

Analyse de la productivité et estimation de la vulnérabilité à la pollution pour l'optimisation de l'implantation des forages dans les aquifères de socle du bassin versant du N'zi (Côte d'Ivoire)

Productivity analysis and pollution vulnerability estimation for the optimization of boreholes implementation in the hard rock aquifers of N'zi watershed (Côte d'Ivoire)

Aimé KOUDOU, Brou Etienne N'DRI, Kadio Hilaire NIAMKE, Oi Adjiri ADJIRI, Abé Parfait SOMBO, & Kouadio Charles NIANGORAN

*Département des Sciences de la Terre, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire. * (kdaime@yahoo.fr)*

Résumé. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les facteurs pertinents susceptibles d'optimiser l'implantation des forages dans les aquifères de socle du bassin versant du N'zi par l'entremise de l'analyse de la productivité et de l'estimation de la vulnérabilité à la pollution. Plusieurs données relatives à l'hydrogéologie, à la géologie, à l'hydrologie et la géomorphologie ont été utilisées à cet effet. L'analyse des paramètres des forages et les relations qui les lient entre eux montrent que presque la moitié des forages (49,36%) a un débit compris entre 0 et 2,5 m³/h. Les débits faibles (1 à 2,5 m³/h) sont les plus représentatifs du bassin versant du N'zi. Les moyennes de débits enregistrés (3,5 m³/h) par classe sont plus importantes pour les altérites de moins de 60 m d'épaisseur. La profondeur optimale à forer pour la réalisation des forages économiques est comprise entre 20 à 95 m environ. Les formations granitiques demeurent les plus productives. Cependant, les débits les plus élevés sont rencontrés dans les formations schisteuses (30 m³/h). La répartition spatiale du degré de vulnérabilité à la pollution laisse supposer que les aquifères granitiques sont plus vulnérables à la pollution que les aquifères schisteux. Les eaux souterraines du bassin versant du N'zi seraient incontestablement à l'abri d'une pollution d'origine superficielle. L'analyse combinée de la vulnérabilité des aquifères et de la productivité de ces formations constitue un critère de base dans le cadre de l'évaluation des actions qui doivent être mises en place pour la protection des eaux souterraines en fonction de leur importance économique.

Mots-clefs : Optimisation, forage, aquifère, productivité, vulnérabilité, bassin versant du N'zi, Cote d'Ivoire.

Abstract. The aim of this study is to highlight the relevant factors likely to optimize the implementation of boreholes in the hard rock aquifers of the N'zi watershed through the analysis of productivity and the assessment of vulnerability to pollution. Several data relating to hydrogeology, geology, hydrology and geomorphology have been used for this purpose. Analysis of the parameters of boreholes and the relationships between them show that almost half of boreholes (49.36%) of the N'zi watershed have an operating yield value between 0 and 2.5 m³/h. Low operating yield values (1 to 2.5 m³/h) are the most representative of the N'zi watershed. The recorded yields averages (3.5 m³/h) per class are more significant for the thickness of weathering of less than 60 m. The optimum depth to be drilled for the realization of economic boreholes is between 20 and 95 m approximately. Granitic formations remain the most productive. However, the highest yield is encountered in shale formations (30 m³/h). The spatial distribution of the degree of vulnerability to pollution suggests that granitic aquifers are more vulnerable to pollution than shale aquifers. The groundwater of the N'zi watershed would undoubtedly be immune to pollution of superficial origin. The combined analysis of the vulnerability of aquifers and the productivity of these formations constitutes a basic criterion in the evaluation of the actions that must be put in place for the protection of groundwater according to their economic importance.

Keywords : Optimization, borehole, aquifer, productivity, vulnerability, N'zi watershed, Cote d'Ivoire.

Abridged English version

Introduction

The N'zi watershed is an agricultural land located between the longitudes 3°49' and 5°22' west and the latitudes 6°00' and 9°26' north over an area of 35,500 km² (Fig. 1) in Côte d'Ivoire. The productivity of boreholes is hardly predictable because it is controlled by numerous geological, morphological, structural, hydrological parameters. Moreover, the aquifer is constantly under the increasing threat of both diffuse and point pollution by nutrients in general, and by nitrates and phytosanitary products in particular. As a result, water catchments intended for human consumption are inherently zones of hydraulic depression attracting underground flows to them, which are also exposed to possible pollution. The projected increase in the exploitation of groundwater resources for drinking water supply ensures that efforts must be made to protect these resources in the long term in the face of potential pollution from anthropogenic activities.

The aim of this study is to highlight the relevant factors likely to improve the conditions of boreholes implementation in the hard rock aquifers of the N'zi watershed, in order to improve the exploitation of groundwater resources for the drinking water supply of the populations. This involves analyzing the productivity of boreholes and estimating the vulnerability of hard rock aquifers to pollution. A better understanding of the productivity and vulnerability of aquifers in the N'zi watershed would optimize future boreholes campaigns.

Productivity analysis involves undertaking a statistical analysis of certain boreholes parameters and the relationships that link other parameters to each other. This operation aims at highlighting the parameters which influence the productivity of the fractured aquifers and which are of interest either prior to any research or after a period of exploitation. In assessing the vulnerability of aquifers, it is a matter of determining their susceptibility to pollution by human activities. This also means taking all the measures that can better manage the quality of groundwater resources. The approach to estimate the intrinsic vulnerability of aquifers constitutes a means of implementing preventive strategies (Jourda 2005, Kouamé 2007, Youan Ta 2008). To this end, the DRASTIC method is used to set up a tool to support protection of groundwater.

Methodology

Operating yield values for 1,252 boreholes are subdivided in five principal classes according to the classification suggested by the Inter-African Committee of Hydraulic Survey (C.I.E.H. 1978) and Savané (1997) for a better analysis and interpretation of this parameter. These classes are:

- between 0 and 1 m³/h, borehole yield values are considered as very low;
- from 1 to 2.5 m³/h, borehole yield values are said to be low;
- from 2.5 to 5 m³/h, borehole yield values are qualified as medium;
- from 5 to 10 m³/h, borehole yield values are known as high;
- superior to 10 m³/h, borehole yield values are said to be very high.

For the well-identified 1,235 boreholes, the analysis focuses on the vertical distribution of specific yield values, the ratio of operating yield values (Q)/thickness of weathering (EpAlt), between operating yield values (Q) and total depth (Pt) and between boreholes productivity / lithology.

The vulnerability assessment of the N'zi watershed's aquifers to pollution consisted of the evaluation and integration of seven hydrogeological parameters (groundwater depth (D), net recharge (R), aquifer lithology (A), soil type (S), topography (T), unsaturated zone (I) and permeability (C)) in the DRASTIC model. Each hydrogeological parameter is weighted according to its relative importance on the groundwater vulnerability (Vrba & Zaporozec 1994). Moreover, each parameter is subdivided into classes representing either a particular environment or an interval of values. The different classes of each parameter are then ranked according to their particular influence on the vulnerability of the water table (Aller *et al.* 1987). The rating 1 is the lower degree of vulnerability and the rating 10 is the higher degree of vulnerability. The weighting and scoring systems of the various hydrogeological parameters of the N'zi watershed make it possible to calculate a vulnerability index (DRASTIC Index), given by equation (1).

$$\text{DRASTIC Index} = DwDr + RwRr + AwAr + SwSr + TwTr + IwIr + CwCr \quad (1)$$

With w = weight assigned to each parameter and r = rating (interval value) assigned to each parameter.

The mapping of the thematic map consisted in transferring in space the different values of DRASTIC index subdivided in intervals and in matching these ranges of index to classes of vulnerability according to the classification proposed by Aller *et al.* (1987) (Tab. 4).

Results and conclusion

Nearly half of the boreholes (49.36%) of the N'zi watershed have an operating yield value of between 0 and 2.5 m³/h. Low operating yield values (1 to 2.5 m³/h) are the most representative (Tab. 5). Spatially, the southern half of the watershed is more productive (high operating yield values) than the northern half (Fig. 4). Operating yield values above 2.5 m³/h are generally found in areas where the thickness of

weathering is between 6 and 70 m approximately. The averages recorded per class ($3.5 \text{ m}^3/\text{h}$) are larger for the thickness of weathering of less than 60 m (Fig. 6). Classes of weathering in which boreholes with medium and high yields are constantly encountered are 0-10 m, 10-20 m and 20-30 m.

The optimal depth to be proposed for the realization of economic boreholes is between 20 and 95 m approximately (Fig. 8). Operating yield values can reach $30 \text{ m}^3/\text{h}$. The depth intervals in which operating yield values appear to be significant are between 60 and 70 m. All formations in the N'zi watershed are productive. Granite formation remains the most productive for all classes of operating yield while the highest yield ($30 \text{ m}^3/\text{h}$) is observed in the shale formations (Tables 6, 7). These results can therefore help guide for future hydrogeological prospections and predict the location of other boreholes.

Groundwater in the N'zi watershed would be protected from surface pollution. The vulnerability map shows that the vulnerability varies from medium to very low and it is unequally distributed spatially on

the N'zi watershed. The low (50%) and the very low (13%) vulnerability areas are mainly located in the southeast of the watershed on shale formations. Some very small areas are identified on the granite formations (north of Tafiré, south of Niakaramandougou, Katiola and Toumodi, around Yamoussoukro and Toumodi and east of Tiébissou). The medium vulnerability (37%) mainly occurs in the upstream part of the watershed and occupies mostly the central and southwestern portions of the watershed (Fig. 10).

The vulnerability map of aquifers to pollution is relevant since it makes it possible to distinguish the operating units on the N'zi watershed and to adapt the overall management according to these units. It is therefore a tool to help decision that can guide the development and management of water activities and uses.

The combined analysis of the vulnerability of aquifers and the productivity of these formations constitutes a basic criterion in the evaluation of actions that must be taken to protect groundwater according to their economic importance.

INTRODUCTION

L'accès à l'eau potable est l'une des grandes priorités de la stratégie de réduction de la pauvreté et de développement des nations. L'eau de surface est vulnérable aux pollutions de tout genre (agricole, domestique) et aux aléas climatiques (Savané 1997 ; Lasm 2000). L'eau souterraine demeure la ressource la plus largement exploitée essentiellement pour la production d'eau potable, l'irrigation, l'élevage. Elle constitue le principal mode d'approvisionnement en eau potable des populations d'Afrique (AFD 2011). Malgré l'exploitation constante de cette eau souterraine, il n'en demeure pas moins que les problèmes d'alimentation en eau potable de certaines localités des pays d'Afrique de l'Ouest restent encore tristement d'actualité. De nombreux points d'eau réalisés ne sont pas fonctionnels à cause de pannes mécaniques, du mauvais choix des sites d'implantation des ouvrages, de l'insuffisance des réserves captées, du tarissement et parfois de la mauvaise qualité de l'eau. Face à cette situation, des sommes considérables sont investies dans la réalisation de forages. En zone de socle d'Afrique de l'Ouest, les aquifères fissurés sont les plus recherchés et les plus captés parce qu'ils constituent de véritables "magasins" des eaux souterraines (Lasm 2000). L'exploitation de ces eaux est généralement réalisée aux moyens de forages implantés au droit ou au voisinage des fractures (Savadogo 1984, Faillat 1987, Biémi 1992, Koudou *et al.* 2013). Les forages captant les fractures sont les plus sûrs et les moins

influçables par les fluctuations saisonnières (Biémi 1992). Ils possèdent de ce fait des informations fiables pouvant être interprétées hydrogéologiquement (Kouamé 1999). L'eau souterraine, naturellement filtrée par le sol et captée par les forages, est le plus souvent de bonne qualité. Celle-ci demeure cependant une ressource fragile et plusieurs sources de contamination peuvent engendrer sa détérioration.

Le maintien de cet avantage relatif de bonne qualité des eaux souterraines requiert néanmoins que des mesures soient prises pour préserver de façon durable la qualité de cette ressource. La mise en place de méthodes appropriées de protection de l'ensemble des captages d'eau potable, que ceux-ci correspondent à des forages ou des sources, demeure un moyen incontournable.

Le bassin versant du N'zi (Fig. 1) est un territoire ivoirien à vocation agricole où la productivité des forages est difficilement prévisible parce que contrôlée par de nombreux facteurs d'ordre géologique, morphologique, structuraux, hydrologique.... Par ailleurs, l'aquifère est constamment sous la menace croissante de pollutions tant diffuses que ponctuelles par les nutriments en général, et par les nitrates et les produits phytosanitaires en particulier (Koudou 2013). Par contrecoup, ce sont les captages d'eau destinée à la consommation humaine, qui sont par nature des zones de dépression hydraulique attirant vers elles les flux souterrains, qui sont aussi exposés aux pollutions

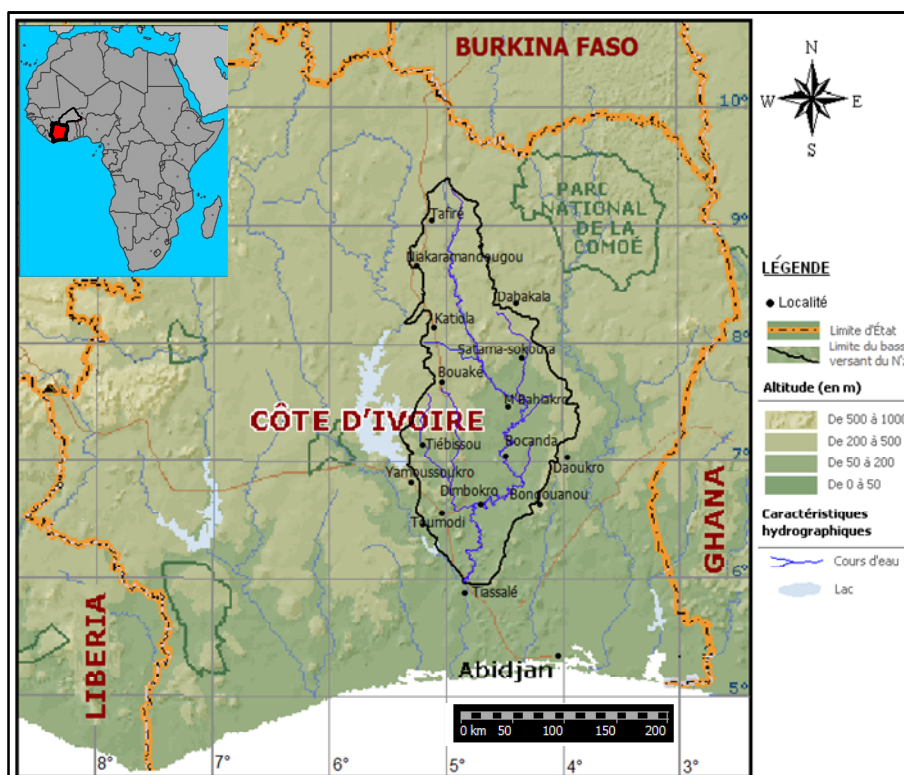


Figure 1. Carte des altitudes en Côte d'Ivoire (source Encarta) avec localisation du bassin versant du N'zi.
 Figure 1. Altitude map in Côte d'Ivoire with location of the N'zi watershed.

éventuelles. L'augmentation prévisionnelle de l'exploitation des ressources en eau souterraine pour l'alimentation en eau potable (A.E.P.) assure qu'il faille donc s'employer à protéger sur le long terme ces ressources face aux dangers de pollutions potentielles générées par les activités anthropiques.

La présente étude a pour objectif de mettre en exergue les facteurs pertinents susceptibles d'améliorer les conditions d'implantation des forages dans les aquifères de socle du bassin versant du N'zi. Elle s'inscrit dans le cadre des recherches des facteurs de productivité et de préservation de la qualité de l'eau souterraine. Une bonne maîtrise de ces facteurs augmenterait considérablement l'exploitation de la ressource en eau souterraine pour l'alimentation en eau potable des populations. Il s'agit donc d'analyser la productivité des forages et d'estimer la vulnérabilité des aquifères de socle face à la pollution selon le modèle DRASTIC (Aller *et al.* 1987, Fréchette 1987, Murat 2000, Al-Zabet 2002, Schnebelen *et al.* 2002, Murat *et al.* 2003). Une meilleure connaissance de la productivité et de la vulnérabilité des aquifères du bassin versant du N'zi optimiserait les futures campagnes de forages.

SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

L'unité fonctionnelle du bassin versant du N'zi est un territoire qui est situé entre les longitudes 3°49' et 5°22' ouest et les latitudes 6°00' et 9°26'

nord et s'étend sur une superficie de 35500 km². Il est dominé dans l'ensemble par un relief assez monotone, dont l'altitude varie entre plus de 400 m au nord et moins de 100 m au sud. Il est recouvert de sols ferrallitiques moyennement et/ou faiblement désaturés et de sols ferrugineux tropicaux, auxquels s'ajoute une infime entité de complexe de sols (Perraud 1971, Monnet 1972). Le cours d'eau principal du bassin, le N'zi, représente le premier affluent important de rive gauche du Bandama avec une longueur de 725 km. Il prend sa source à l'est de Ferkéssédougou au nord de la Côte d'Ivoire et, conflue avec le Bandama à N'zianoa, en amont de Tiassalé dans la région d'Abidjan (Fig. 1). En raison de son orientation, le bassin versant du N'zi est caractérisé par le régime tropical de transition au nord, le régime équatorial de transition atténué dans la partie centrale et le régime équatorial de transition au sud. Par ailleurs, il est le lieu où réside un contraste entre les couvertures végétales (savane au nord et forêt au sud) et les substratums géologiques (Fig. 2) (à dominance granitique au nord, au centre et au sud-ouest, et schisteuse au sud-est). Dans ces différentes formations cristallines et cristallophylliennes, on y rencontre deux types d'aquifères. Un aquifère d'altérites plus superficielles de fonction capacitive et conductrice confondues (ENGALENC *et al.*, 1979 ; SAVADOGO, 1984), juxtaposé dans le plan vertical et lié par un phénomène de drainage à un aquifère de fissures ou de fractures de fonction essentiellement conductrice.

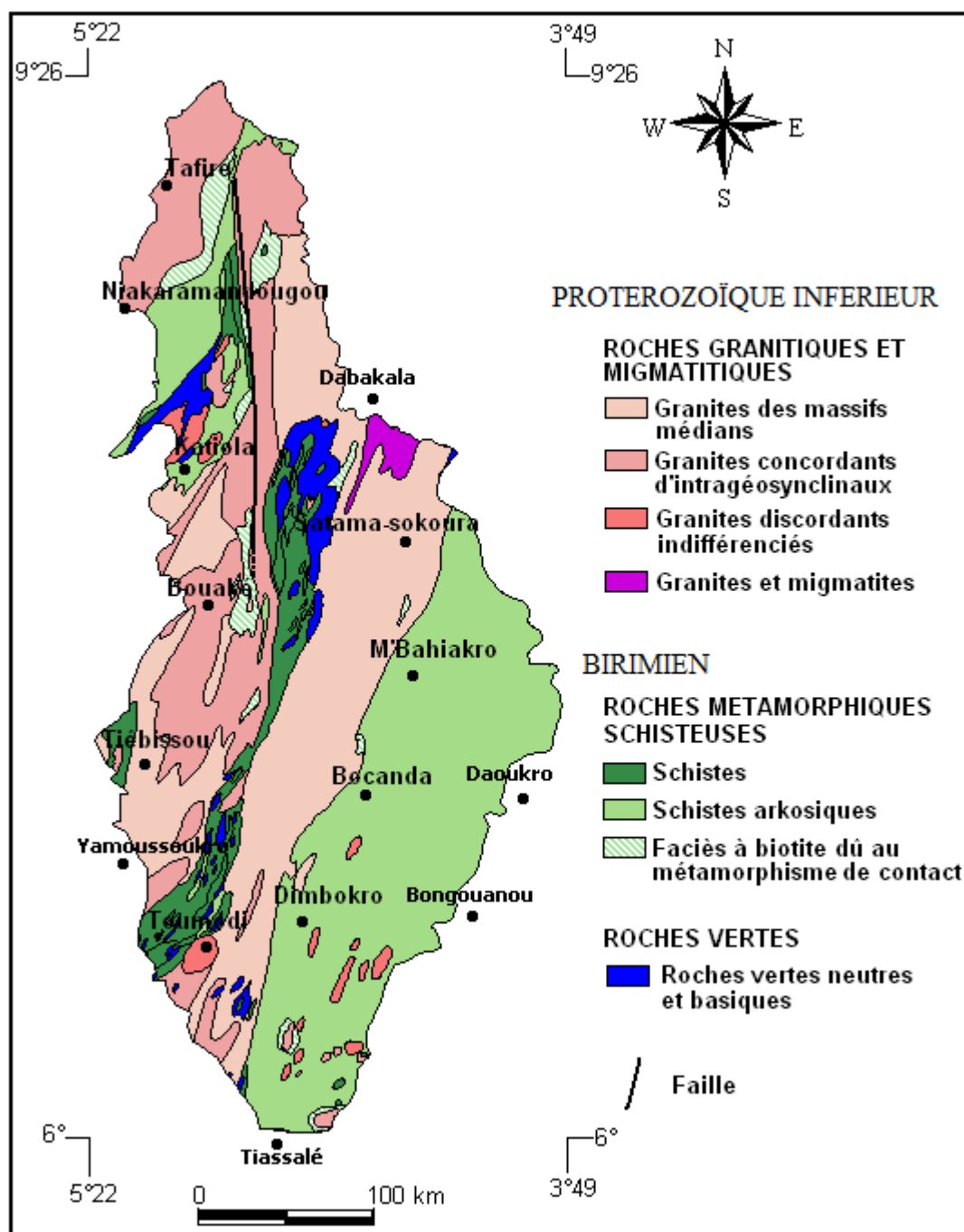


Figure 2. Carte géologique du bassin versant du N'zi (Tagini 1971).

Figure 2. Geological map of the N'zi watershed.

MATERIEL ET METHODES

Données utilisées

- Une fiche technique de forages comportant 1417 forages d'eau souterraine du bassin versant du N'zi sur la période 1975-1995 et provenant de la Direction de l'Hydraulique Villageoise du Ministère des Infrastructures Économiques de la Côte d'Ivoire. Pour 1235 forages parfaitement identifiés et repartis

de façon homogène sur le territoire, les informations relatives aux épaisseurs des altérites, à la profondeur des forages, aux formations géologiques, aux niveaux statiques, aux débits d'exploitation sont connus. Des résultats d'analyses des échantillons d'eau provenant de 108 forages ont également été utilisés. Le paramètre chimique d'intérêt retenu, qui constitue aujourd'hui la cause majeure de pollution des réservoirs d'eau souterraine, est le nitrate (NO_3^-). Ce référentiel sert de critère de validation de la carte de

vulnérabilité à la pollution pour répondre au souci de la vérité terrain.

- Une carte de fracturation issue du traitement des images satellitaires ETM+ de Landsat 7 du bassin versant du N'zi et dont la méthodologie de traitement est détaillée dans Koudou (2013).

- La lame d'eau infiltrée pour recharger les aquifères fracturés du bassin versant du N'zi sur la période 1972 à 2000 et dont la technique de détermination est détaillée dans Koudou (2013).

- Une mosaïque des coupures de Modèle Numérique d'Altitude (MNA) couvrant la zone d'étude. Le MNA est issu de la campagne SRTM (Shuttle Radar Topography and Mapping) du 11 février 2000, de résolution spatiale 90 m et de précision altimétrique de 16 m/10 m (absolu/relatif) recueilli à partir de <ftp://eosrp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Africa>.

- La carte géologique du bassin versant du N'zi.

Analyse statistique des paramètres de forages influençant la productivité des aquifères

Les valeurs de débits d'exploitation pour 1252 forages sont subdivisées en cinq principales classes selon la classification proposée par le Comité Inter-africain d'Étude Hydraulique (C.I.E.H. 1978) et Savané (1997), pour une meilleure analyse et interprétation de ce paramètre. Ces classes sont :

- entre 0 et 1 m³/h, les débits sont considérés comme très faibles ;
- de 1 à 2,5 m³/h, les débits sont dits faibles ;
- de 2,5 à 5 m³/h, les débits sont qualifiés de moyens ;
- de 5 à 10 m³/h, les débits sont dits forts ;
- supérieur à 10 m³/h, les débits sont dits très forts.

Pour les 1235 forages parfaitement identifiés, l'analyse porte sur la distribution verticale des débits spécifiques, les rapports entre débits d'exploitation (Q)/épaisseur d'altération (EpAlt), entre débit d'exploitation (Q)/profondeur totale (Pt) et entre productivité des forages/lithologie.

Structuration de la base de données géo-spatiale du modèle DRASTIC

L'élaboration de la carte de vulnérabilité des aquifères fracturés du bassin versant du N'zi a justifié de l'utilisation du modèle DRASTIC. Celui-ci repose sur quatre hypothèses fondamentales (Osborn *et al.*, 1998) :

- les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ;
- de la surface du sol, les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme de l'infiltration efficace ;
- le contaminant présente la même mobilité que les eaux souterraines ;

- la nature des contaminants potentiels n'est pas considérée dans la définition de la vulnérabilité.

Cette méthode de cotation numérique empirique requiert l'évaluation et l'intégration de sept paramètres hydrogéologiques dans une base de données relationnelle, préparée dans le référentiel UTM WGS 84 zone 30 N, dans un SIG.

Description et évaluation des sept paramètres hydrogéologiques

La profondeur de la nappe (D) correspond au niveau de l'eau en-dessous de la zone non saturée. Les niveaux d'eau statique des forages du bassin versant du N'zi ont été interpolés par krigeage sous ArcGis en vue de réaliser la profondeur de la nappe.

La recharge nette ou infiltration efficace (R) a trait à la quantité d'eau atteignant la zone saturée, et donc destinée à la recharge des aquifères. Elle est déterminée à partir des données pluviométriques, hydrologiques et du bilan hydrique de Thornthwaite (1944). La valeur de 47,62 mm (Koudou 2013) estimée sur le bassin versant du N'zi résulte de la différence entre la pluviométrie moyenne annuelle et l'évapotranspiration réelle estimée sur l'ensemble du bassin, et la lame d'eau ruisselée à l'exutoire du bassin sur la période 1972 à 2000. Selon Savané (1997) et Jourda *et al.* (2006), les résultats obtenus sont satisfaisants et permettent de donner un intervalle de grandeurs des différents paramètres qui concourent à l'estimation de l'infiltration avec un taux d'erreur de 10 %, lorsque le travail est réalisé à grande échelle (bassin versant) et en valeurs cumulées (cas des bilans hydrologiques).

La lithologie de l'aquifère (A) se rapporte à la nature des roches issues des formations géologiques et qui intervient dans le piégeage du polluant qui peut s'échapper au pouvoir d'absorption du sol. Elle est déterminée à partir de la carte géologique. Les principales formations géologiques rencontrées dans le bassin versant du N'zi sont les roches granitiques et les roches schisteuses auxquelles s'ajoute une infime portion des roches vertes, de direction NE-SO caractérisées par les minéraux tels que la chlorite, l'épidote, l'amphibole, la biotite, la serpentine. Ces roches vertes sont, à des degrés divers, des roches volcaniques basiques ou neutres ultérieurement métamorphosées (Avenard *et al.* 1971). Résistantes à l'érosion, elles forment l'ossature des chaînes de collines.

Le type de sol (S) désigne la formation superficielle au-dessus de la zone non saturée, résultant de l'altération sur place de la formation rocheuse grâce à l'action conjuguée de l'eau, l'air et les êtres vivants et de son mélange à une proportion variable de matière organique. Les sols observés sur des fosses pédologiques (Avenard *et al.* 1973) et l'analyse des coupes de forages réalisées dans le

Tableau 1. Facteurs de pondération des paramètres de la méthode DRASTIC (Vrba & Zaporozec 1994).

Table 1. Factors of ponderation of parameters of the DRASTIC method (Vrba & Zaporozec 1994).

Symbole	Paramètre	Facteur de pondération
D	Profondeur de la nappe	5
R	Recharge nette	4
A	Lithologie de l'aquifère	3
S	Type de sol	2
T	Topographie	1
I	Zone non saturée	5
C	Perméabilité	3

bassin versant du N'zi, montrent que ces sols sont composés d'argiles et de sables de faible épaisseur (inférieure à 2 m).

La topographie (T) reflète la géomorphologie de la surface terrestre. Elle permet de contrôler la probabilité qu'un polluant a de s'écouler ou de s'infiltrer dans le sol. Elle est évaluée par la pente. Ce paramètre pente est réalisé à partir du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) du bassin versant du N'zi.

L'impact de la zone non saturée (I) représente la zone non saturée au-dessus du toit de la nappe. Elle correspond à la portion souterraine du terrain comprise entre le sol (premier mètre à partir de la surface) et le niveau supérieur de la nappe souterraine. La texture de cette zone détermine le temps de transfert du polluant vers l'aquifère. Les différentes coupes géologiques des forages ont permis de mettre en évidence les matériaux constitués de granites, de schistes et de roches vertes.

La perméabilité (C) ou conductivité hydraulique reflète la vitesse à laquelle l'eau s'écoule horizontalement à travers un aquifère. Elle dépend à la fois du fluide et du milieu qui le contient. Une méthodologie propre aux milieux fissurés pour la détermination des perméabilités induites par les fractures a été proposée par Franciss (1970), puis utilisée et améliorée par Savadogo (1984), Biémi (1992), Savané (1997), Kouamé (1999), Koussoubé (1996) et Jourda (2005). Son application s'est effectuée sur la carte de fracturation du bassin versant du N'zi régulièrement maillée issue des images satellitaires ETM+ de Landsat 7. Dans chaque maille de taille 5 km×5 km, il est déterminé le nombre total de fractures, la longueur et l'orientation de chaque fracture. À partir de ces paramètres, il est calculé à l'intérieur de chaque maille, les perméabilités induites maximum, minimum et moyenne.

Pondération, classification et cotation des sept paramètres hydrogéologiques

Chaque paramètre hydrogéologique considéré est pondéré en fonction de son importance relative sur la vulnérabilité de l'eau souterraine. Le tableau 1 met en

relation chaque paramètre et le facteur de pondération correspondant proposé par Vrba & Zaporozec (1994).

Par ailleurs, chaque paramètre est subdivisé en classes représentant soit un milieu particulier, soit un intervalle de valeurs. Les différentes classes de chaque paramètre sont alors cotées en fonction de leur influence particulière sur la vulnérabilité de la nappe. La cote 1 correspond au degré de vulnérabilité le plus faible et la cote 10, au degré de vulnérabilité le plus élevée. Le tableau 2 présente la classification et la standardisation des sept paramètres de la méthode DRASTIC proposés par Aller *et al.* (1987).

Le tableau 3 dresse les poids, classes et notes attribuées aux paramètres DRASTIC du bassin versant du N'zi. Les systèmes de pondération et de notation des différents paramètres hydrogéologiques du bassin versant du N'zi, permettent de calculer un indice de vulnérabilité (Indice DRASTIC), donné par l'équation (1).

$$\text{Indice DRASTIC} = DwDr + RwRr + AwAr + SwSr + TwTr + IwIr + CwCr \quad (1)$$

Avec w=poids attribué à chaque paramètre et r=cote (valeur de l'intervalle) attribué à chaque paramètre.

L'établissement de la carte thématique consiste à reporter dans l'espace, les différentes valeurs d'indices DRASTIC subdivisés en intervalles, et faire correspondre ces plages d'indices à des classes de vulnérabilité. La classification proposée par Aller *et al.* (1987) (Tab. 4) a été retenue dans cette étude pour une meilleure lisibilité et une bonne interprétation de la carte résultante. L'organigramme de la réalisation de la carte de vulnérabilité à partir de la méthode DRASTIC est représenté à la figure 3.

RESULTATS

Productivité des aquifères du bassin versant du N'zi

Le tableau 5 présente la fréquence des différentes classes de débits rencontrés sur le bassin versant du N'zi. Presque la moitié des forages (49,36%) du bassin a un débit compris entre 0 et 2,5 m³/h au nombre desquels les débits faibles (1 à 2,5 m³/h) sont les plus représentatifs. Les débits forts (entre 5 m³/h et 10 m³/h) et très forts (≥10 m³/h) représentent seulement 23,88% de l'ensemble des débits des forages rencontrés sur le bassin versant du N'zi.

La cartographie des différentes classes de débits est illustrée à la figure 4. La moitié nord du bassin versant du N'zi est dominée par des débits faibles. Par contre dans la moitié sud du bassin, toutes les classes de débits sont représentées avec une prédominance de la classe moyenne.

Tableau 2. Classes et notes attribuées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC (Aller *et al.* 1987).
 Table 2. Classes and notes assigned to the seven parameters of the DRASTIC method (Aller *et al.* 1987).

Paramètres	Classe	Note	Note typique
D : Profondeur de la nappe (m)	0-1,5	10	
	1,5-4,5	9	
	4,5-9	7	
	9,0-15,0	5	
	15-23	3	
	23-30	2	
	>30	1	
R : Recharge nette (mm)	0-50	1	
	50-100	3	
	100-175	6	
	175-225	8	
	>225	9	
A : lithologie de l'aquifère	Schistes massifs	1 à 3	2
	Métamorphique	2 à 5	3
	Métamorphique (altéré – grès)	3 à 5	
	Calcaire massif	4 à 9	8
	Grès massif	4 à 9	6
	Sable et gravier	4 à 9	8
	Basalte	2 à 10	9
	Calcaire karstique	9 à 10	10
S : Type de sol	Mince ou absent	10	
	Graviers	10	
	Sables	9	
	Limons sableux	4	
	Limons	4	
	Limons silteux	3	
	Argiles	1	
	T : Topographie (%)	0-2	10
2-6		9	
6-12		5	
12-18 %		3	
>18 %		1	
I : Zone non saturée	Silt et argile	2 à 6	3
	Schistes	2 à 6	3
	Calcaire	2 à 5	3
	Grès	2 à 7	6
	Sable et gravier avec passage silt et argile	4 à 8	6
	Sable et gravier	4 à 8	8
	Basalte	2 à 10	9
	Calcaire karstique	8 à 10	10
C : Perméabilité (m/s)	$<5.10^{-5}$	1	
	5.10^{-5} à 15.10^{-5}	2	
	15.10^{-5} à 33.10^{-5}	4	
	33.10^{-5} à 5.10^{-4}	6	
	5.10^{-4} à $9,5.10^{-4}$	8	
	$>9,5.10^{-4}$	10	

Des poches de débit fort s'identifient à M'Bahiakro, Dimbokro et Toumodi. Le débit est très fort dans l'extrême sud-ouest de Tiébissou. Dans le bassin versant du N'zi, la moitié sud du bassin est plus productive en terme de débit que la moitié nord. L'étude de la variation des débits en fonction de l'épaisseur d'altérites (Fig. 5) montre que l'importance des débits des ouvrages ne semble pas établir une relation particulière avec la puissance des

altérites d'une manière générale. Cependant, les débits d'exploitation moyen (entre $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ et $5 \text{ m}^3/\text{h}$) et fort (entre $5 \text{ m}^3/\text{h}$ et $10 \text{ m}^3/\text{h}$) se rencontrent généralement dans les zones où les épaisseurs des altérites sont comprises entre 6 et 70 m environ. Au-delà de 70 m d'épaisseur d'altérites, aucun débit intéressant n'est obtenu dans le bassin versant du N'zi.

Tableau 3. Poids, classes et notes attribuées aux paramètres DRASTIC du bassin versant du N'zi.

Table 3. Weights, classes and notes assigned to DRASTIC parameters of the N'zi watershed.

Paramètres	Poids	Classes	Notes spécifiques
D : Profondeur de la nappe (m)	5	•0-1,5 m	10
		•1,5-4,5	9
		•4,5-9	7
		•9,0-15,0	5
		•15-23	3
		•23-30	2
		•>30	1
R : Recharge nette (mm)	4	•47,62	1
A : Lithologie de l'aquifère	3	•Roches ignées et métamorphiques altérées	4
		•Schistes	6
S : Type de sol	2	•Sol mince ou absent	10
T : Topographie (%)	1	•0 - 2	10
		•2 - 6	9
I : Nature de la zone non saturée	5	•Roches métamorphiques et ignées	4
		•Schistes	6
C : Perméabilité (m/s)	3	• $1,347 \cdot 10^{-9}$ - $7,653 \cdot 10^{-6}$	1

Tableau 4. Intervalles des valeurs des indices DRASTIC et classes de vulnérabilités correspondantes selon Aller *et al.* (1987).

Table 4. Intervals of the values of DRASTIC index and classes of corresponding vulnerabilities according to Aller et al. (1987).

Intervalles des indices DRASTIC	Classes de vulnérabilités
23 < Id < 80	Vulnérabilité très faible
80 < Id < 100	Vulnérabilité faible
100 < Id < 140	Vulnérabilité modérée
140 < Id < 180	Vulnérabilité forte
180 < Id < 226	Vulnérabilité extrême

Tableau 5. Fréquence des classes de débits rencontrés sur le bassin versant du N'zi.

Table 5. Frequency of yields classes met on the N'zi watershed.

Débits (m ³ /h)	Classe	Nombre de forages	Fréquence (%)
[0-1]	Très faible	170	13,58
[1-2,5]	Faible	448	35,78
[2,5-5]	Moyenne	335	26,76
[5-10]	Forte	210	16,77
≥ 10	Très forte	89	7,11
Total		1252	100

Les moyennes de débits enregistrés par classe d'épaisseur d'altérites (Fig. 6) sont plus importantes pour les altérites de moins de 60 m d'épaisseur (3,5 m³/h). Au-delà de 60 m d'épaisseur d'altérites, ces débits tendent à baisser mais la moyenne reste tout de même supérieure à 2,5 m³/h.

Les classes d'altérites favorisant un débit moyen à fort, les plus couramment rencontrés sont de 0 à 10, 10 à 20, 20 à 30 m soit respectivement 36%, 25% et 16% (Fig. 7).

La profondeur optimale d'obtention des forages productifs dans le bassin versant du N'zi est illustrée à partir de la figure 8. À l'analyse de cette figure, il ressort que la tranche de profondeur optimale à proposer pour la réalisation des forages économiques est comprise entre 20 à 95 m environ. Cette tranche est caractérisée par des débits plus importants pouvant atteindre parfois 30 m³/h. Au-delà d'une profondeur de 95 m, les forages rencontrés ont de faibles débits.

Cette délimitation de la profondeur optimale est renforcée par les fréquences d'apparition des débits en fonction de la profondeur (Fig. 9). L'intervalle des profondeurs dans lesquels les débits d'exploitation apparaissent fréquemment pour l'ensemble des forages est compris entre 40 et 100 m. Les débits d'exploitation apparaissent importants entre 60 et 70 m de profondeur avec une fréquence de 22,9%.

La relation qui lie la productivité des forages aux formations géologiques les plus représentées du bassin versant du N'zi (Tab. 6) montre que toutes les formations sont productives, cependant à des proportions différentes : granites (60%), schistes (39,8%) et roches vertes (0,2%).

La formation granitique demeure la plus productive pour l'ensemble des classes de débits. La formation de roches vertes reste la moins productive, voire négligeable. Toutefois, le débit le plus élevé (30 m³/h) est constaté dans les formations schisteuses (Tab. 7). Dans ces schistes, les classes de débits les plus représentatives sont respectivement 1-2,5 ; 2,5-5 et 5-10, alors que dans les granites, l'ordre de classement est respecté avec cette fois en troisième position la classe de débits 0-1.

Dans l'ensemble, les classes de débits les plus rencontrées dans le bassin versant du N'zi, suivent l'ordre imposé par les schistes avec des proportions respectives de 35,9%, 26,9% et 16,8%.

Vulnérabilité intrinsèque des aquifères fracturés du bassin versant du N'zi

Les valeurs de l'Indice DRASTIC permettant de caractériser le degré de vulnérabilité des aquifères du

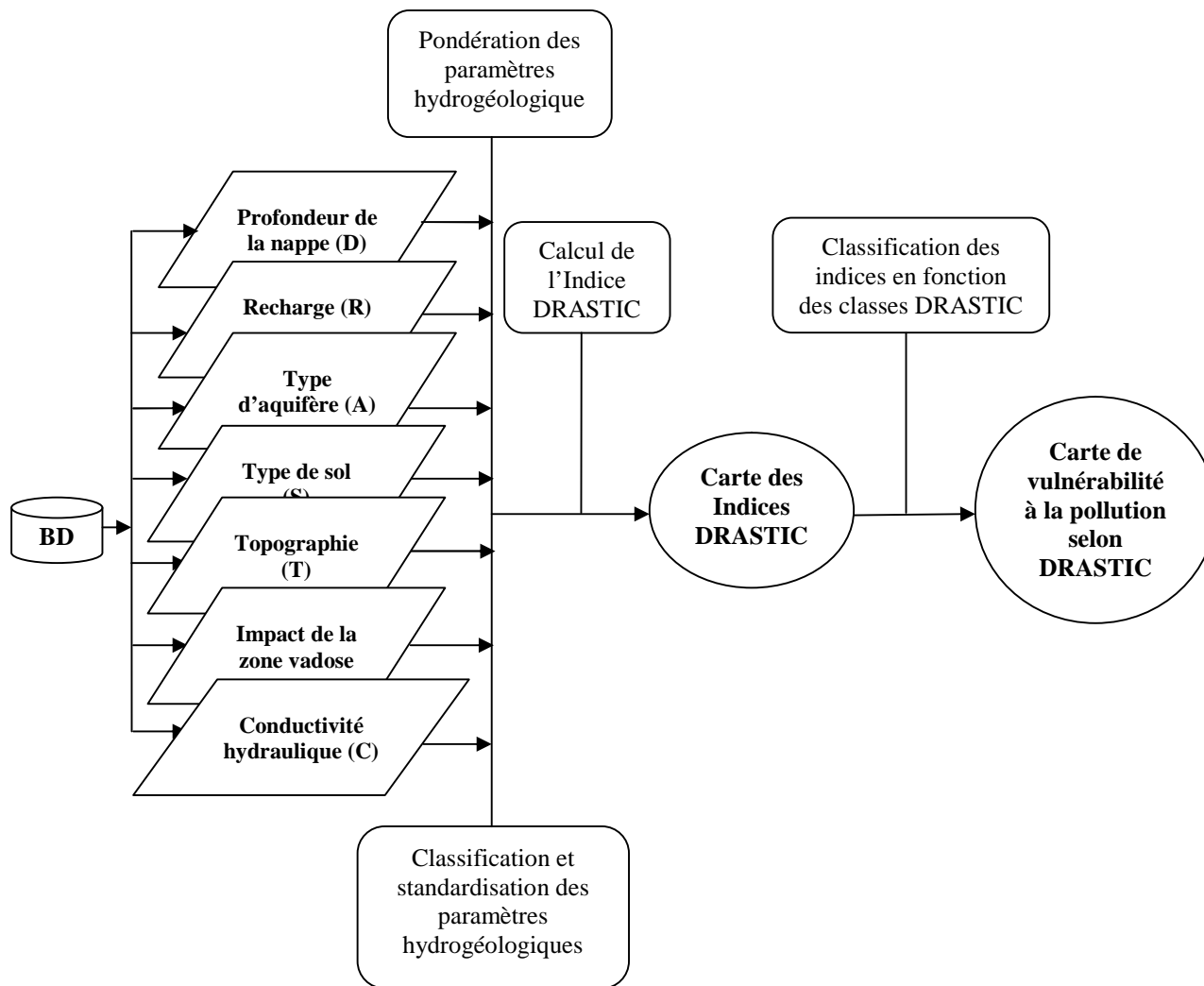


Figure 3. Organigramme de la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution à partir de la méthode DRASTIC.

Figure 3. Flow chart of the realization of the vulnerability map to the pollution from DRASTIC method.

bassin versant du N'zi varie de 73 à 135. Ces valeurs permettent de distinguer 3 zones différentes de vulnérabilités (très faible, faible et moyenne) inégalement réparties spatialement sur le bassin versant du N'zi (Fig. 10). Les classes à vulnérabilité faible et très faible sont essentiellement situées au sud-est du bassin sur les formations schisteuses. Quelques poches s'identifient sur les formations granitiques du bassin (au nord de Tafiré, au sud de Niakaramandougou, de Katiola et de Toumodi, autour de Yamoussoukro et de Toumodi et l'est de Tiébissou). Le degré de vulnérabilité très faible peut être lié au niveau d'eau dans l'aquifère supérieur à 30 m sur les formations schisteuses principalement. Le degré de vulnérabilité faible caractérise le niveau d'eau dans l'aquifère situé entre 15 m et 30 m, à la fois sur les formations schisteuses et granitiques. La vulnérabilité moyenne se rencontre dans la partie amont du bassin et occupe essentiellement la partie centrale et la bande sud-ouest du bassin. Cette

vulnérabilité évolue dans le sens longitudinal nord-sud. Ce degré de vulnérabilité peut être lié au niveau d'eau dans l'aquifère inférieur à 15 m essentiellement sur les formations granitiques. La répartition en pourcentage des degrés de vulnérabilité à la pollution (Fig. 11) montre que la classe de vulnérabilité faible occupe la plus forte proportion (50%) à côté des classes de vulnérabilité moyenne (37%) et très faible (13%) du bassin versant du N'zi. La validation de la carte de vulnérabilité à la pollution des aquifères du bassin versant du N'zi a porté sur l'analyse des 108 échantillons de nitrates provenant des forages. Les valeurs des concentrations de nitrates dans les eaux souterraines du bassin versant du N'zi varient de 0 à 35,8 mg/L. La valeur moyenne est de 1,93 mg/L. Pour environ 96,3% des échantillons (soit 104), la teneur en nitrates varie de 0 à 7,2 mg/L. Les 3,7% soit 4 restants, ont des teneurs de 16,3 mg/L, 17,3 mg/L, 21,5 mg/L et 35,8 mg/L. L'échantillon à teneur

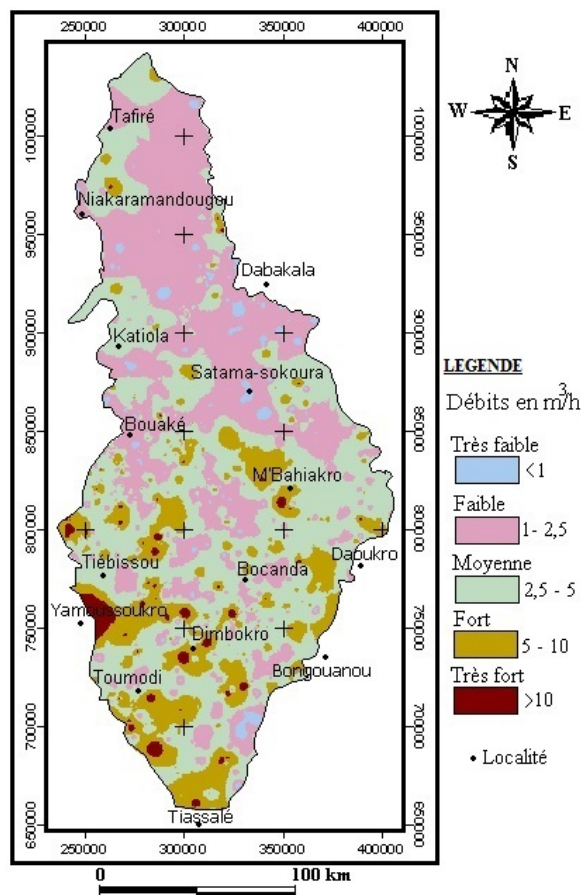


Figure 4. Débits d'exploitation du bassin versant du N'zi.
 Figure 4. Yields of exploitation of the N'zi watershed.

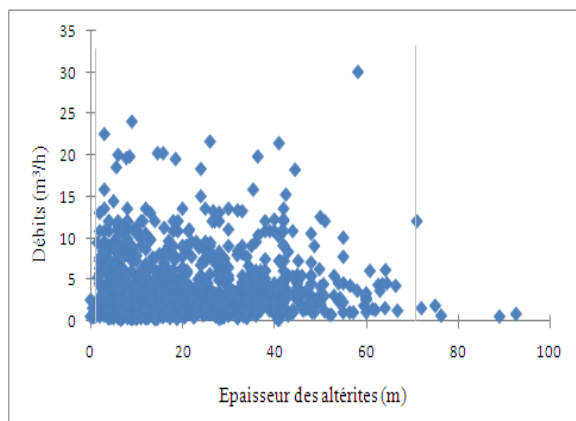


Figure 5. Variation des débits en fonction de l'épaisseur des altérites.
 Figure 5. Variation of the Yields according to the thickness of weathering.

en nitrate de 16,3 mg/L est un forage localisé en zone de vulnérabilité moyenne. Par contre, les 3 autres sont localisés en zone de vulnérabilité faible. De façon générale, les nitrates sont présents en faible

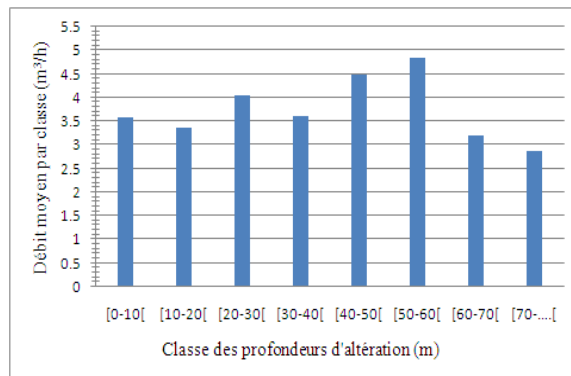


Figure 6. Variation du débit moyen par classe d'épaisseur des altérites
 Figure 6. Variation of the average yield by thickness class of weathering.

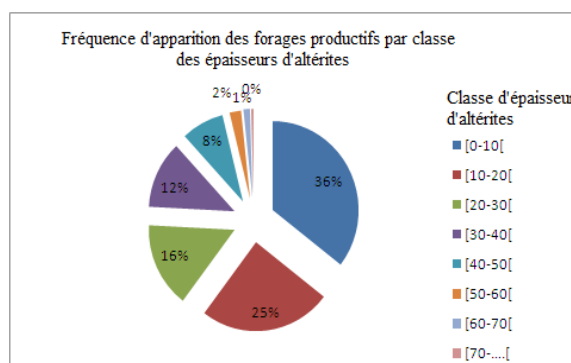


Figure 7. Fréquence d'apparition des forages productifs par classe d'épaisseur des altérites.
 Figure 7. Frequency of appearance of productive drillings by thickness class of weathering.

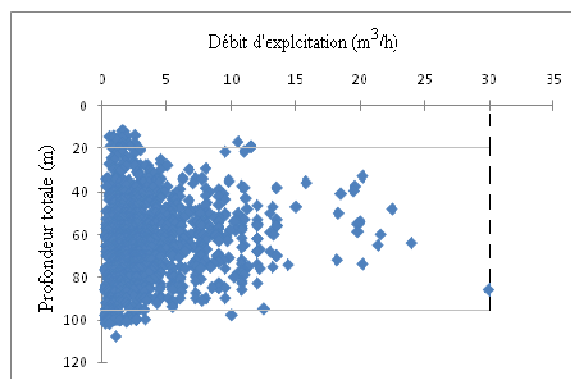


Figure 8. Répartition des débits en fonction de la profondeur totale de l'ouvrage.
 Figure 8. Distribution of the yields according to the total depth of drillings.

quantité dans les eaux souterraines du bassin versant du N'zi. Les teneurs en nitrates de la totalité des points d'eau de la zone d'étude restent largement en deçà de la norme admissible par l'O.M.S (50 mg/L).

Tableau 6. Fréquence des classes de débits des ouvrages en fonction des unités géologiques.
 Tableau 6. *Frequency of yields classes of drillings according to the geological units.*

Débits (m ³ /h)	Schistes		Granites		Roches vertes		Totaux	
	Ouvrages	Fréq (%)	Ouvrages	Fréq (%)	Ouvrages	Fréq (%)	Ouvrages	Fréq (%)
[0-1]	36	2,9	128	10,4	00	00	164	13,3
[1-2,5]	173	14	269	21,8	02	0,1	444	35,9
[2,5-5]	149	12,1	183	14,8	00	00	332	26,9
[5-10]	101	8,2	105	8,5	01	0,1	207	16,8
≥ 10	32	2,6	56	4,5	00	00	88	7,1
Totaux	491	39,8	741	60	03	0,2	1235	100

Tableau 7. Répartition des débits d'exploitation en fonction des unités géologiques.

Table 7. *Distribution of the yields exploitation according to geological units.*

	Valeur	Schistes	Granites	Roches vertes
Débits (m ³ /h)	Minimale	0,1	0,1	2,4
	Moyenne	4,1	3,5	4,2
	Maximale	30	24	7,9

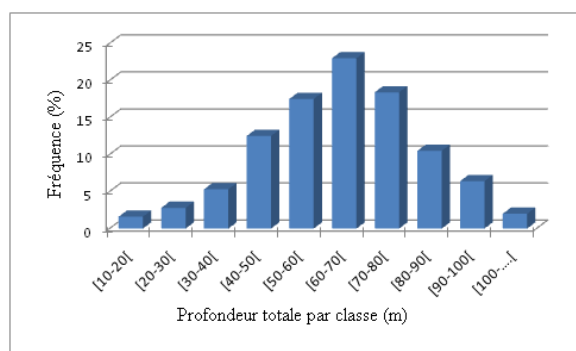


Figure 9. Fréquence d'apparition des débits par classe de profondeur.

Figure 9. *Frequency of appearance of the yields by depth class.*

DISCUSSION

Le taux élevé de débits faibles et très faibles des forages caractérise le bassin versant du N'zi, à l'image d'autres territoires de la Côte d'Ivoire (Konan-Waidhet *et al.* 2013, Gnamba *et al.* 2014). Ces faibles débits seraient imputés aux manques d'études sérieuses avant l'implantation des ouvrages lors des campagnes d'Hydraulique Villageoise (Lasm 2000). Les débits faibles de forages caractériseraient pour la plupart les forages de l'Hydraulique Villageoise à l'échelle du pays (Soro 1987). Les débits forts et très forts constituent un domaine favorable pour l'Hydraulique Urbaine et l'Agriculture motorisée (Savané 1997).

Les schistes birimiens (Précambrien moyen, 2100 à 1800 Ma) formés d'empilements de feuillets, sont le plus souvent redressés à la verticale et offrent ainsi

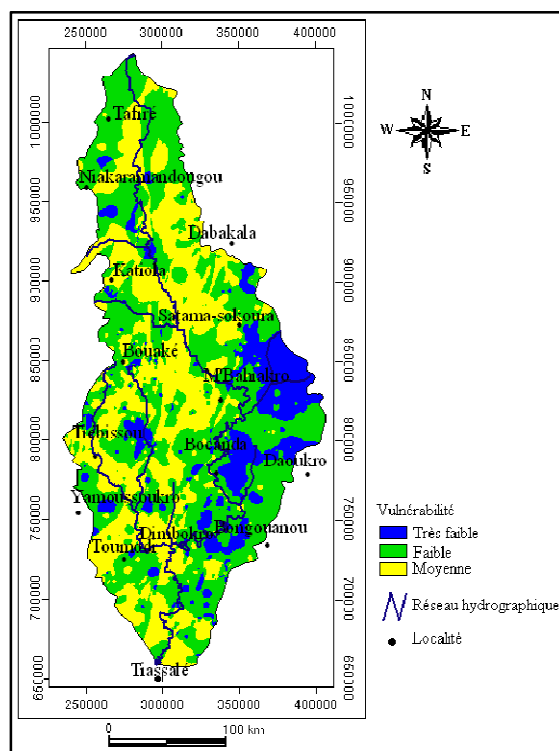


Figure 10. Carte de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères du bassin versant du N'zi.

Figure 10. *Intrinsic vulnerability map of aquifers of the N'zi watershed.*

d'importantes surfaces de pénétration à l'eau dans la roche (Biémi 1992). Ce qui justifie l'obtention de débits très forts dans ces formations. Les travaux de Delany (1965) dans le socle schisteux fissuré de la région de Dimbokro-Bongouanou, confirment l'obtention de forages à forts débits (de l'ordre de 18 m³/h pour cinq d'entre eux). Kouamé (1999) propose que pour les projets à venir sur l'adduction d'eau potable et la dotation des villages en système d'Hydraulique Villageoise Amélioré (HVA), les études hydrogéologiques complètes combinent les méthodes de la télédétection, de la géophysique, de la géologie structurale, de l'hydrogéologie dans un Système d'Information à Référence Spatiale.

L'absence de relation entre l'importance des débits des ouvrages et la puissance des altérites montrent que l'approche ne tient pas compte ni de la

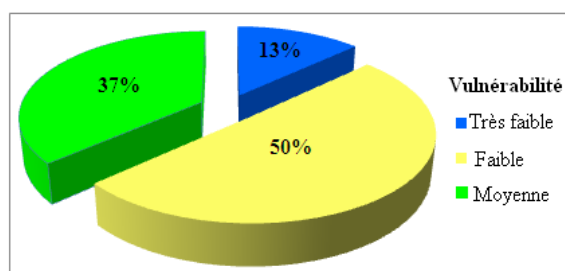


Figure 11. Répartition des degrés de vulnérabilité à la pollution des aquifères du bassin versant du N'zi.

Figure 11. Distribution of vulnerability degrees to pollution of aquifers of the N'zi watershed.

nature des altérites, ni de la roche mère dont elles sont issues. En effet, la productivité des forages augmente avec l'épaisseur des altérites sur les roches cristallines et cristallophylliennes et diminue lorsqu'il s'agit des schistes, notamment les schistes birimiens de Côte d'Ivoire (Biscaldi 1967, Berger *et al.* 1981, N'Go *et al.* 2004). L'évolution des débits par rapport à l'épaisseur d'altération est fonction du type de formation géologique (Kouassi *et al.* 2012).

Dans le bassin versant du N'zi, une importante épaisseur des altérites tend à s'opposer à la réalimentation des fractures sous-jacentes. C'est ce qui expliquerait la tendance à la baisse des débits en fonction de l'épaisseur des altérites. En réalité, entre la roche saine imperméable et les altérites de surface existe un horizon intermédiaire appelé horizon fissuré ou fracturé capté par les forages. L'origine des fissures est souvent attribuée à la décompression (Davis & Turk 1964, Acworth 1987, Wright 1992), cités par Lachassagne *et al.* (2001), et peut atteindre des épaisseurs de l'ordre de la cinquantaine de mètres voire la centaine (Pirard 1965). Il constitue en fait la première étape d'altération de la roche saine (Lachassagne *et al.* 2001, Wyms *et al.* 2004) au cours de laquelle les biotites sont transformées au contact de l'eau en chlorite puis en argiles gonflantes. L'augmentation du volume qui résulte de cette altération produit des contraintes à l'intérieur de la roche, ce qui provoque une fissuration sub-horizontale dans le cas d'une roche homogène. Plus l'altération progresse, plus l'espacement entre les fissures se rétrécit (progression de bas en haut sur un profil), jusqu'à atteindre un écart de la taille des minéraux, où la roche commence à s'aréniser. L'accroissement des épaisseurs d'altérites, dont l'importance tend à obstruer les voies de circulation des eaux dans les fractures constituent ainsi, un frein à l'alimentation des nappes de fissures.

Ce résultat est conforme aux résultats d'autres travaux effectués en Côte d'Ivoire (Berger *et al.* 1981, Biémi 1992, N'Go *et al.* 2004, Soro *et al.* 2010) au Burkina Faso (Sourisseau 1981) et au Togo (Assouma 1988).

L'analyse statistique de certains paramètres des forages et les relations qui lient d'autres paramètres entre eux influencent la productivité des aquifères

fracturés et présentent un intérêt certain, ou bien préalablement à toute recherche, ou bien encore après une période d'exploitation.

L'établissement de la carte de vulnérabilité à la pollution selon la méthode DRASTIC a justifié de l'utilisation de certains paramètres (recharge, conductivité hydraulique, profondeur) dont la réalisation s'est faite par interpolation par krigeage. Cette dernière entraîne des erreurs dans la réalisation de ces paramètres car elle n'est fiable qu'à l'intérieur des intervalles délimités par les données ponctuelles. L'autre difficulté de l'application de la méthode DRASTIC concerne les limites des classes et les cotes qui sont assignées aux différents paramètres (Murat 2000). En effet, les limites des classes standard ne reflètent pas souvent la réalité de la zone d'étude du fait que ces classes peuvent regrouper des entités différentes (Lobo-Ferreira *et al.* 1995). Les limites des différentes classes peuvent alors varier d'une étude à une autre et d'une région à une autre.

En dépit des différentes limites soulevées dans l'établissement de la carte de vulnérabilité, il n'en demeure pas moins que cette dernière est fiable (Champagne & Chapuis 1993, Murat 2000, Murat *et al.* 2003, Fofana 2005, Anani 2006, Bahri *et al.* 2007, Djabri *et al.* 2015, Drias & Toubal 2015). Elle permet d'avoir une idée sur les zones sensibles qu'il va falloir prendre en compte lors de l'aménagement du territoire (Jourda 2005). La répartition spatiale du degré de vulnérabilité à la pollution laisse supposer que les aquifères granitiques sont plus vulnérables à la pollution que les aquifères schisteux. Les eaux souterraines du bassin versant du N'zi seraient plus incontestablement à l'abri d'une pollution sur les formations schisteuses que granitiques.

Les teneurs en nitrates des forages très faibles voire insignifiantes par rapport à la norme de l'OMS, mettent en évidence d'une part, la qualité des eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable de la population et, d'autre part, une excellente protection de celles-ci contre les influences anthropiques. Ces différents résultats sont la preuve que les eaux souterraines seraient à l'abri des polluants d'origine superficielle.

CONCLUSION

Le bassin versant du N'zi est caractérisé par des débits faibles (1 à 2,5 m³/h). Sur le plan spatial, la moitié sud du bassin est plus productif (débits élevés) que la moitié nord. Les débits d'exploitation moyen et fort ($Q > 2,5$ m³/h) se rencontrent généralement dans les zones où les épaisseurs des altérites sont comprises entre 6 et 70 m environ. Les moyennes de débits enregistrés par classe (3,5 m³/h) sont plus importantes pour les altérites de moins de 60 m d'épaisseur. Les classes d'altérites favorisant un débit moyen à fort, les plus couramment rencontrés sont de 0 à 10 m, 10 à 20 m et 20 à 30 m. La tranche de profondeur optimale à proposer pour la réalisation

des forages économiques est comprise entre 20 à 95 m environ. Les débits peuvent y atteindre parfois 30 m³/h. L'intervalle des profondeurs dans lequel les débits d'exploitation sont importants est compris entre 60 et 70 m. Toutes les formations du bassin versant du N'zi sont productives, cependant à des proportions différentes. La formation granitique demeure la plus productive pour l'ensemble des classes de débits, alors que le débit le plus élevé (30 m³/h) est constaté dans les formations schisteuses. Ces résultats peuvent donc contribuer à orienter les prospections hydrogéologiques futures et à l'implantation prévisionnelle d'autres forages.

Outre cela, les eaux souterraines du bassin versant du N'zi sont à l'abri des pollutions d'origine superficielles. La carte de vulnérabilité intrinsèque montre que la vulnérabilité varie de moyen à très faible et est inégalement répartie spatialement sur le bassin versant du N'zi. Les secteurs du bassin à vulnérabilité faible (50%) et très faible (13%) sont essentiellement situés à l'est du bassin sur les formations schisteuses. Quelques poches s'identifient sur les formations granitiques du bassin (au nord de Tafiré, au sud de Niakaramandougou, de Katiola et de Toumodi, autour de Yamoussoukro et de Toumodi et l'est de Tiébissou). La vulnérabilité moyenne (37%) occupe essentiellement la partie centrale du bassin dans le sens longitudinal nord-sud.

La carte de vulnérabilité des aquifères à la pollution est pertinente puisqu'elle permet de distinguer les unités de fonctionnement sur le bassin versant du N'zi et d'adapter la gestion globale en fonction de ces unités. C'est donc un outil d'aide à la décision susceptible de guider les aménagements et la gestion des activités et usages de l'eau.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère des Infrastructures Économiques de l'Hydraulique Villageoise (MIE-HV) de Côte d'Ivoire pour la mise à leur disposition de données de forages. Ils expriment toute leur reconnaissance aux évaluateurs pour leurs nombreux commentaires, critiques et suggestions.

REFERENCES

- AFD 2011. *Réalisation et gestion des forages équipés d'une pompe à motricité humaine en Afrique subsaharienne*. Guide méthodologique. Agence française de Développement, Paris, France, 85 p.
- Aller L., Bennet T., Lehr J.H. *et al.* 1987. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings*. US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-87-036, 455 p.
- Al-Zabet T. 2002. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environnemental Geology*, 43, 203-208.
- Anani A.T. 2006. *Evaluation et cartographie des zones vulnérables à la pollution des eaux souterraines au niveau du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) par les méthodes DRASTIC et GOD*. Mémoire de DEA, Université de Cocody, 71 p.
- Assouma D. 1988. *Etude par modèle mathématique de la structure et du fonctionnement d'un aquifère de socle exploité, en région tropicale (alimentation en eau potable de la ville de Dapaong-Togo)*. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université d'Orléans, 183 p.
- Avenard J. M., Eldin M., Girard G. *et al.* 1971. *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*. Mémoire ORSTOM, 391p.
- Avenard J.-M., Bonvallot J., Latham M. *et al.* 1973. *Le contact forêt-savane en moyenne Côte d'Ivoire*. *Annales de géographie*, 453, 513-544.
- Bahri H., Rebai N. et Zaier A. 2007. Apport de la Télédétection et des SIG pour l'estimation du rôle de la fracturation dans la contamination de la nappe du Maastrichtien comme suite à une exploitation des réserves phosphatées de la partie occidentale de Sra-Ouertane (Tunisie). *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicale*, 31, 43-56.
- Berger J., Camerlo J., Fahy J.C. *et al.* 1981. Etudes des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin : la boucle du cacao (Côte d'Ivoire). *Bulletin BRGM*, 4, 273-291.
- Biémi J. 1992. *Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'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, Faculté des Sciences et Techniques, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 493 p.
- Biscaldi R. 1967. *Etude statistique des forages et carte hydrogéologiques des régions à substratum éruptif et métamorphique en Afrique Occidentale*. BRGM-CIEH, 2, 437 p.
- Champagne L. et Chapuis R.P. 1993. Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC. *Sciences et techniques de l'eau*, 26, 169-176.
- C.I.E.H. 1978. *Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraines des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest*. Tome I. Delany. F. 1965. *Hydrogéologie des régions à substratum schisteux du Ghana, du Nigéria et de la Côte d'Ivoire et programme des travaux en Côte d'Ivoire*. Document BRGM, 68 p.
- Djabri L., Hani A., Chaffai H. *et al.* 2015. Etude de la vulnérabilité des eaux à la pollution un gage pour l'élaboration d'une GIRE : cas de la plaine alluviale de Tebessa. *Larhyss Journal*, 22, 25-34.
- Drias T. et Toubal A.C. 2015. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe alluviale de Tebessa-Morsott (bassin versant de l'Oued Ksob) extrême est algérien. *Larhyss Journal*, 22, 35-48.
- Engalenc M., grillot J. C., Lachaud J. C. 1979. *Méthodes d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches de l'Afrique de l'Ouest*. Édition Géohydraulique, 2, 193p.
- Faillat J.P. 1987. Aquifères fissurés en zone tropicale humide: structure, hydrodynamique et hydrochimie (Afrique de l'ouest). *Hydrogéologie*, 109-112.
- Fofana F. 2005. *Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe d'Abidjan selon les méthodes DRASTIC et GOD*. Mémoire de DEA, Université d'Abobo-Adjamé, 68p.

- Franciss F.O. 1970. *Contribution à l'étude du mouvement d'eau à travers les milieux fissurés*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble I, 108p.
- Fréchette R. 1987. *Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines face aux risques de contamination engendrée par l'usage de pesticides*. Institut National de la Recherche Scientifique, Québec.
- Gnamba F.M., Oga Y.M.S., Gnanagne, T. *et al.* 2014. Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 10, 79-98.
- Jourda J.P., Saley M.B., Djagoua E.V. *et al.* 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, 339-357.
- Jourda J.P.R. 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'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody Abidjan, 430p.
- Konan-Waidhet A.B., Dibi B., Kouadio K.E. *et al.* 2013. Apport des techniques géospatiales pour l'analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région de Dioulatiédougou (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7, 2611-2625.
- Kouamé K.F. 1999. *Hydrogéologie des aquifères discontinus de la région sémi-montagneuse de Man-Danané (Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport des données des images satellitales et des méthodes statistique et fractale à l'élaboration d'un système d'information hydrogéologiques à référence spatiale*. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Cocody, 196p.
- Kouassi A.M., Ahoussi, K.E., Yao K.A. *et al.* 2012. Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 10, 57-74.
- Koudou A. 2013. *Conception d'outils d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : application à la sélection des zones à potentialité aquifère et moins vulnérables à la pollution du bassin versant du N'zi*. Thèse de Doctorat Unique, Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 211p.
- Koudou A., Adiaffi B., Assoma T.V. *et al.* 2013. Conception d'un outil d'aide à la décision pour la prospection des eaux souterraines en zone de socle du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicale*, 37, 211-226.
- Koussoube Y. 1996. *Hydrogéologie en milieu du socle cristallin du Burkina Faso : cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (Province du Yatenga)*. Thèse Université Cheick Anta Diop, Dakar (Sénégal), 238p.
- Lachassagne P., Wyns R., Bérard P. *et al.* 2001. Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *Ground Water*, 39 (4), 568-581.
- Lasm T. 2000. *Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen)*. Thèse Unique de Doctorat, Université de Poitiers, 272p.
- Lobo-Ferreira J.P., Novo E.M. et Oliveira M.M. 1995. *Groundwater vulnerability mapping: Application to the Minho watershed in Northern Portugal's Celtic Region*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal, 7p.
- Monnet C. 1972. *Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama, Côte d'Ivoire. Evolution des éléments chimiques des eaux de son estuaire*. Thèse de Doctorat, Université de Nice, 427p.
- Murat V. 2000. *Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du Piémont LAURENTIEN*. Mémoire de maîtrise, INRS – Géosciences, Québec, 127p.
- Murat V., Martel R., Michaud Y. *et al.* 2000. Etude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : Application aux aquifères granulaires du Piémont Laurentien, Québec. *AIH-CNC et SCG*, 411-418.
- Murat V., Paradis D., Savard M.M. *et al.* 2003. *Vulnérabilité à la nappe des aquifères fracturés du sud-ouest du Québec : évaluation par les méthodes DRASTIC et GOD*. Commission géologique du Canada, 16p.
- N'go Y.A., Gone D.L., Savané I. *et al.* 2004. Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique Science* 1, 127-144.
- Osborn N.I., Eckenstein E. et Koon K.Q. 1998. *Vulnerability assessment of twelve major aquifer in Oklahoma. Oklahoma water resources boards*. Technical report.
- Perraud A. 1971. Les sols. In : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. *Mémoires O.R.S.T.O.M., Paris*, 50, 269-390.
- Pirard F. 1965. *Reconnaissance hydrogéologique des cercles de Bousse et Ouagadougou*. CIEH, BRGM, 78p.
- Savadogo A.N. 1984. *Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta - Etude régionale du bassin versant de la Sissili*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 350p.
- Savané I. 1997. *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apport de la télédétection et d'un système d'information d'hydrogéologique à référence spatiale*. Thèse de Doctorat Es Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, 395p.
- Schnebelen N., Platel J.P., Le Nindre Y. *et al.* 2002. *Gestion des eaux souterraines en Aquitaine Année 5. Opération sectorielle. Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise – Rapport BRGM/RP-51178-FR*.
- Soro G., Soro N., Ahoussi K.E. *et al.* 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, 227-242.

- Soro N. 1987. *Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire (bassin versant de la Mé)*. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université de Grenoble 1, Institut Dolomieu, 239 p.
- Sourisseau B. 1981. *Hydraulique villageoise dans le département du sahel (haute volta)*. Rapport final. République de Haute volta- BRGM.
- Tagini B. 1971. *Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai géotechnique régionale*. Thèse Université de Lausanne (Suisse), 302 p.
- Thornthwaite C.W. 1944. *The measurement of potentiel evapotranspiration*. J. M Mather, Sea-brook, New Jersey, 225p.
- Vrba J. & Zaporozec A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International association of hydrogeologists, 16, 131p.
- Wyns R., Baltassat J.-M., Lachassagne P. *et al.* 2004. Application of Proton Magnetic Resonance Soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de la Société géologique de France*, 175 (1), 21-34.

Manuscrit reçu le 03/05/2016
Version révisée acceptée le 18/07/2017
Version finale reçue le 22/07/2017
Mise en ligne le 24/07/2017