hétérogénéité caractérisant les aquifères.

#### *Estimation de la transmissivité*

L'utilisation du débit spécifique pour déterminer la transmissivité est une approche intéressante surtout quand les données disponibles ne sont pas suffisantes pour entreprendre une estimation par les méthodes géostatistiques (Srivastav *et al.*, 2007).

La relation obtenue dans le cadre de cette étude (éq. 10) reste significative dans la mesure où les valeurs de transmissivité s'échelonnent sur trois ordres de grandeurs (Razack & Lasm, 2006). Le coefficient de détermination  $R^2 = 0,86$  indique que le test est satisfaisant. La relation entre la transmissivité et le débit spécifique a été analysée sur d'autres sites par divers auteurs (Jalludin & Razack, 2004; Razack & Lasm, 2006; Soro *et al.*, 2010). Une compilation des différentes relations empiriques a été réalisée par Srivastav *et al.* (2007) et Rotzoll & El-Kadi (2008). D'après cette relation, les fortes valeurs de transmissivité sont associées aux fortes valeurs de débit spécifique. La comparaison de ces résultats avec d'autres études menées en Côte d'Ivoire notamment dans les régions centre (Soro *et al.*, 2010) et ouest (Lasm, 2000; Razack & Lasm, 2006) montre que cette relation est variable selon le contexte hydrogéologique. D'un point de vue géologique, ces deux régions appartiennent respectivement aux domaines protérozoïque et archéen qui sont caractérisées par des histoires tectoniques différentes. Selon certains auteurs (Mace, 1997; Hamm *et al.*, 2005; Razack & Lasm 2006; Srivastav *et al.*, 2007; Rotzoll & El Kadi, 2008), elle varie

aussi en fonction d'autres paramètres dont la profondeur des ouvrages, la pénétration partielle du puits, la durée du pompage et de la méthode de détermination de T et Q/s.

Cette relation empirique est beaucoup plus significative si les rabattements sont corrigés avant l'évaluation du débit spécifique, comme c'est le cas de ces travaux. Dans cette étude, l'estimation de la transmissivité à travers la relation empirique est donc cohérente. Kouakou *et al.* (2010) et Onétié *et al.* (2010) ont montré respectivement dans les régions d'Abengourou (Est de la Côte d'Ivoire) et de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire) que cette relation empirique peut comporter des incertitudes dues aux effets des pertes de charges dans le puits, si les rabattements mesurés ne sont pas corrigés. En effet, les rabattements corrigés fournissent une estimation plus robuste de la transmissivité et de la perméabilité avec une meilleure corrélation que les valeurs non corrigées (Razack & Huntley, 1991; Jalludin & Razack, 2004).

L'analyse géostatistique du logT indique que ce paramètre se comporte sans ambiguïté comme une variable régionalisée. La double structuration de son variogramme met en évidence la complexité du phénomène étudié (Lasmé, 2000). Ces portées pratiques sont relativement importantes comparativement à celles identifiées dans d'autres régions du pays. Ainsi dans la région de Man-Danané,  $a = 10,8$  km (Razack & Lasmé, 2006), à Korhogo  $a = 4,5$  km (Jourda, 2005), à Bondoukou  $a = 10,08$  km (Lasmé *et al.*, 2008). Ces différentes valeurs de la portée pratique trouvent leur explication dans l'organisation des réseaux de fractures. En effet, la portée étant la distance de corrélation entre les différents points, cette importante corrélation au niveau du variogramme s'explique par l'intensité de l'inter-connectivité du réseau de fractures de San-Pedro (Lasmé *et al.*, 2008).

La discontinuité à l'origine est importante et est due à l'action combinée des incertitudes de mesure et des hétérogénéités spatiales à plus petite échelle. La qualité de l'échantillon étudié (83 forages) pourrait avoir aussi contribué à l'importance de cette discontinuité à l'origine ou effet de pépite. Massoud (1988) indique qu'il est difficile sur un variogramme expérimental de séparer l'effet de pépite en microstructure de l'erreur de mesure. La structuration de la transmissivité dans la région de San-Pedro est meilleure que dans les autres régions du pays. L'estimation de la transmissivité par krigeage est satisfaisant, en effet la moyenne des erreurs et le

rapport des variances sont respectivement proche de 0 et de 1. Les valeurs observées et estimées s'échelonnent respectivement sur 3 et 2 ordres de grandeurs. Il y a donc une réduction de l'amplitude au niveau des valeurs estimées de la transmissivité. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les valeurs extrêmes sont très peu nombreuses par rapport aux valeurs proches de la moyenne arithmétique et par l'effet de lissage de krigeage (Razack et Lasmé, 2006). Rappelons que la carte krigée (ou d'estimation) demeure malgré tout une estimation, qui bien qu'étant optimale, ne respecte pas strictement l'intégralité de la variabilité spatiale réelle du phénomène analysé, c'est à dire la transmissivité (Razack, 1984). Il est donc concevable qu'une telle différence puisse exister entre le phénomène dans sa réalité et son estimation krigée. Le lissage au niveau des valeurs estimées est un phénomène couramment observé dans l'estimation géostatistique des variables. Une autre explication qui peut être avancée est la taille de l'échantillon étudiée. Les valeurs de l'écart-type d'estimation augmentent graduellement lorsqu'on va vers les limites de la zone d'étude. En effet, au niveau des secteurs Nord-ouest, Sud-ouest, Sud et Nord-est, il existe très peu ou pas de données disponibles. Le krigeage, de par sa formulation prend bien en compte la disposition géométrique du point à estimer et des points connus (voisinage glissant). Plus les points disponibles sont nombreux, meilleure est l'estimation et l'écart-type ou l'erreur d'estimation est faible.

Les estimations dans ces zones pauvres en données sont moins bonnes comparativement aux zones où les données disponibles sont nombreuses. D'une manière générale, les valeurs observées et estimées sont comparables d'un point de vue statistique et peuvent être acceptées.

Les deux approches d'estimation développées ici ont fourni des valeurs cohérentes et acceptables de la transmissivité. On notera cependant que les estimations par krigeage sont robustes car ces estimations sont accompagnées de l'erreur d'estimation qui permet de juger de la qualité de ces estimations. Les transmissivités estimées dans la région de San-Pedro peuvent donc être utilisées dans le cadre de la modélisation des écoulements souterrains.

## Conclusion

Cette étude a permis de mieux connaître les propriétés hydrodynamiques des aquifères fissurés de

la région de San-Pedro. Les principaux résultats obtenus sont résumés ci-dessous:

- les épaisseurs d'altération varient de 1 à 35 m avec une moyenne de 16 m;
- l'essentiel des arrivées d'eau est localisé dans l'horizon fissuré entre 20 et 60 m, et les plus productives ( $Q \geq 5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) se rencontrent à des profondeurs situées entre 30 et 40 m;
- les migmatites et les granodiorites constituent les roches-aquifères les plus productives d'un point de vue hydraulique. La perméabilité de ces aquifères est donc bien meilleure. Le processus d'altération est le facteur responsable de cette perméabilité;
- la transmissivité calculée oscille sur trois ordres de grandeurs mettant en évidence l'hétérogénéité du milieu.
- le débit spécifique est majoritairement faible;
- une relation empirique significative a été établie entre la transmissivité et le débit spécifique dans les aquifères de socle fissurés de la région de San-Pedro;
- Le variogramme de la transmissivité présente une double structuration mettant en évidence la complexité du phénomène étudié;
- les valeurs observées et estimées de la transmissivité par krigeage oscillent respectivement sur trois et deux ordres de grandeurs. Ces valeurs sont comparables d'une manière générale.
- L'estimation de la transmissivité par krigeage est satisfaisante.

La compréhension des propriétés hydrodynamiques de ces aquifères fissurés est à présent bien meilleure, ce qui permet d'envisager une gestion optimale de leurs ressources à l'aide de modèles numériques.

En perspectives, nous comptons étudier la corrélation entre la transmissivité estimée, la fracturation et la lithologie afin de compléter ces travaux. Il sera possible d'entreprendre la détermination de la perméabilité induite par les fractures constituant ces aquifères. Nous envisageons d'élaborer un système d'informations hydrogéologiques à références spatiales (SIHRS) à partir des cartes de potentialité, exploitabilité et disponibilité en eaux souterraines de la région.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les différents instructeurs anonymes qui ont contribué à l'amélioration de ce présent document à travers leurs critiques, leurs commentaires et suggestions. Les

auteurs voudraient aussi remercier les responsables du Ministère des Infrastructures Economiques de la région de San-Pedro (Côte d'Ivoire) qui ont mis à leur disposition les différentes données utilisées dans le cadre de cette étude.

## Références

- Aboufirassi, A. & Marino, M.A. (1984). Cokriging of aquifer transmissivity from field measurements of transmissivity and specific capacity. *Mathematical Geology*, 16 (1): 19-35. doi:10.1007/BF01036238
- Adiaffi, B. (2008). *Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact «socle-bassin sédimentaire» du Sud-Est de la Côte d'Ivoire*. PhD Thesis, Université Paris-Sud, Orsay, France, 217 pp.
- Ahmed, S. & deMarsily, G. (1987). Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resources Research*, 23 (9): 1717-1737. doi:10.1029/WR023i009p01717
- Ahoussi, K. E. (2008). *Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville*, PhD Thesis, Université de Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, 270 pp.
- Baka, D.; Lasm, T.; Oga, M-S.; Youan Ta, M.; De Lasm, O.; Kouakou, S. O. & Ettien, F. B. (2011). Characterization of transmissivity in the fractured reservoirs in the Oumé area (Centre of Cote d'Ivoire). *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2 (2): 310-322. doi:10.5251/ajsir.2011.2.2.310.322
- Banfield, J.F. & Eggleton, R.A. (1990). Analytical transmission electron microscope studies of plagioclase, muscovite, and K-feldspar weathering. *Clays and Clay Minerals*, 38: 71-89.
- Berger, J.; Camerlo, J.; Fahy, J. C. & Haubert M. (1981). Etude des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin: la « Boucle de cacao » en Côte d'Ivoire. *Bulletin du B.R.G.M.*, Sér. II, Sect. III, 4: 335-338.
- Biémi, J. (1992). *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)*. PhD thesis, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 493 pp.
- Bisdorn, E.B.A.; Stoops, G.; Delvigne, J.; Curmi, P. & Altemuller, H.-J., (1982). Micromorphology of weathering biotite and its secondary products. Contribution no.3 of the "Advisory Panel on Weathering Phenomena and Neoformations" of the "Sub-Commission on Soil Micromorphology of the I.S.S.S.". *Pedologie*, 32 (2): 225-252.

- Bodin, J. & Razack, M. (1999). L'analyse d'images appliquée au traitement automatique de champs de fractures. Propriétés géométriques et lois d'échelle. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 170 (4): 579-593.
- Brown, R. H. (1963). Estimating the transmissivity of an artesian aquifer from the specific capacity of a well: U.S. *Geological Survey Water Supply Paper* 1536-I: 336-338.
- Cooper, H. H. & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions American Geophysical Union*, 27 (4): 526-534.
- Darcel, C. (2002). *Corrélation dans les réseaux de fractures: caractérisation et conséquences sur les propriétés hydrauliques*. PhD Thesis, Université Rennes 1, Rennes, France, 223 pp.
- De Dreuzy, J. R. (2000). *Analyse des propriétés hydrauliques des réseaux de fractures*. PhD Thesis, Université Rennes 1, France, 101 pp.
- Dewandel, B.; Lachassagne, P.; Wyns, R.; Marechal, J.C. & Krishnamurthy, N.S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, 330 (1-2): 260-284. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.026
- Dewandel, B.; Lachassagne, P.; Chandra, S. & Zaidi, F.K. (2011). Conceptual Hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: example of quartz reef in granitic terrain in South India. *Journal of Hydrology*, 405 (3-4): 474-487. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.050
- Diop, S. & Tijani, M. N. (2008). Assessing the basement aquifers of Eastern Senegal. *Hydrogeology Journal*, 16: 1349-1369 doi:10.1007/s10040-008-0353-7
- Djro, S. C. (1998). *Evolution tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma*. PhD Thesis, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 171 pp.
- Fabbri, P. (1997). Transmissivity in the geothermal Euganean Basin: A geostatistical analysis. *Ground Water*, 35 (5): 881-887. doi:10.1111/j.1745-6584.1997.tb00156.x
- Fahy, J. C. (1981). Hydraulique villageoise en Côte d'Ivoire. Situation au 30 septembre 1979. *Bulletin B.R.G.M.*, Sér. II, Sect. III, 4: 327-333.
- Faillat, J. P. (1985). Synthèse et commentaires d'études de forage en zone de socle fissuré éruptif et métamorphique, principalement en Afrique. *110<sup>ème</sup> Congrès National de la Société Savante, Colloque Géologie Africaine*, Montpellier, 6: 317-329.
- Faillat, J. P. (1986). Hétérogénéité et effet d'échelle dans les aquifères fissurés. Approche par pompage d'essai sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest). *Hydrogéologie*, 1: 65-76.
- Folk, R.L. & Patton, E.B. (1982). Buttressed expansion of granite and development of grus in central Texas. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 26: 17-32.
- Forkasiewicz, J. (1978). *Essais de puits par paliers de débit. Analyse et interprétation des données*. Doc. B.R.G.M., Orléans.
- Géohive (2008). Population du Bas-Sassandra. <http://www.tlfq.ulaval.ca/axl/afrique/cotiv.htm>.
- Géomines (1982). *Inventaire hydrogéologique appliqué à l'hydraulique villageoise*. Ministère des travaux publics et des transports, Direction Centrale de l'Hydraulique, République de Côte d'Ivoire, Carte de Sassandra, Cahier n°33, 24 pp.
- Hamm, S.T.; Cheong, J.Y.; Jang, S.; Jung, C.Y. & Kim, B.S. (2005). Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea. *Journal of Hydrology* 310: 111-121. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.12.006
- Hill, S.M. (1996). The differential weathering of granitic rocks in Victoria, Australia. *Journal of Australian Geology*, 16: 271-276.
- Isaak, E. & Srivastava, R., (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, NY, 592 pp.
- Jalludin, M. & Razack, M. (2004). Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the republic of Djibouti (Horn of Africa). *Hydrogeology Journal*, 12 (2): 159-170. doi:10.1007/s10040-003-0312-2
- Jourda, J. P.; Saley, M.B.; Djagoua, E. V.; Kouamé, K. J.; Biémi, J. & Razack M. (2006). Utilisation des données ETM+ de Landsat et d'un SIG pour l'évaluation du potentiel en eau souterraine dans le milieu fissuré précambrien de la région de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire): approche par analyse multicritère et test de validation. *Téledétection*, 5 (4): 339-357.
- Jourda J.P. (2005). *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'Hydrotechnique spatiale: cas des zones tests de la Côte d'Ivoire*. PhD Thesis, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 429 pp.
- Journel, A. & Huijbregts, C.J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press, New York, NY, 600 pp.
- Kawecki, M.W. (1993). Recovery analysis from pumping tests with stepped discharge. *Ground Water*, 31 (4): 585-592. doi:10.1111/j.1745-6584.1993.tb00591.x
- Kawecki, M.W. (1995). Meaningful interpretation of step-drawdown test. *Ground Water*, 33 (1): 23-32. doi:10.1111/j.1745-6584.1995.tb00259.x
- Koita, M. (2010). *Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire)*. PhD Thesis. Université Montpellier II, 220 pp.
- Kouakou, O.S.; Lasmé, T.; Baka, D.; Oga, M.S.; Youan Ta, M.; De Lasmé, O.Z. & Soro N. (2010). Détermination de l'effet des pertes de charges sur la transmissivité issue des pompages d'essai dans les forages isolés. Application à la région d'Agnibilékrou (Est de la Côte d'Ivoire). *5<sup>ème</sup> Conférence de l'Association Africaine des Femmes en Géosciences (CAAWG-5)*, 11 au 17 Avril 2010, Grand-Bassam, Côte d'Ivoire.
- Kouamé, F. (1999). *Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région semi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire) Apport des données des*

- images satellitales et des méthodes statistiques et fractales à l'élaboration d'un système d'informations hydrogéologiques à références spatiales*. Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 200 pp.
- Kouame, K.F.; Akaffou, A.G.; Lasm, T.; De Dreuzy, J.R.; Davy, P. & Bour, O. (2005). Simulation des écoulements dans les réservoirs fracturés: application au socle Archéen de Touba (Nord Ouest de la Côte d'Ivoire). *Actes du Colloque Internationale SITIS 05, Yaoundé (Cameroun)*, 27 Nov.-1er Déc. 2005: 39-46.
- Kouamé, K.F.; Lasm, T.; De Dreuzy, J.R.; Akaffou, A.G.; Bour, O. & Davy, P. (2010). 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): 617-632.
- Kruseman, G.P. & de Ridder, N.A. (1990). *Analysis and evaluation of pumping test data*. Publication Series no 47. International Institute for Land Recycle and Improvement (IILRI), Wageningen, The Netherlands, 213 pp.
- Lachassagne P.; Wyns, R. & Dewandel, B. (2011). The fracture permeability of hard rock aquifer is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23: 145-161. doi:10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x
- Lasm, T. (2000). *Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyse statistique de la fracturation et des propriétés hydrodynamiques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen)*. PhD Thesis, Université de Poitiers, France, 274 pp.
- Lasm, T.; Kouame, F.; Oga, M. S.; Jourda, J. R. P.; Soro, N. & H. B. Kouadio (2004). Etude de la productivité des réservoirs fracturés en zone de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 5: 97-115.
- Lasm, T. & Razack, M. (2001). Lois d'échelle dans la fracturation des roches dures cristallines et dans le réseau hydrographique associé, *Compte Rendu de l'Académie des Science Paris, Science de la Terre et des planètes*, 333: 225-232.
- Lasm, T.; Razack, M. & Youan Ta, M. (2008). Geostistical analysis of the transmissivity in fissured reservoirs of Bondoukou Region (northeast, Côte d'Ivoire). In: book series titled: *Applied Groundwater Studies in Africa* (Adelana, S; MacDonald, A.; Alemayehu, T. & Tindimugaya, C., Eds.), IAH-Selected Papers, Taylor & Francis, The Netherlands, 473-485.
- Lasm, T.; De Lasm, O.; Oga, M-S. Y.; Youan Ta, M.; Baka, D.; Kouame, F. & Yao, T. K. (2011). Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biology and Chemical Sciences*, 5 (2): 642-662.
- Mace, RE (1997). Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. *Ground Water* 35: 738-742. doi:10.1111/j.1745-6584.1997.tb00141.x
- Mace, R. E. (2000). Estimating transmissivity Using Specific-Capacity Data. [http://www.twdb.state.tx.us/gam/GAM\\_documents/sc\\_report.pdf](http://www.twdb.state.tx.us/gam/GAM_documents/sc_report.pdf).
- Massoud, H. (1988). *Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique*, Document B.R.G.M., 155, 197 pp.
- Maréchal, J-C; Wyns, R.; Lachassagne P.; Subrahmanyam, K. & Touchard, F. (2003) Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle: concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Géoscience, Géosciences de surface, Hydrologie-Hydrogéologie*, 335: 451-460.
- Maréchal, J.-C.; Dewandel, B. & Subrahmanyam, K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resource Research*, 40: 1-17.
- Oga, Y. M.-S., (1998). *Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire): Approches hydrochimique et isotopique*. PhD Thesis, Université Paris XI, Orsay, France, 240 pp.
- Onetie, Z.O.; Lasm, T.; Baka, D.; Youan Ta, M.; Fossou, N.M.R.; De Lasm, O.Z. & Kouakou A.O.S. (2010). Détermination des effets des pertes de charges sur la transmissivité (Région de Korhogo, nord de la Côte d'Ivoire). *5<sup>ème</sup> Conférence de l'Association Africaine des Femmes en Géosciences (CAAWG-5)*, Grand-Bassam, Côte d'Ivoire.
- Papon, A. & Lemarchand, R. (1973). Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA 1962-1968. *Mémoire B.R.G.M.*, 80: 1-284.
- Razack, M. (1984). *Application des méthodes numériques et statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés en hydrogéologie*. PhD Thesis, Université Languedoc, France, 384 pp.
- Razack, M. & Huntley, D. (1991). Assessing transmissivity from specific capacity in a large and heterogeneous alluvial aquifer. *Ground Water*, 29 (6): 856-861. doi:10.1111/j.1745-6584.1991.tb00572.x
- Razack, M. & Lasm, T. (2006). Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). *Journal of Hydrology*, 325: 164-178. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.10.014
- Rotzoll, K. & El-Kadi, A. I. (2008). Estimating hydraulic conductivity from specific capacity for Hawaii aquifer, USA. *Hydrogeology Journal*, 16: 969-979. doi:10.1007/s10040-007-0271-0
- Saley, M. B. (2003). *Système d'informations hydrogéologiques à référence spatiale, discontinuités pseudo-images et cartographies thématiques des ressources en eau de la région semi- montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)*. PhD Thesis, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 211 pp.
- Soro, G. (2010). *Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des Lacs (centre de la Côte d'Ivoire): Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du district de*

- Yamoussoukro et du département de Tiébissou*. PhD Thesis, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire 257 pp.
- Soro, G.; Soro N.; Ahoussi, K. E.; Lasm, T.; Kouamé, F.K.; Soro, T.D. & Biémi J. (2010). 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): 227-242. doi:10.3989/egeol.40123.093
- 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)*. Implications hydrologiques et hydrogéologiques. PhD Thesis, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 256 pp.
- Srivastav, S. K.; Lubczynski, M.W. & Biyani A. K. (2007). Upscaling of transmissivity, derived from specific capacity: a hydrogeomorphological approach applied to the Doon Valley aquifer system in India. *Hydrogeology Journal*, 15: 1251-1264. doi:10.1007/s10040-007-0207-8
- Tagini, B. (1971). *Esquisse structurale de la Côte-d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale*. PhD Thesis, Université de Lausanne (Suisse), 302 pp.
- Theis, C. V.; Brown, R. H. & Myers, R. R. (1963). Estimating the transmissibility of aquifers from the specific capacity of wells. Methods of determining permeability, transmissivity, and drawdown. *U.S. Geological Survey Water Supply Papers*, 1536-I.
- Tieh, T.T.; Ledger, E.B. & Rowe, M.W. (1980). Release of uranium from granitic rocks during in situ weathering and initial erosion (central Texas). *Chemical Geology*, 29: 227-248. doi:10.1016/0009-2541(80)90022-4
- Thomasson, H. J.; Olmstead, F. H. & LeRoux, E. R. (1960). Geology, water resources, and usable ground water storage capacity of part of Solano County, CA: *U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1464*, 693 pp.
- Wells, D.L. & Coppersmith, K.J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84: 974-1002.
- Wyns, R.; Quesnel, F.; Simon-Coinçon, R.; Guillocheau, F. & Lacquement, F. (2003). Major weathering in France related to lithospheric deformation. *Géologie de France*, 1: 79-87.
- Yacé, I. (2002). *Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest*. Édition CEDA, 183 pp.
- Yao, K. T. (2009). *Hydrodynamisme de l'eau souterraine dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire: cas du département de Soubré*. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. PhD Thesis. Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 284 pp.
- Youan Ta, M. (2008). *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*. PhD Thesis, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 236 pp.
- Youan Ta, M.; Lasm, T.; Jourda J. P.; Kouamé, K. F. & Razack, M. (2008). Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). *Télédétection*, 2: 34-42.

Recibido el 9 de mayo de 2011

Aceptado el 21 de diciembre de 2011

Publicado online el 13 de junio de 2012