

Available online at <http://ajol.info/index.php/ijbcs>

Int. J. Biol. Chem. Sci. 7(5): 1987-2006, October 2013

ISSN 1997-342X (Online), ISSN 1991-8631 (Print)

**International Journal
of Biological and
Chemical Sciences**

Original Paper<http://indexmedicus.afro.who.int>

Apport des méthodes mathématiques dans la délimitation des périmètres de protection autour des ouvrages de captage des eaux souterraines d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

Kan Jean KOUAME ^{1*}, Jean Patrice JOURDA ¹, Serge Kouakou DEH ¹,
Edoukou Jacques DJEMIN ¹, Mahaman Bachir SALEY ¹, Abenan Tawa ANANI ¹
et Jean BIEMI ²

¹Laboratoire de Télédétection et d'Analyse Spatiale Appliquée à l'Hydrogéologie (LATASH), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

²Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant, E-mail: jeankkan@yahoo.fr

RESUME

Les eaux souterraines d'Abidjan sont exploitées à partir des ouvrages de captages à proximité desquels s'exercent plusieurs activités anthropiques pouvant constituer d'importants foyers de pollution. Il est donc nécessaire de mettre en place des stratégies en vue d'assurer une meilleure protection de cette ressource contre toute forme de pollution. Cette étude vise à délimiter des périmètres de protection des ouvrages de captage d'Abidjan à partir des méthodes analytiques complémentaires (méthode du Calcul du Rayon Fixe, méthode d'infiltration et celle développée par Krijgsman et Lobo-Ferreira). Le rayon du périmètre de protection immédiate déterminé en tenant compte du type d'aquifère exploité est de 40 m. Les rayons du périmètre de protection rapprochée et du périmètre de protection éloignée (forme ellipsoïdale) dans la partie amont des ouvrages de captage varient respectivement de 130 à 185 m et de 625 à 1101 m. Dans la partie aval de ces ouvrages, les rayons varient de 40 à 130 m et de 75 à 132 m pour la distance de protection perpendiculaire à la direction de l'écoulement de ceux-ci. Les risques potentiels de contamination sont essentiellement dus aux eaux usées résultant des activités domestiques, industrielles et l'entreposage des ordures ménagères à travers le District d'Abidjan.

© 2013 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Pollution, activités anthropiques, eaux usées, forages.

INTRODUCTION

L'utilisation intensive des eaux souterraines d'Abidjan et l'accroissement des activités anthropiques ont engendré de sérieux problèmes du fait d'un manque de protection de l'environnement (Matini et al., 2009 cité par Deh et al., 2012). Parmi ces problèmes, nous pouvons évoquer la pollution des

ressources en eau (Soro et al., 2009 ; Ahoussi et al., 2010). Ainsi, au niveau d'Abidjan, l'utilisation des sols, liée aux activités urbaines, agricoles et industrielles, a contribué à l'augmentation du potentiel de contamination des eaux souterraines. Dans certains des cas, la détérioration réelle de la qualité de cette ressource a été constatée (Deh

© 2013 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v7i5.17>

et al., 2012). Ces activités ont parfois conduit à l'abandon de certains forages du District d'Abidjan, où la concentration en nitrates était supérieure à 100 mg.L^{-1} (Jourda et al., 2006). Pour garantir à long terme une production d'eau de bonne qualité, il convient de mettre en place des stratégies de gestion des eaux souterraines. La prévention de la contamination commence à l'échelle régionale par l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères et requiert à l'échelle locale, l'établissement des périmètres de protection autour des ouvrages de captage (Hassani, 1999). A cette fin, la mise en place de périmètres de protection est un impératif reconnu par le législateur. Ainsi, le dimensionnement de ceux-ci peut être effectué à partir de méthodes analytiques ou graphiques qui tiennent compte des conditions hydrogéologiques du système aquifère (Bonnet et Bertone, 1998). C'est à cette fin que cette étude a été entreprise. Elle vise à déterminer des périmètres de protection autour des ouvrages de captage à partir de méthodes analytiques en vue de garantir une gestion durable de la qualité de cette ressource naturelle.

MATERIEL ET METHODES

Présentation générale du District d'Abidjan

Le District d'Abidjan sur lequel porte cette étude est située au Sud de la Côte d'Ivoire. Il est localisé entre les latitudes $5^{\circ}10'$ et $5^{\circ}38'$ Nord et les longitudes $3^{\circ}45'$ et $4^{\circ}21'$ Ouest (Figure 1). Il s'étend sur une superficie de $2\,119 \text{ km}^2$ (Kouamé et al., 2013). Le District d'Abidjan a une population estimée à environ 5 millions d'habitants (INS, 2001).

Au plan géologique, le District d'Abidjan appartient au bassin sédimentaire côtier composé de formation post-Eburnéennes (Aka, 1991). Au niveau hydrogéologique, il présente d'énormes potentialités en eaux souterraines (Jourda, 1987). Ces eaux souterraines sont essentiellement contenues dans trois niveaux d'aquifère d'inégales importance dont seul l'aquifère du Continental Terminal est le plus

exploité pour l'approvisionnement en eau potable de la population abidjanaise (Aghui et Biémi, 1984). Les eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal sont exploitées à partir des ouvrages de captage. Le District d'Abidjan dispose de neuf champs captants sur lesquels sont implantés 76 ouvrages de captage. Malheureusement, le champ captant du Plateau a été abandonné depuis quelques années, compte tenu de la présence d'un taux élevé de nitrate dans les eaux captées.

Données utilisées

Les données de cette étude sont constituées essentiellement :

- des débits de pompage (minimum, moyen et maximum) des forages exploités par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI). Ils ont été fournis par la SODECI ;
- des épaisseurs de la zone saturée dans les forages (épaisseurs mouillées) déterminées à partir des fiches techniques des différents forages comprenant la profondeur du forage et le niveau statique de l'eau ;
- des paramètres hydrodynamiques du Continental Terminal tels que la porosité (15%), le gradient hydraulique (0,18%) et la conductivité hydraulique qui varie entre 10^{-3} à 10^{-6} m.s^{-1} . Ces paramètres sont issus des travaux réalisés par Aghui et Biémi (1984) et Jourda (1987) ;
- des cartes d'aménagement des différentes communes d'Abidjan abritant les champs captants pour la représentation des périmètres de protection.

Les logiciels MapInfo 7.5 et ArcGIS 9.3 ont été utilisés pour le traitement des données.

Notion de périmètre de protection

Le périmètre de protection définit un territoire comprenant la surface et le sous-sol autour d'un ouvrage à travers lequel les contaminants peuvent migrer et atteindre l'eau souterraine pompée par le captage (Karanta et al., 2001). En Côte d'Ivoire, la loi n° 98-755 du 23 Décembre 1998 portant code de l'eau, en son article 38, définit le périmètre de protection en tant que mesure de salubrité

publique obligatoire. Elle prévoit trois types de périmètres de protection (immédiate, rapprochée et éloignée) (Figure 2).

Méthodologie

La méthodologie adoptée dans cette étude comporte deux étapes :

- étape 1 : la détermination des périmètres de protection autour des forages;
- étape 2 : l'identification des activités dangereuses exercées à l'intérieur de ces périmètres.

Détermination des périmètres de protection des forages

La détermination des périmètres de protection a nécessité l'utilisation de trois méthodes (méthode CFR, méthode établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira et la méthode d'infiltration).

La méthode CFR a permis de déterminer le rayon de délimitation des périmètres de protection immédiate alors que les méthodes d'infiltration et celle établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira ont été utilisées pour déterminer les rayons caractéristiques des périmètres de protection rapprochées et éloignées.

Périmètre de Protection Immédiate (PPI)

Pour déterminer le rayon des PPI, la méthode CFR utilisée tient compte de la géologie locale, des caractéristiques hydrauliques régionales et des débits de pompage des ouvrages de captage (Lobo-Ferreira et al., 2004). La méthode CFR considère deux paramètres fondamentaux : la distance et le temps de transfert (Kraemer et al., 2005). Elle est dite méthode du calcul du rayon fixe parce que le secteur qu'il décrit est un cercle qui a un rayon égal dans toutes les directions (Beach, 2001). En fonction du degré de confinement et de la typologie du système aquifère, six types d'aquifère ont été considérés par Krijgsman et Lobo-Ferreira (2001) :

- Type 1 : Système aquifère poreux et confiné ou nappe captive ;

- Type 2 : Système aquifère poreux non confiné ou nappe libre ;
- Type 3 : Système aquifère poreux semi-confiné ou nappe semi-captive ;
- Type 4 : Aquifère graveleux ou aquifère constitué de formations carbonatés (calcaires) ;
- Type 5 : Système aquifère constitué de formations ignées ou métamorphiques fissurées ;
- Type 6 : Système aquifère constitué de formations ignées ou métamorphiques peu fissurées.

Les rayons des PPI ont été fixés en fonction des différents systèmes d'aquifère (Tableau 1).

Périmètres de Protection Rapprochée (PPR) et Eloignée (PPE)

La méthode établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira et celle d'infiltration ont été utilisées pour la détermination du PPR et du PPE. La méthode établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira est basée sur les relations analytiques développées par Kreidler et Senger, modifiée par Bear et Jacobs (1965). Elle permet de déterminer les valeurs du temps de transfert sur une surface donnée (Verreaut, 2003) à partir des solutions de l'équation analytique (1). La détermination du rayon des périmètres de protection rapprochée qui doivent couvrir la zone d'appel des ouvrages tient compte d'un temps de transfert de 50 jours.

$$t_x = \frac{n}{k_i} \left[r_x - \left(\frac{Q}{2\Pi Kbi} \right) \ln \left\{ 1 + \left(\frac{2\Pi Kbi}{Q} \right) \times r_x \right\} \right] \dots\dots\dots (1)$$

- t_x : temps de transfert (jour) ;
- n : porosité de l'aquifère ;
- K : conductivité hydraulique ($m.j^{-1}$) ;
- Q : débit de pompage ($m^3.j^{-1}$) ;
- b : épaisseur de l'aquifère (m) ;
- i : gradient hydraulique ;
- r_x : rayon délimitant une surface suivant l'isochrone de temps de transfert t_x (m).

L'écoulement vertical est considéré négligeable par cette méthode. Elle considère uniquement l'écoulement horizontal régional

vers l'ouvrage de captage c'est-à-dire de la direction de l'écoulement (Bear et Jacobs, 1965). En tenant compte de l'écoulement régional naturel, il arrive qu'une partie de la zone d'influence du côté aval ne fasse pas partir de la zone d'appel. Ainsi, Garouni et Merzouk (2004) ont souligné que la zone à protéger en priorité contre une pollution due à une activité se situe en amont du captage (Figure 3). Les PPR et les PPE prennent alors la forme d'une ellipse caractérisée par trois distances de protection (Verreaut, 2003) (Figure 4):

- la distance de protection dans la partie amont de l'ouvrage ou rayon amont (r_{amont});
- la distance de protection dans la partie aval de l'ouvrage ou rayon aval (r_{aval});
- la distance de protection perpendiculaire à la direction de l'écoulement (r_p).

Pour déterminer ces distances en fonction du temps, l'équation précédente (1) a été simplifiée par Bear et Jacob (1965) :

$$t = A \left[r - \left(\frac{1}{F} \right) \ln \{ 1 + F.r \} \right] \dots\dots\dots(2)$$

Avec : $A = \frac{n}{ki} \dots\dots\dots(3)$

et $F = \frac{2\Pi Kbi}{Q} \dots\dots\dots(4)$

Les solutions analytiques de cette équation (2) sont exprimées par les équations (5) et (6) qui sont respectivement les distances de protection amont et aval du PPR.

$$r_{amont} = \left(\frac{0,00002 x^5 - 0,0009 x^4 + 0,015 x^3 + 0,37 x^2 + x}{F} \right) \dots\dots\dots(5)$$

$$r_{aval} = \frac{0,042x^3 + 0,37x^2 + x}{F} \dots\dots\dots(6)$$

Avec : $x = \sqrt{\frac{2Ft}{A}} \dots\dots\dots(7)$

Le rayon de protection aval des PPE a été déterminé par l'inverse de l'équation (4) :

$$R_{aval} = \frac{Q}{2\Pi Kbi} \dots\dots\dots(8)$$

Le rayon amont du PPE a été déterminé à partir de la méthode d'infiltration. Cette méthode consiste à établir un bilan de masse entre le volume d'eau prélevé par an et le volume de la recharge moyenne annuelle dans la zone d'alimentation du captage à protéger. Dans le cas d'un puits unique, la zone de recharge est assimilée à un cercle de superficie A et de rayon R.

$$A = \frac{Q}{I} \dots\dots\dots(9) \quad \text{ou} \quad R_{am} = \sqrt{\frac{Q}{\Pi I}} \dots\dots\dots(10)$$

- Avec :
- A : surface du cercle (m^2) équivalente à l'aire de recharge de la nappe ($= \pi R^2$)
 - R_{am} : rayon de l'aire de recharge de la nappe (m);
 - Q : débit maximum prélevé dans la nappe ($m^3.an^{-1}$);
 - I : recharge de la nappe ($m.an^{-1}$) équilibrant le débit Q prélevé dans le captage.

Evaluation des périmètres et des surfaces de protection correspondantes

La théorie de la méthode CFR qui prévoit des périmètres sous forme de cercle a été utilisée en vue d'estimer les valeurs des périmètres et des surfaces de protection des forages déterminés sous forme ellipsoïdale (Figure 5). Cette méthode permet aussi de calculer la distance de protection perpendiculaire à la direction de l'écoulement au droit du forage noté r_p . La méthode CFR part d'une analyse bidimensionnelle en considérant que l'eau est à l'équilibre

hydrostatique dans l'ouvrage (Kraemer et al., 2005). En effet, l'hypothèse de la symétrie radiale signifie que la limite de recharge d'un ouvrage a probablement une géométrie circulaire autour de celui-ci. Cette technique considère des cylindres dans la couche aquifère où les rayons de ces cylindres est fonction du temps de transfert des eaux de la surface du sol au puits (Beach, 2001) (Figure 6). En considérant l'écoulement radial vers un ouvrage avec un niveau d'eau constant, la limite cylindrique de rayon r est délimitée par une isochrone de temps de transfert t (limite des points d'égal temps de transfert) (Figure 7).

En tenant compte du débit de pompage de l'ouvrage, de la recharge régionale de la nappe, de la porosité de l'aquifère et de l'épaisseur saturée dans l'ouvrage, l'état d'équilibre pendant le temps de transfert se traduit par la relation (11) :

$$N \Pi r^2 t + n \Pi r^2 b = Qt \dots\dots\dots(11)$$

Avec :

- N : recharge de la nappe (m.j⁻¹) ;
- t : Temps de transfert des eaux souterraines (j) ;
- b : Epaisseur mouillée dans l'ouvrage (m) ;
- n : porosité du système aquifère (15%) ;
- Q : Débit de pompage de l'ouvrage (m³.j⁻¹) ;
- r : rayon de délimitation du PDP (m) ;
- NΠr²t : apport d'eau dû à la recharge de l'aquifère (m³) ;
- nΠr²b : volume d'eau contenu dans la couche aquifère cylindrique (m³) ;
- Qt : volume total d'eau prélevé durant la période de pompage (m³).

Le rayon r de la couche aquifère cylindrique exprimé en fonction de l'isochrone de temps de transfert t est :

$$r = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\Pi \cdot N \cdot t + \Pi \cdot n \cdot b}} \dots\dots\dots(12)$$

Dans la relation (12), lorsque l'apport dû à la recharge régionale est faible (cas de la nappe d'Abidjan 247,7 mm.an⁻¹), ce terme peut être négligé. En considérant l'isochrone

de temps de transfert 50 jours dans la relation (12), on obtient la relation (13) qui est le rayon du cercle correspondant au PPR (sous forme d'ellipse) :

$$r_1 = 4 \sqrt{\frac{Q}{n \cdot b}} \dots\dots\dots(13)$$

Ce rayon représente aussi la distance de protection perpendiculaire à la direction de l'écoulement au droit du forage pour les PPR et pour les PPE. En considérant l'isochrone de temps de transfert 3500 jours, le rayon du cercle correspondant au PPE (sous forme d'ellipse) est alors exprimé par la relation (14) :

$$r_2 = \sqrt{\frac{3500 \cdot Q}{\Pi \cdot n \cdot b}} \dots\dots\dots(14)$$

Les PPR et les PPE équivalents sont alors déterminés à partir des équations (15) et (16) :

$$PPR = 2 \Pi r_1 = 8 \Pi \sqrt{\frac{Q}{n \cdot b}} \dots\dots\dots(15)$$

$$PPE = 2 \Pi r_2 = 2 \sqrt{\frac{3500 \Pi Q}{n \cdot b}} \dots\dots\dots(16)$$

Les aires de protection équivalentes sont exprimées par les équations (17) et (18) :

$$A_{PPR} = \Pi r_1^2 = \frac{16 \Pi Q}{n \cdot b} \dots\dots\dots(17)$$

$$A_{PPE} = \Pi r_2^2 = \frac{35000 Q}{n \cdot b} \dots\dots\dots(18)$$

Identification des risques potentiels de pollution des ouvrages de captage

L'identification des risques a consisté à étudier l'environnement immédiat, rapproché et éloigné des forages. Elle s'est déroulée en s'appuyant sur les cartes d'aménagement des différentes communes et à recenser à l'intérieur des périmètres les activités susceptibles de polluer les eaux des forages. Il s'est agi de photographier et de localiser les risques potentiels de pollution afin de réglementer ou d'interdire les activités dans ces périmètres.

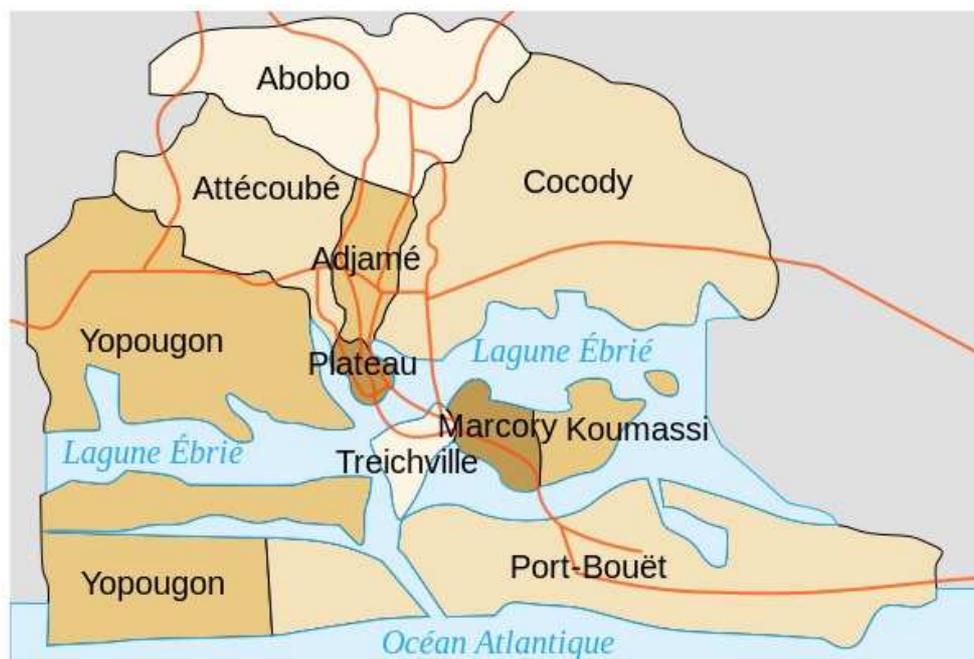


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

RESULTATS

Rayon des PPI

La nappe d'Abidjan est une nappe libre. Ainsi, selon la méthode CFR, ce type de système aquifère correspond au type 2 et les ouvrages de captage doivent bénéficier d'un PPI ayant un rayon fixé à 40 m. L'étude de terrain a montré que les forages du District d'Abidjan bénéficient d'un PPI de faible rayon (Figure 8).

Distances des PPR et des PPE

Les rayons qui caractérisent les PPR et des PPE sous forme d'ellipse sont consignés dans le Tableau 2. L'analyse de cet tableau révèle que :

- les rayons en amont des forages varient de 130 à 185 m pour les PPR ;
- les rayons en aval de ces mêmes forages varient de 37 à 92 m pour les PPR ;
- les rayons en amont des forages varient de 3628 à 8472 m pour les PPE ;
- les rayons en aval des forages varient de 40 à 124 m pour les PPE ;

- les rayons (R_p) perpendiculaires à la direction de l'écoulement au droit de forage varient de 75 m à 132 m.

Il faut remarquer que les distances de protection en aval des forages pour les PPR et les PPE sont très proches.

Périmètres et surfaces de protection des forages

La valeur des PPI est de 251,2 m avec une surface de protection identique à tous les forages de 5024 m². Les Tableaux 3 et 4 illustrent respectivement les mesures des périmètres et des surfaces de protection des forages du District d'Abidjan. Ces valeurs correspondent aux périmètres et aux surfaces des PPR et des PPE équivalents. Les valeurs des périmètres de protection ellipsoïdales varient de 470 m à 829 m pour les PPR et de 3922 m à 6917 m pour les PPE. Les surfaces à protéger autour des forages varient de 17578,5 m² à 54678 m² pour les PPR et de 1,2 km² à 3,8 km² pour les PPE du champ captant d'Anonkoua Kouté au champ captant d'Adjamé Nord. Les petites surfaces obtenues

varient de 17578,5 m² à 30430 m² pour les PPR et de 1,2 km² à 2,1 km² pour les PPE. Ces valeurs ont été enregistrées en général pour les forages d'Anonkoua Kouté, de Riviera Centre, de Zone Est mais aussi de la Zone Ouest. Les surfaces de protection les plus étendues ont été enregistrées pour les forages de la Zone Nord et d'Adjamé Nord. Pour les autres forages, les surfaces peuvent être considérées comme moyennes (30429 m² à 37579,3 m² pour les PPR et de 2,1 km² à 2,6 km² pour les PPE). Les périmètres et surfaces de protection rapprochées et éloignées qui correspondent respectivement à la zone d'appel et à l'aire d'alimentation des forages sont sous l'influence des débits de pompage journaliers et des épaisseurs saturées dans le forage. Lorsque cette épaisseur est moins importante, le périmètre ou la surface de protection devient plus étendue autour du forage.

Délimitation des périmètres de protection des forages

La délimitation des périmètres de protection autour des forages d'Abidjan a permis d'identifier à l'intérieur de ceux-ci, les principales sources potentielles de contamination.

Champ captant d'Anonkoua Kouté à Abobo

Les périmètres de protection autour des forages d'Anonkoua Kouté sont illustrés à la Figure 9. En ce jour, ce champ captant est dominé par la construction de nouvelles habitations dans les périmètres rapproché et éloigné. Certaines de ces habitations occupent la surface de protection immédiate du forage telle que définie dans cette étude. En amont de ces forages, il existe une unité industrielle d'élevage (Coquivoire). En effet, les eaux usées domestiques résultant des activités de ménage constituent la principale source qui menace la qualité des eaux de ces forages.

Champ captant de Zone Nord

La Figure 10 illustre les périmètres de protection autour des forages de Zone Nord. Sur ce champ captant, les alentours immédiats des forages sont dominés par les activités de mécanique d'automobile. Ces activités nécessitent l'usage des produits chimiques tels que la peinture, les dérivés d'hydrocarbures et les graisses industrielles d'entretien des moteurs. Dans ces zones, 76% des habitations sont en assainissement autonome (BNETD, 2008). Il faut souligner la présence dans ces périmètres des dépôts d'ordures (ordures ménagères, carcasses de voitures, pneus usés), le déversement d'huiles ainsi que la présence d'unités industrielles (MACACI, FILTISAC) rejetant d'importantes quantités d'eaux usées industrielles (Figure 11).

Champ captant de Zone Ouest

La Figure 12 montre les périmètres de protection des forages de la Zone Ouest. Sur ce champ captant, les habitations sont situées à proximité des forages (Figure 13a). Dans certaines habitations les latrines sèches constituent le mode d'évacuation des matières fécales.

Par ailleurs, il existe un cimetière datant de plusieurs décennies et qui est situé de 10 à 15 m dans la zone du périmètre rapproché du forage ZO 9 (Figure 13b). Cette zone est marquée par la présence d'une zone industrielle où la mauvaise évacuation des effluents industriels estimés à plusieurs dizaines de litres par jour peut conduire plus tard à la dégradation de la qualité des eaux captées.

Champ captant de la Zone Est

Le champ captant de la Zone Est est marqué par la présence de plusieurs petits villages caractérisés d'habitats précaires où les systèmes d'assainissement autonomes sont quasi inexistantes (Figure 14). Les eaux usées sont rejetées dans l'environnement rapproché des périmètres de protection. Ces quartiers sont situés dans les vallées qui constituent un facteur pouvant faciliter l'infiltration des

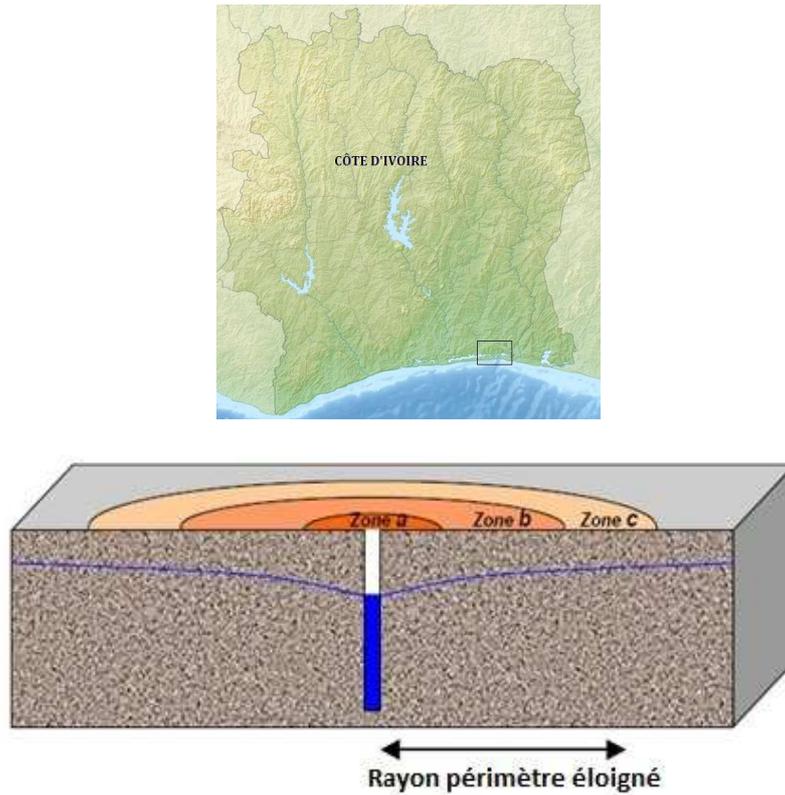


Figure 2 : Présentation des périmètres et des zones de protection autour d'un ouvrage (Krijgsman et Lobo-Ferreira, 2001).

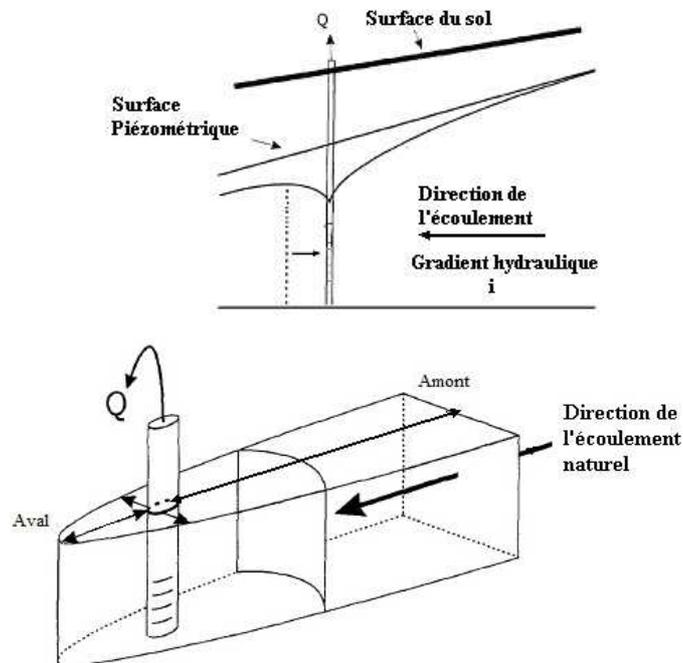


Figure 3 : Illustration de la zone d'appel et de la surface normale à l'écoulement souterrain naturel (Bear et Jacobs, 1965).

polluants vers les eaux souterraines. Dans de tels quartiers, les systèmes d'assainissement autonomes (fosses septiques, puits perdus, etc.) sont quasi inexistantes et lorsqu'ils existent, sont conçus de façon traditionnelle de sorte que les eaux usées sont toujours rejetées dans l'environnement. En effet, les

latrines sèches constituent le principal mode d'évacuation des matières fécales dans ces quartiers précaires (Figure 15). Elles exposent les eaux souterraines des ouvrages qui y sont implantés à des risques de contamination microbiologique (bactéries et virus).

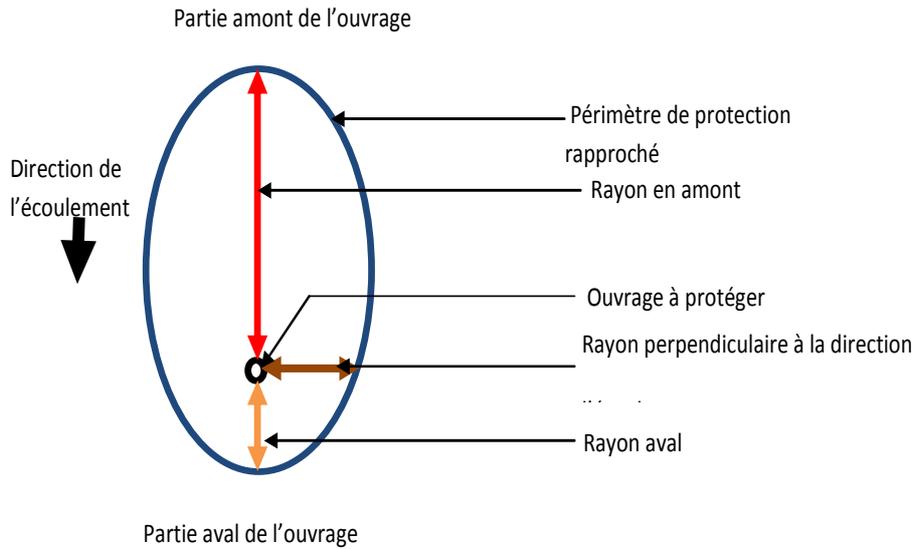


Figure 4 : Caractérisation des PPR selon la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira.

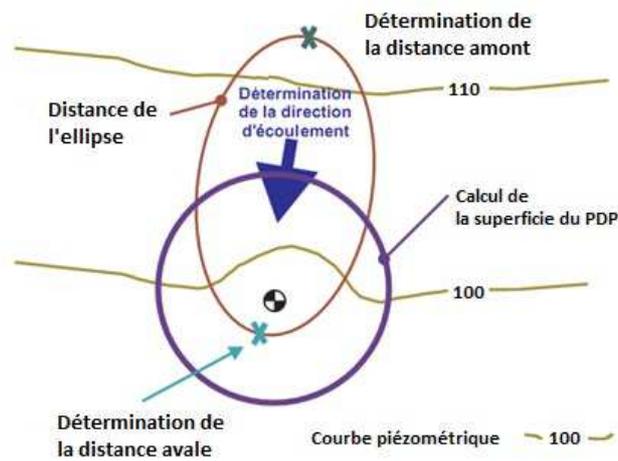


Figure 5 : Correspondance entre cercle et ellipse (Paradis, 2000).

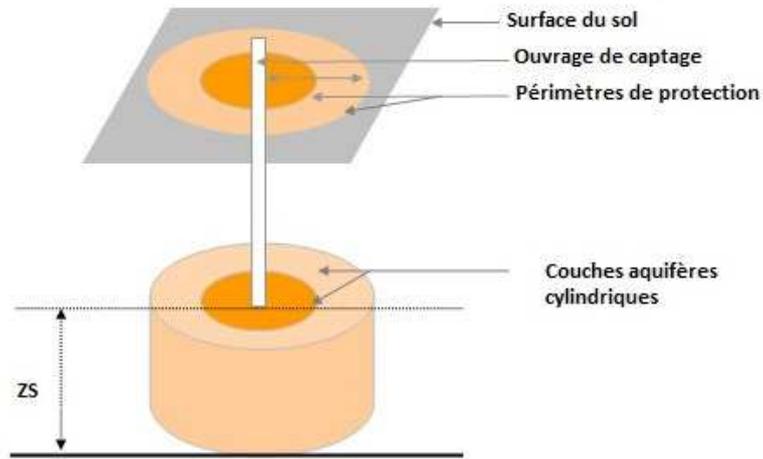


Figure 6 : Couches aquifères cylindriques limitées par les isochrones (Beach, 2001).

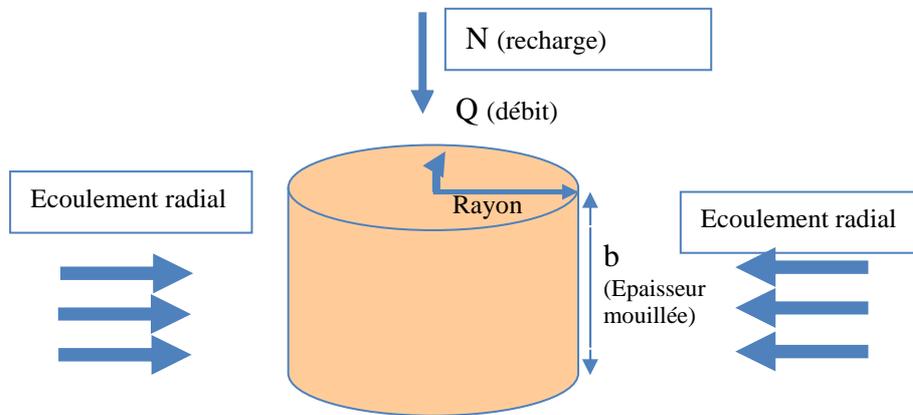


Figure 7 : Equilibre de l'eau pour un écoulement radial vers l'ouvrage dans une couche aquifère cylindrique limité par l'isochrone de temps de transfert t (Kraemer et al., 2005).



Figure 8 : Illustration du périmètre de protection immédiat des ouvrages de captage du District d'Abidjan.

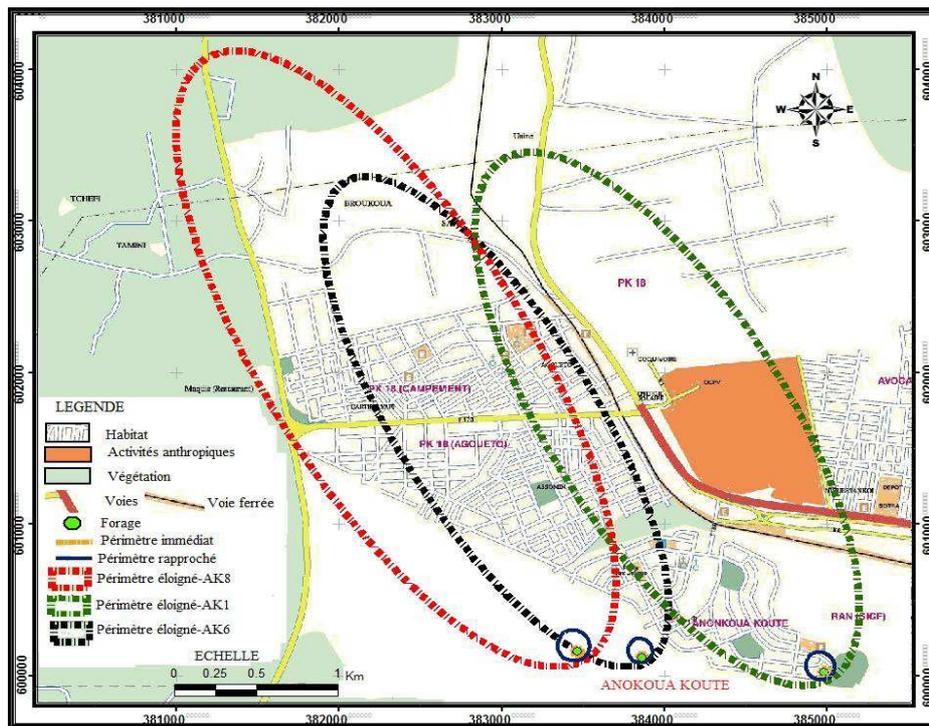


Figure 9 : Périètres de protection des forages d'Anonkoua Kouté.



Figure 10 : Périètres de protection des eaux des forages de Zone Nord.



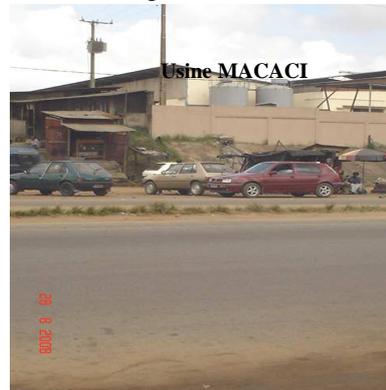
a : Habitations situées à proximité des forages à la Zone Nord.



b : Activités de garage s'exerçant aux alentours des forages de la Zone Nord



c : Dépôt d'ordures et déversement d'huiles usagées à moins de 20 m du forage ZN2



d : Usine MACACI située dans les PPR des forages de Zone Nord

Figure 11 : Illustrations des activités à l'intérieur des périmètres de protection des forages de Zone Nord.

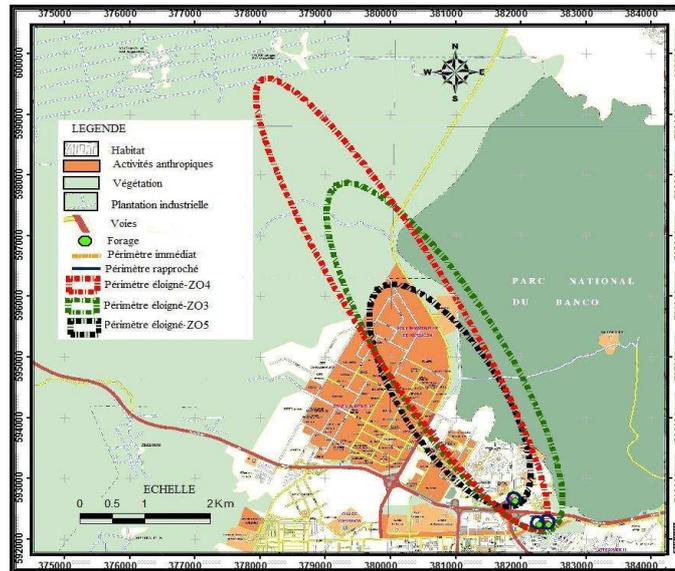
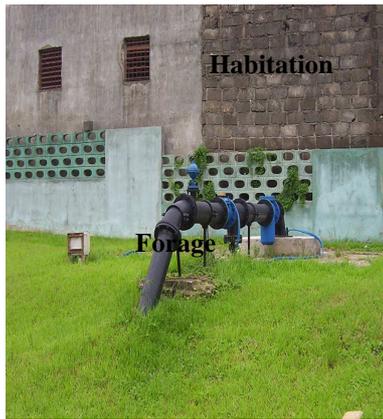


Figure 12 : Carte des périmètres de protection des eaux des forages de Zone Ouest.



a : Habitations dans le périmètre immédiat d'un forage à Zone Ouest.

b : Cimetière situé à proximité du forage ZO9.

Figure 13: Illustrations des activités ou installations à proximité des forages de la Zone Ouest.

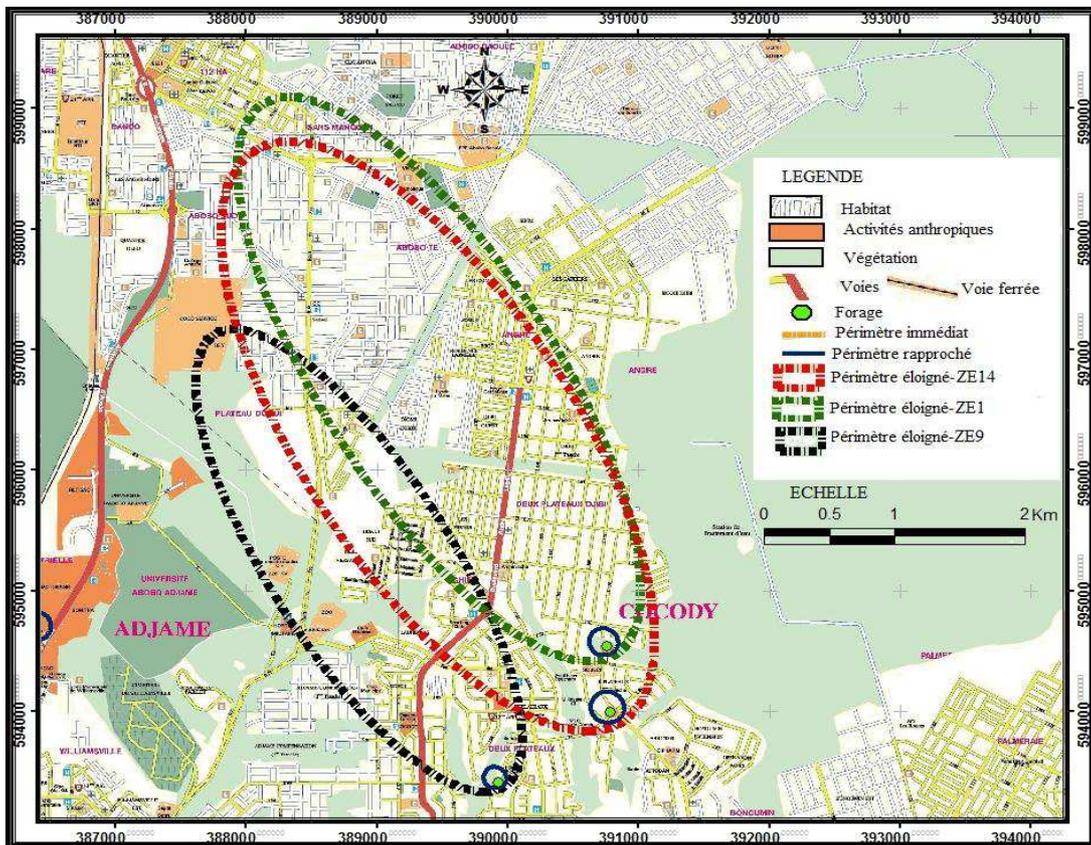


Figure 14 : Carte des périmètres de protection des eaux des forages de Zone Est.



a : Forage situé à proximité d'un quartier précaire à la Zone Est.



b : Type d'habitat au quartier Kobélé près de la Zone Est.



c : Latrines sèches en amont des forages dans les quartiers précaires de la Zone Est.



d : Latrine dans les périmètres rapprochés des forages situés à la Zone Est.

Figure 15 : Illustrations des activités ou installations à proximité des forages de la zone Est.

Tableau 1 : Valeurs minimales utilisées dans la méthode du calcul CFR pour la délimitation des PPI (Krijgsman et Lobo-Ferreira, 2001).

Types d'aquifère	Périmètre immédiat	Périmètre rapproché (t = 50 jours)	Périmètre éloigné (t = 3500 jours)
Type 1	$r = 20 \text{ m}$	$40 \text{ m} \leq r \leq r_1$	$350 \text{ m} \leq r \leq r_1'$
Type 2	$r = 40 \text{ m}$	$60 \text{ m} \leq r \leq r_2$	$500 \text{ m} \leq r \leq r_2'$
Type 3	$r = 30 \text{ m}$	$50 \text{ m} \leq r \leq r_3$	$400 \text{ m} \leq r \leq r_3'$
Type 4	$r = 60 \text{ m}$	$280 \text{ m} \leq r \leq r_4$	$2400 \text{ m} \leq r \leq r_4'$
Type 5	$r = 60 \text{ m}$	$140 \text{ m} \leq r \leq r_5$	$1200 \text{ m} \leq r \leq r_5'$
Type 6	$r = 40 \text{ m}$	$60 \text{ m} \leq r \leq r_6$	$500 \text{ m} \leq r \leq r_6'$

Tableau 2 : Rayons des PPR et des PPE à partir de la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira (2001) et de la méthode d'infiltration.

Champs captants	N° des forages	PPR	PPR	PPE	PPE	Rp (m)
		Rayons amont (m)	Rayons aval (m)	Rayon aval (m)	Rayon amont (m)	
Anonkoua Kouté	AK 6	130	37	40	3628	75
	AK 1	143	49	56	3912	88
	AK 8	152	58	69	4513	98
Zone Nord	ZN 12	162	68	83	4938	108
	ZN 6	172	79	101	5360	119
	ZN 14	173	79	102	5900	119
Adjamé Nord	AN 1	130	38	41	4445	76
	AN 7	172	79	101	4316	119
	AN 8	185	92	124	5606	132
Niangon Nord	NN 2	136	43	47	4569	81
	NN 6	145	52	59	5206	91
	NN 1	173	80	103	6353	120
Zone Ouest	ZO 5	147	54	62	4076	93
	ZO 3	161	68	83	6453	107
	ZO 4	146	53	61	8472	92
Zone Est	ZE 9	139	46	51	4298	85
	ZE 2	163	69	86	5209	109
	ZE 14	180	86	114	5392	126
Nord Riviera	NR 11	155	62	73	4729	101
	NR 14	163	70	86	5709	110
	NR 1	182	89	119	5695	129
Riviera Centre	RC 2	141	48	54	4698	87
	RC 1	145	51	58	5350	90
	RC 3	152	59	69	6165	98

Tableau 3 : Estimation des valeurs des PPR et des PPE par la méthode CFR.

Stations de production	Forages	Débits journaliers ($m^3.j^{-1}$)	Epaisseurs saturées dans le forage (m)	Périmètres rapprochés (m)	Périmètres éloignés (m)
Anonkoua Kouté	AK 6	2388	45,5	470	3922
	AK 1	3051	41,67	555	4632
	AK 8	3905	43,4	615	5135
Zone Nord	ZN 12	4720	43,13	679	5663
	ZN 6	5650	42,63	747	6232
	ZN 14	6229	46,7	749	6252
Adjamé Nord	AN 1	2955	55	475	3968
	AN 7	4573	34,45	747	6237
	AN 8	6579	40,3	829	6917

Niangon Nord	NN 2	3264	52,72	510	4260
	NN 6	4176	53,6	572	4778
	NN 1	6731	50	753	6281
Zone Ouest	ZO 5	3357	41,2	585	4887
	ZO 3	6110	56,45	675	5632
	ZO 4	6836	86	578	4827
Zone Est	ZE 9	3202	47,7	531	4435
	ZE 2	5040	44,92	687	5734
	ZE 14	6043	40,5	792	6613
Nord Riviera	NR 11	4207	43,7	636	5312
	NR 14	5187	46	689	5749
	NR 1	7045	45,25	809	6755
Riviera Centre	RC 2	3600	51,3	543	4535
	RC 1	4530	59,2	567	4736
	RC 3	4937	54,34	618	5160

Tableau 4 : Estimation des superficies équivalentes des PPR et des PPE par la méthode CFR.

Stations de production	Forages	Superficies zones rapprochées (m ²)	Superficies zones éloignés (km ²)
Anonkoua Kouté	AK 6	17578,5	1,2
	AK 1	24523,2	1,7
	AK 8	30136,3	2,1
Zone Nord	ZN 12	36654,0	2,6
	ZN 6	44390,6	3,1
	ZN 14	44674,5	3,1
Adjamé Nord	AN 1	17995,1	1,3
	AN 7	44460,1	3,1
	AN 8	54678,1	3,8
Niangon Nord	NN 2	20736,4	1,4
	NN 6	26094,8	1,8
	NN 1	45088,7	3,1
Zone Ouest	ZO 5	27290,6	1,9
	ZO 3	36252,3	2,5
	ZO 4	26623,3	1,9
Zone Est	ZE 9	22483,4	1,6
	ZE 2	37579,3	2,6
	ZE 14	49975,4	3,5
Nord Riviera	NR 11	32244,0	2,2
	NR 14	37767,4	2,6
	NR 1	52146,0	3,6
Riviera Centre	RC 2	23504,1	1,6
	RC 1	25629,2	1,8
	RC 3	30430,0	2,1

DISCUSSION

La détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines d'Abidjan a été réalisée à partir

de trois méthodes. Il s'agit de la méthode CFR, de la méthode d'infiltration et de celle établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira. Le rayon du PPI a été fixé à 40 m selon la

méthode CFR. Cette valeur est supérieure à celle exigée dans les pays comme la France, l'Allemagne et la Suisse (entre 10 m et 20 m) mais proche de celle appliquée aux Etats-Unis (30 m). Cependant, sur le terrain, les rayons des PPI des ouvrages de captage d'Abidjan varient entre 5 et 20 m. Les études conduites par le BNETD (2008) utilisant la méthode des isochrones par les abaques de Sauty et Thiery (1975) ont permis de prévoir un rayon de délimitation de 30 m. Aussi, le MINEFQ (1995), dans la fixation des limites des périmètres de protection, exige un rayon minimal de 30 m pour la mise en place de ce premier périmètre. Pour les ouvrages de captage d'Abidjan, il est souhaitable d'utiliser un rayon plus important pour garantir une protection plus accrue de l'environnement immédiat ; compte tenu de l'intensification des activités anthropiques et des installations à proximité de ceux-ci (Djémin, 2010). Les rayons de délimitation des PPR déterminés à partir de la méthode CFR n'a pas permis d'obtenir des résultats satisfaisants (75 à 132 m) car des études antérieures conduites par MINEFQ (1995) permettent de prévoir un rayon minimal de 100 m. C'est la raison pour laquelle Krijgsman et Lobo-Ferreira (2001) suggèrent d'optimiser le dimensionnement des périmètres de protection selon la méthode CFR c'est-à-dire en considérant les valeurs optimales de débits et des épaisseurs mouillées. L'utilisation conjointe de la méthode CFR et de la méthode analytique de Krijgsman et Lobo-Ferreira a permis de déterminer des périmètres et des surfaces de protection des forages en tenant compte de l'écoulement souterrain. En amont et en aval des forages, les rayons des PPR varient respectivement de 130 m à 185 m et de 37 m à 92 m avec des surfaces de protection allant de 17578 m² à 54678 m². Pour les PPE, les rayons obtenus varient de 3628 m à 8472 m. Ces rayons sont beaucoup plus importants que ceux obtenus par le BNETD (2008) avec la méthode des abaques de Sauty et Thiery (1975). Le BNETD a trouvé avec ces abaques des périmètres circulaires avec des rayons allant de 100 à 120 m pour les PPR et de 200

à 240 m pour les PPE. Selon Bear et Jacobs (1965), les périmètres de protection rapprochés et éloignés des forages ne seraient être des cercles mais de forme ellipsoïdale du fait de la prise en compte du gradient hydraulique de l'aquifère, de la zone d'appel et de l'aire d'alimentation des ouvrages. Ces différentes valeurs des rayons des périmètres de protection des ouvrages de captage peuvent être prises en compte dans la délimitation des périmètres de protection des forages d'Abidjan. Ces périmètres vont favoriser l'isolement des ouvrages et garantir une meilleure protection contre la pollution de ceux-ci. En effet, cette étude a révélé qu'à Abidjan, le risque majeur encouru par les eaux captées est essentiellement la contamination par les eaux usées. Ces eaux sont collectées dans les fosses septiques, les puits perdus qui sont des systèmes d'assainissement autonomes. Ces systèmes ne sont pas raccordés aux réseaux d'assainissement collectifs de la ville d'Abidjan. Les fosses septiques et puits perdus dans les quartiers précaires situés dans les champs captants sont mal dimensionnées et ne respectent pas les normes internationales entraînant ainsi leur dysfonctionnement. Dans certains cas, ces systèmes sont en général quasi inexistantes. En effet, l'infiltration régulière des eaux usées peut conduire à une pollution directe des ouvrages de captage des eaux souterraines. Par exemple, l'analyse bactériologique réalisée en juillet 2004 sur les eaux brutes du forage ZO6 de la Zone Ouest de Yopougon a donné 909 µg/100 ml de *Escherichia coli* lié probablement à l'infiltration des eaux usées domestiques (Jourda et al., 2006). Aussi, les effluents industriels, les déversements d'hydrocarbures à proximité des ouvrages résultant des activités mécaniques d'automobiles et l'entreposage des ordures ménagères qui conduit à la production de lixiviats, seraient autant de facteurs qui pourraient occasionner la contamination des forages d'Abidjan. Pour les ouvrages de captage des eaux souterraines d'Abidjan, il est alors préférable d'utiliser un rayon plus important pour garantir une protection plus

accrue de l'environnement immédiat à cause de l'intensification des activités anthropiques et des installations à proximité de ceux-ci. Il convient donc de prévoir des périmètres de protection sous forme d'ellipse susceptibles de couvrir la zone fortement influencée par le pompage (PPR) et l'aire d'alimentation (PPE) en vue d'assurer une prévention et une protection adéquates à long terme des eaux souterraines captées.

Conclusion

La détermination des rayons des différents périmètres de protection des ouvrages de captage des eaux souterraines d'Abidjan a été effectuée à partir de l'utilisation conjointe des méthodes CFR, d'infiltration et celle développée par Krijgsman et Lobo-Ferreira. Le rayon du périmètre de protection immédiate des forages déterminée à partir de la méthode CFR est de 40 m. Les périmètres de protection rapprochés et éloignés calculés à partir de la méthode d'infiltration et celle de Krijgsman et Lobo-Ferreira ont une forme d'ellipse à cause de l'écoulement souterrain pris en compte. Les rayons de protection en amont déterminés varient de 130 m à 185 m pour les PPR et de 3628 m à 8472 m pour les PPE tandis que les rayons en aval des forages varient de 40 m à 124 m. Les rayons de protection perpendiculaires à la direction de l'écoulement vont de 75 m à 132 m. Le risque potentiel identifié dans ces périmètres de protection des forages est essentiellement le déversement des eaux usées domestiques issues des fosses septiques, et des puits perdus. En outre, le déversement des eaux usées industrielles et l'entreposage d'ordures ménagères constituent d'importantes sources potentielles de contamination des eaux souterraines. Le constat général est que les forages d'Abidjan se retrouvent aujourd'hui dans un environnement insalubre. Il appartient à l'autorité compétente de prendre des mesures afin d'assainir les champs captants du District d'Abidjan en s'appuyant sur les résultats de cette étude.

REFERENCES

- Aka K. 1991. La sédimentation au quaternaire sur la marge de la Côte d'Ivoire : Essais de modélisation. Thèse de Doctorat d'état ès Sciences Naturelles, Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 233.
- Aghui N, Biémi J. 1984. Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contamination. *Annales de l'Université Nationale de Côte d'Ivoire, série c (Sciences)*, **20**: 331-347.
- Ahoussi KE, Soro N, Kouassi AM, Soro G, Koffi YB, Zade GP. 2010. Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+}) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **4**(5): 1753-1765.
- Beach G. 2001. *Methods for the delineation of wellhead protection areas (WHPAs). Wellhead protection (WHP) Program Guidance Document—Appendix D.* Wyoming Department of Environmental quality. Water Quality Division—Groundwater protection section. Herschler Bldg., 4th floor west, Cheyenne, WY 82002.
- Bear J, Jacobs M. 1965. On the movement of the water bodies injected into aquifers. *Journal of Hydrology*, **3**: 37-57.
- BNETD (Bureau National d'Etude Technique et de Développement) 2008. Impact environnemental et social de la mise en œuvre des périmètres de protection autour des points de captage d'eau souterraine du District d'Abidjan. Champs captants de Niangon Nord, Zone Ouest, Adjamé Nord, Zone Nord et Nord Riviéra. Rapport final, p. 109.
- Bonnet M, Bertone F. 1998. *La Méthode de Retrotrajectoire : un Outil Particulièrement Adopté pour la Définition des Périmètres de Protection d'un Captage.* Fondation Scientifique de la Géologie et de ses Applications : Vandoeuvre lès, France ; 231-236.

- Deh SK, Kouamé KJ, Saley MB, Tanoh KJJ, Anani KA, Signo KH, Jourda JP, Biémi J. 2012. Evaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates (NO₃) des eaux souterraines du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(3): 1390-1408.
- Djémin EJ. 2010. Apport des méthodes analytiques dans la délimitation des périmètres de protection autour des ouvrages de captage des eaux souterraines du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). Mémoire du DEA des sciences de la Terre, Université de Cocody-Abjan, p. 61.
- Garouni EA, Merzouk A. 2004. Approche géomatique pour la délimitation des périmètres de protection des ressources en eau souterraines (champ captant). Laboratoire des Ressources Naturelles et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Fès, Maroc et le Laboratoire des Sciences du Sol, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan, p. 10.
- Hassani MI. 1999. *La réglementation concernant la protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine dans les pays du Maghreb*. Mediterranean Document on groundwater/Med EUDI Groundwater working Group. Laboratoire Eau et Environnement, Dept. de Géologie FSTGAT-Université d'Oran Es-senia, Oran el Mnouer (Algérie), p. 20.
- INS (Institut National de la Statistique). 2001. Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH) 1998. Données socio démographiques et économiques des localités, résultats définitifs par localités, région des lagunes (Côte d'Ivoire), 3(1), p. 43.
- Jourda JP. 1987. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université Scientifique, Technique et Médicale de Grenoble, p. 319.
- Jourda JP, Kouamé KJ, Saley MB, Kouadio BH, Oga YS. 2006. Contamination of the Abidjan aquifer by sewage: An assessment of extent and strategies for protection. In *Groundwater Pollution in Africa*. Edited by Taylor & Francis Yongxin x.ind Breat U: Balkema, Great-Britain; 293-302.
- Krijgsman B, Lobo-Ferreira JP. 2001. A methodology for delineating wellhead protection areas. Vrije universiteit, Amsterdam and LNEC, Lisboa, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil. Informação de hidráulica INCH7, p. 81.
- Karanta G, Martel R, Nastev M, Therrien R, Lefebvre R, Paradis D. 2001. Etude comparative de méthodes de détermination de périmètres de protection autour des ouvrages de captage dans les aquifères de roc fractures. INRS-Géoresources, Centre géoscientifique de Québec, Commission géologique du Canada, Centre géoscientifique et le Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada.
- Kouamé KJ, Jourda JP, Saley MB, Deh SK, Anani AT, Leblanc Y, Cloutier V, Biémi J. 2013. Modeling of Groundwater Flow and Drawdown Evolution Simulation of Abidjan Aquifer (Côte d'Ivoire). *Journal of Asian Scientific Research*, 3(4): 344-364.
- Kraemer SR, Haitjema HM, Kelson VA. 2000. Capture zone delineation for a City wellfield in a valley fill glacial outwash aquifer supporting wellhead protection. Working with WhAEM2000. Office of research and development U.S.Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460, p. 50.
- Lobo-Ferreira JP, Krijgsman B, Feseker. 2004. Models for wellhead protection in regional unconfined aquifers and stratified aquifers. Labo. Nacional de Engenharia Civil Hydraulics and

- Environment Departement, Lisboa, Portugal, Free University Amsterdam, Holland and Departement of Geosciences, University of Bremen, Germany. *Geofisica International*, **43**(4): 651-659.
- MINEFQ (Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec) 1995. *Guide: les Périmètres de Protection autour des Ouvrages de Captage d'eau Souterraine. Direction des Politiques des Secteurs Agricole et Naturel*. Publication du Québec. Sainte-Foy (Québec).
- Paradis D. 2000. Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire Présenté Pour l'obtention du grade de Maître ès sciences, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, INRs-Géoressources, p. 262.
- Sauty, Thiery. 1975. Utilisation d'abaques pour la détermination des périmètres de protection. BRGM 75 SGN 430 AME.
- Soro N, Ouattara L, Dongo K, Kouadio KE, Ahoussi KE, Soro G, Oga MS, Savané I, Biémi J. 2010. Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **4**(2): 364-384.
- Verreault M. 2003. Etude méthodologique pour l'estimation de l'aire d'alimentation de captage d'eau souterraine en milieu complexe. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi, Maîtrise en sciences de la terre, p. 144.