



Journal Homepage: - [www.journalijar.com](http://www.journalijar.com)

## INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI: 10.21474/IJAR01/15700

DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/15700>



### RESEARCH ARTICLE

#### OUVRAGES DE CAPTAGE D'EAU ET PERIMETRES DE PROTECTION: CAS DES NOUVEAUX CHAMPS CAPTANTS DE DJIBI ET DE NIANGON NORD II A ABIDJAN (CÔTE D'IVOIRE)

EBA Anowa Evrade Larissa<sup>1\*</sup>, DEH Serge Kouakou<sup>1</sup>, AKE Gabriel Etienne<sup>1</sup>, KONAN Eugène<sup>1</sup>, BALLIET René<sup>1</sup>, KOUAME Kan Jean<sup>1,2</sup> and JOURDA Jean Patrice<sup>1,2</sup>

1. Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG).
2. Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT).

#### Manuscript Info

##### Manuscript History

Received: 15 September 2022

Final Accepted: 19 October 2022

Published: November 2022

##### Key words:-

Catchment Structure, Protection  
Perimeter, Abidjan, Groundwater, Côte  
D'Ivoire

#### Abstract

To strengthen the drinking water supply capacity of Abidjan city, the State has built water catchment structures in the communes of Cocody-Angre and Yopougon-Niangon Northern-2. However, in the proximity of these structures, there are several human activities that constitute major sources of pollution. It is therefore necessary to implement a strategy to protect this resource. Thus, this study aims to determine the close (PPR) and distant (PPE) protection perimeters around these catchment structures. The analytical methods of Krijgsman and Lobo-Ferreira and Wyssling were used to determine the protection perimeters. For the PPR, the values obtained with the Krijgsman and Lobo-Ferreira method vary from 118 to 155 m for the upstream radius and 42 to 79 m for downstream radius. While those obtained with Wyssling vary from 107 to 144 m for upstream radius, and 50 to 87m for downstream radius. At the level of the PPE, the results vary from 1,128 to 1,721 m for upstream radius and 47 to 109 m for downstream radius according to the Krijgsman and Lobo-Ferreira method. Those calculated with the Wyssling method varying from 4,084 to 4,199 m for upstream radius and 93 to 207 m for downstream radius. Concerning the radius perpendicular to the flow direction at the borehole, it varies from 74 to 112 m for PPR and PPE with Krijgsman's and Lobo-Ferreira's methods. While Wyssling's method gives 74 to 112 m for the PPR and 615 to 933 m for the PPE respectively. The Wyssling method therefore better evaluates the radii of the protection perimeters of Abidjan groundwater catchment structures.

Copy Right, IJAR, 2022,. All rights reserved.

#### Introduction:-

La croissance démographique et le développement économique dans toutes les régions du monde, ces dernières années ont un impact sur la qualité et la quantité d'eau disponible pour la consommation. Ainsi, comme toutes les grandes villes d'Afrique, le District d'Abidjan, principal centre urbain et économique ivoirien n'est pas en marge de cette réalité mondiale. En effet, selon l'Institut National de la Statistique (INS, 2021), la population du District d'Abidjan estimée à 4 707 404 d'habitants en 2014 est passée à 6 321 017 en 2021 avec un taux d'accroissement

**Corresponding Author:- EBA Anowa Evrade Larissa**

Address:- Université Félix Houphouët Boigny, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG).

annuel de 4,5%. Cette croissance démographique rapide et le développement économique que connaît le District, engendrent de nombreuses activités anthropiques urbaines. Ces activités, qu'elles soient agricoles, industrielles ou commerciales peuvent contribuer à la dégradation des eaux souterraines (G. Karanta et al., 2001).

Le District d'Abidjan est alimentée par les eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal, dont l'exploitation représente 68% de la production d'eau potable nationale (DHH, 2001). Cependant, cette principale source d'approvisionnement en eau potable est sujette à d'éventuelles menaces de contamination (Kouamé, 2017). De nombreuses études menées par Jourda et al. (2006) ; Kouamé (2007); Dongo et al. (2008) etc., ont montré une surexploitation et une potentielle pollution de cette ressource. D'ailleurs, certains forages ont été abandonnés dans le district à cause de la concentration en nitrates qui était supérieure à 100 mg.L<sup>-1</sup> (Jourda et al., 2006) . Il convient donc de prendre des dispositions pour garantir à long terme une production d'eau de bonne qualité, et mettre en place des stratégies de gestion de ces eaux souterraines.

Ainsi, la prévention de la contamination est une option essentielle qui requiert à l'échelle locale, une connaissance adéquate du système d'écoulement de l'eau souterraine et ensuite l'établissement des périmètres de protection à l'intérieur desquels les sources de pollutions sont gérées (G. Karanta, 2002). Selon le MEF-CI (1998), le périmètre de protection définit un territoire comprenant la surface et le sous-sol autour d'un ouvrage de captage à travers lequel des contaminants peuvent migrer et atteindre l'eau souterraine pompée par captage. La loi n° 98-755 du 23 Décembre 1998 portant code de l'Eau en Côte d'Ivoire définit trois types de périmètres de protection : le périmètre de protection immédiat, le périmètre de protection rapproché et le périmètre de protection éloignée

Le dimensionnement de ceux-ci peut être effectué à partir de méthodes analytiques ou graphiques qui tiennent compte des conditions géologiques, hydrogéologiques du système aquifère et surtout des temps de transfert correspondant à la protection bactérienne et virale ainsi qu'aux polluants persistants (Bonnet et Bertone, 1998; G. Karanta, 2002). C'est à cette fin que cette étude a été entreprise. Elle vise à déterminer des périmètres de protection autour des nouveaux forages des champs captant de la Djibi et de Niangon Nord 2 réalisés sur la nappe du Continental Terminal.

### Cadre General De La Zone D'étude

Situé au Sud de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°10' et 5°38' Nord et les longitudes 3°45' et 4°21' Ouest, le District d'Abidjan s'étend sur une superficie de 2119 km<sup>2</sup> et regroupe les dix (10) communes d'Abidjan et trois (3) sous-préfectures que sont Anyama au Nord, Bingerville à l'Est et Songon du côté Ouest (Figure 1).

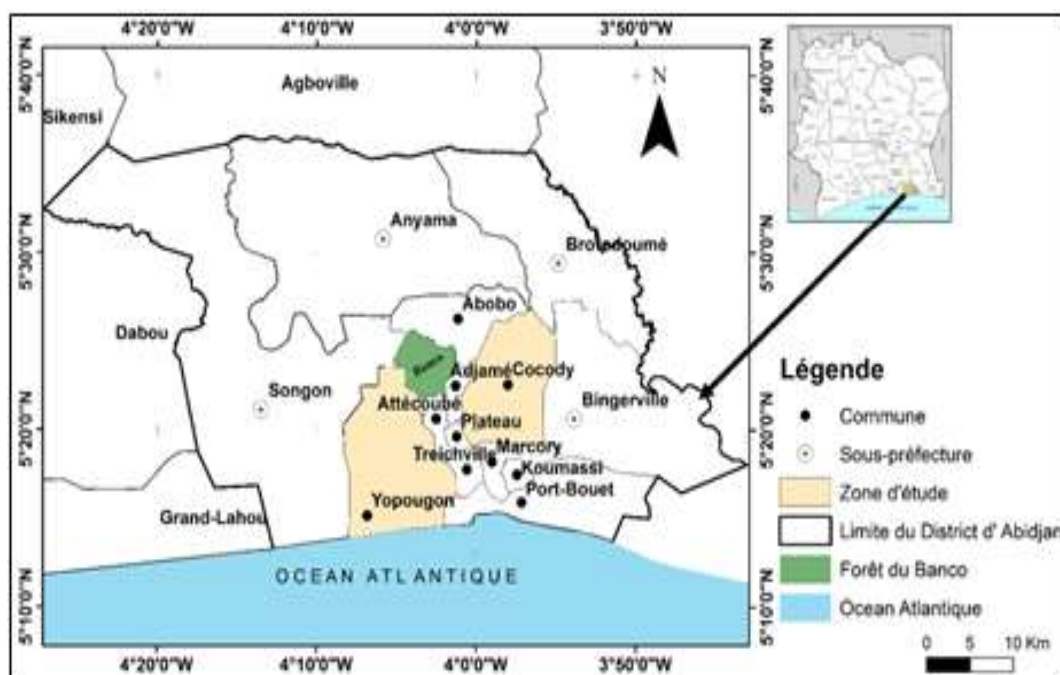


Figure 1:- Localisation de la zone d'étude.

Sur le plan géologique, la zone d'étude appartient au bassin sédimentaire côtier composé de formations post-Eburnéennes dont quelques-unes abritent la nappe du Continental Terminal.

Cette nappe présente d'énormes potentialités en eaux souterraines (Jourda, 1987). Ces ressources sont essentiellement contenues dans trois niveaux d'aquifères d'inégales importances dont seul l'aquifère du Continental Terminal est le plus exploité et constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable de la population du District (Aghui et Biémi, 1984). Le captage se fait exclusivement à partir des forages de prélèvement regroupés en champs captants qui sont inégalement répartis dans la ville. Depuis 2010, de nouvelles réalisations de forages ont augmenté le nombre des forages en exploitation à 110 (ONEP, 2015). Ces forages sont répartis en 13 principaux champs captants (SODECI, 2015). Les nouveaux champs captant misent en exploitation après 2010 sont répartis dans le tableau 1.

**Tableau 1:- Répartition des forages par nouveaux champs captants dans le District d'Abidjan.**

Champs captants (nouveaux)	Nombre de forages
Djibi	7
Niangon Nord II	12
Songon	15
Total	34

La région est sous l'influence d'un climat de type équatorial marqué par quatre saisons. A la station d'Abidjan-Aéroport la moyenne interannuelle de la pluviométrie observée sur 64 ans (1937-2000) est de 1920 mm (Soro et al., 2006) et une température moyenne de 25°C.

Les risques inhérents à la pollution des ressources en eau sont en grande partie tributaires des activités humaines à la surface du sol qui engendrent essentiellement les rejets des eaux usées issues des ménages pour la plupart et des dépôts sauvages d'ordures ménagères à travers le District d'Abidjan. En effet, les différents quartiers de la ville d'Abidjan ne disposent pas tous de dispositifs adéquats d'évacuation des eaux usées. Le système d'assainissement de la ville présente beaucoup de lacunes, le taux de raccordement des ménages au réseau d'assainissement est faible (29%). A cela s'ajoute le dysfonctionnement et la dégradation de la quasi-totalité des ouvrages d'assainissement de la ville entraînant le rejet des eaux usées hors des systèmes d'égout. Par ailleurs seulement 55% de la production des ordures ménagères de la ville sont évacués chaque année (BNETD, 2008). Les déchets non collectés (45%) se retrouvent directement dans la nature entraînant un risque certain de pollution de la qualité des eaux souterraines de la ville. De nombreux foyers de pollution sont détectés un peu partout dans la ville autour des champs exploités par la SODECI.

## Matériel et Methode:-

### Données de l'étude

Plusieurs types de données ont été utilisés. Ce sont:

- les données hydrodynamiques de la nappe du Continental Terminal issues d'anciens travaux (Aghui et Biémi, 1984; Jourda, 1987). Il s'agit de: la porosité (15%), la conductivité hydraulique (de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$  m.s<sup>-1</sup>), le gradient hydraulique (oscille de 0,17% à 0,19%) et la recharge de la nappe du Continental Terminal du District d'Abidjan est estimée à 0,2477 m/an (Kouamé et al., 2013);
- les données de débits (varient de 3600 à 6240 m.j<sup>-1</sup>) et de piézométrie (épaisseurs mouillées comprises entre 48 m et 83 m) recueillies auprès de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) et de la Société de Distribution d'Eau en Côte d'Ivoire (SODECI);
- la carte du plan d'aménagement (ou le plan guide) au 1/25 000 du District d'Abidjan acquise auprès du Bureau National d'Etudes Technique et de Développement (BNETD). Elle a servi de fonds pour le positionnement des forages et la représentation des périmètres de protection ;
- le logiciel ArcGis 10.5 a été utilisé pour le traitement des données.

### Approche méthodologique

Il existe plusieurs méthodes de détermination des périmètres de protection. Elles varient de simples d'application à des méthodes très complexes. De façon générale, plus la méthode permet l'intégration des caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques du milieu, plus elle est précise (Paradi, 2000). Ainsi, trois méthodes ont été utilisées dans le cadre de cette étude : la méthode du CFR pour la détermination des PPI et respectivement les méthodes de Krijgsman et de Lobo-Ferreira (2001) ainsi que Wyssling (1979) pour les PPR et PPE.

### Détermination des PPI (méthode CFR)

La méthode de CFR prend en compte deux paramètres fondamentaux : la distance et le temps de transfert (Kraemer et al., 2005). Elle est dite méthode de calcul du rayon fixe parce que le secteur qu'elle 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 sont considérés (Krijgsman et Lobo-Ferreira, 2001) parmi lesquels le type 2 (système aquifère poreux non confiné ou nappe libre) correspond aux caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'étude. En effet, le rayon des PPI des ouvrages est conforme au rayon du système aquifère de type 2 (Tableau II).

### Détermination des PPR et PPE (Krijgsman, Lobo-Ferreira et infiltration)

#### Méthode des périmètres de protection rapprochée (PPR)

La méthode établie par Krijgsman et Lobo-Ferreira permet d'estimer les rayons de délimitation des périmètres de protection rapprochée qui doivent couvrir la zone d'appel des ouvrages pour un temps de parcours de 50 jours. Elle est basée sur les relations analytiques développées par Kreidler et Senger et modifiées par Bear et Jacobs (1965). Cette équation analytique établie pour la détermination du temps de transfert des eaux souterraines vers l'ouvrage de captage est la suivante :

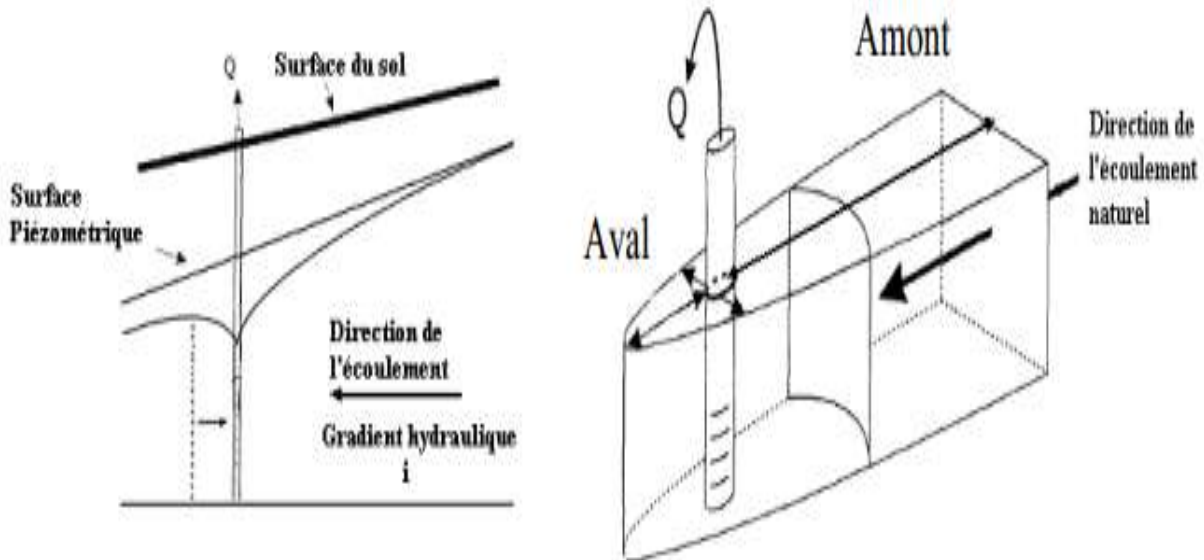
$$t_x = \frac{n}{K_i} \left[ r_x - \left( \frac{Q}{2\pi K b i} \right) \ln \left\{ 1 + \left( \frac{2\pi K b i}{Q} \right) \cdot r_x \right\} \right] \quad (1)$$

Avec :  $t_x$ : temps de transfert (j) ;  $Q$  : débit de pompage ( $m^3/j$ ) ;  $b$  : épaisseur de l'aquifère (m) ;

$n$  : porosité de l'aquifère ;  $i$  : gradient hydraulique ;  $K$  : conductivité hydraulique ( $m/j$ ) ;

$r_x$ : rayon délimitant une surface suivant l'isochrone de temps de transfert  $t_x$  (m).

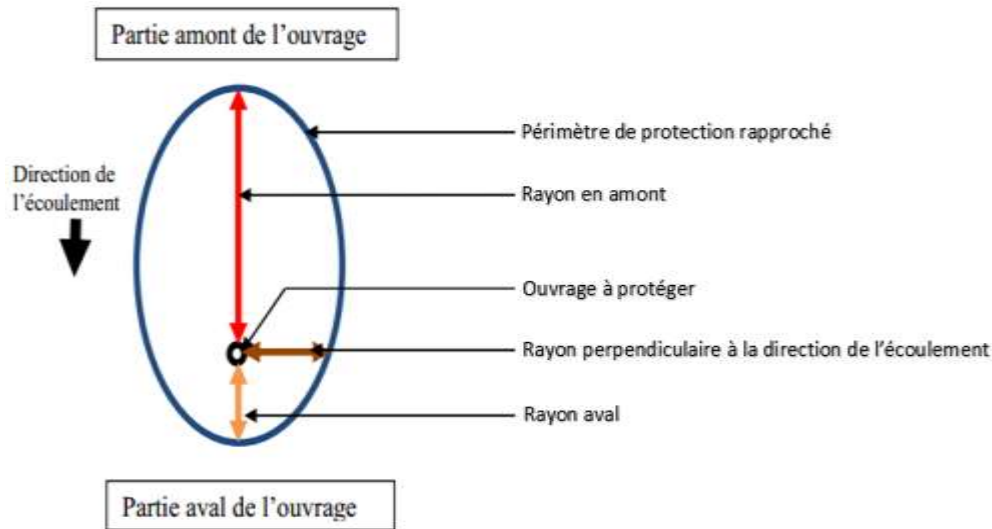
Cette méthode considère uniquement de l'écoulement horizontal régional vers l'ouvrage de captage (Bear et Jacobs, 1965). Ainsi, la zone à protéger en priorité contre la pollution due à une activité, se situe en amont du captage (Garouani et Merzouk, 2004). En effet, à cause de l'écoulement régional naturel, il arrive qu'une partie de la zone d'influence du côté aval ne fasse pas partir de la zone d'appel (figure 2).



**Figure 2:-** Illustration de la zone d'appel et de la surface normale à l'écoulement souterrain naturel (Bear et Jacobs, 1965).

Le périmètre de protection rapprochée prend alors la forme d'une ellipse caractérisée par trois distances de protection (Verreault, 2003). (figure 3):

1. la distance de protection dans la partie amont de l'ouvrage ou rayon amont ( $r_{\text{amont}}$ ) ;
2. la distance de protection dans la partie aval de l'ouvrage ou rayon aval ( $r_{\text{aval}}$ ) ;
3. la distance de protection perpendiculaire à la direction de l'écoulement ( $r_p$ ).



**Figure 3:-** Illustration des PPR selon la méthode analytique de Krijgsman et Lobo- Ferreira.

Pour déterminer ces distances en fonction du temps, l'équation 1 a été simplifiée par Bear et Jacobs (1965), ce qui donne l'équation suivante :

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

Où  $A = \frac{n}{K_i} \quad (3)$

et  $F = \frac{2\pi K_i b_i}{Q} \quad (4)$

Les solutions analytiques de l'équation 2 exprimées respectivement par les équations 5 et 6 correspondent aux rayons du périmètre de protection rapprochée dans les parties amont et aval de l'ouvrage de captage.

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

$$r_{\text{aval}} = \frac{0,042x^3 + 0,37x^2 + 1,04x}{F} \quad (6)$$

avec  $X = \sqrt{\frac{2Ft}{A}} \quad (7)$

Pour représenter ces rayons, on considère un repère orthonormé (x, y) dans lequel le forage est un point de coordonnées (x=0, y=0) situé à l'intersection des deux axes du repère. La direction d'écoulement des eaux souterraines est représentée suivant l'axe des ordonnées (y) du repère et coïncide avec les rayons subséquents. La valeur calculée de X à partir de l'équation 7 reste positive en amont du captage et devient négative en aval du captage. Ainsi, le rayon aval se détermine à partir de -X, alors l'équation (6) devient :

$$r_{\text{aval}} = \frac{0,042(-x)^3 + 0,37(-x)^2 + 1,04(-x)}{F} \quad (8)$$

$$r_{\text{aval}} = \frac{-0,042x^3 + 0,37x^2 - 1,04x}{F} \quad (9)$$

Pour un temps de transfert de 50 jours, le rayon de protection perpendiculaire à la direction de l'écoulement à la hauteur du forage est déterminé à partir de l'équation 10 :

$$r_p = 4 \sqrt{\frac{Q}{nb}} \quad (10)$$

### Détermination des périmètres de protection éloignée (PPE)

L'estimation du rayon amont du PPE a nécessité de combiner à la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira celle de l'infiltration. La méthode d'infiltration 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 forage à protéger. Dans le cas d'un forage unique, la zone de recharge est assimilée à un cercle de superficie A et de rayon R.

$$A = \frac{Q}{I} \quad (11)$$

Et  $R_{\text{amont}} = \sqrt{\frac{Q}{\pi I}} \quad (12)$

Avec :

A: surface du cercle ( $m^2$ ) équivalente à l'aire de recharge de la nappe ( $= \pi R^2$ ) ;

$R_{\text{amont}}$ : 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.

Le rayon aval du PPE a été déterminé par l'inverse de l'équation 4 :

$$R_{\text{aval}} = \frac{Q}{2\pi Kbi} \quad (13)$$

### Méthode de Wyssling

Cette méthode sert à délimiter les zones de protection autour des captages des eaux souterraines. Elle consiste en effet, à calculer directement la durée d'écoulement des eaux souterraines à partir d'un point quelconque situé sur l'axe d'écoulement jusqu'au captage. Ainsi, elle délimite les isochrones nécessaires pour la définition des périmètres de protection. Les conditions d'application de la méthode supposent que l'aquifère est homogène et illimité avec des hypothèses suivantes :

1. l'aquifère peut être assimilé à un milieu poreux infini (pas d'influence de conditions aux limites sur le pompage) ;
2. l'ouvrage capte toute l'épaisseur saturée de l'aquifère ;
3. la couche formant la base de l'aquifère est parfaitement imperméable ;
4. l'écoulement général de la nappe est unidirectionnel ;
5. le régime permanent est supposé atteint,
6. le débit prélevé (Q) est nettement inférieur au débit total de la nappe d'eau souterraine.

Pour appliquer la formule de Wyssling, il faut au préalable connaître les valeurs des paramètres suivants :

- K : Perméabilité de l'aquifère (ou la conductivité hydraulique) ;
- b : Epaisseur de l'aquifère saturé ;
- i : Gradient hydraulique de l'écoulement à l'amont de l'ouvrage (il s'agit du gradient initial, c'est-à-dire avant l'installation de la pompe) ;
- $n_e$ : Porosité efficace de l'aquifère ;
- Q : Débit de pompage dans l'ouvrage.

### Détermination des périmètres de protection rapprochée et éloignée

L'application de la méthode permet d'estimer les rayons de délimitation des périmètres de protection rapprochée qui doivent couvrir la zone d'appel des ouvrages pour un temps de transfert de 50 jours (isochrone de 50 j). La forme de la zone de contribution est une parabole qui s'étend sur une distance  $X_0$ , en aval du captage, A la hauteur du captage, le périmètre atteint une largeur  $B'$ . Vers l'amont, la parabole atteint une largeur maximale de B. Les différentes dimensions sont déterminées par les équations suivantes :

$$B = \frac{Q}{K.b.i} \quad (B : \text{largeur du front d'appel en amont du captage}) \quad (14)$$

$$X_0 = \frac{B}{2i} \quad \text{équivalent à} \quad X_0 = \frac{Q}{2iK.b.i} \quad (X_0 : \text{distance en aval du captage}) \quad (15)$$

La distance  $X_0$  de l'équation 16 est proportionnelle à l'inverse de F de l'équation 4. Elle correspond au rayon aval du périmètre de protection éloignée considéré dans la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira.

$$B' = \frac{B}{2} \quad (B' = \text{Largeur du front d'appel à hauteur du forage}) \quad (16)$$

Lorsque la zone d'appel et la direction de l'écoulement sont déterminées, le calcul de la distance correspondant à un temps de parcours des eaux souterraines vers le captage se fait par les formules suivantes :

$$S_0 = \frac{V.t + \sqrt{(V.t(V.t + 8X_0))}}{2} \quad (17)$$

$$Su = \frac{-V.t + \sqrt{(V.t(V.t + 8X_0))}}{2} \quad (18)$$

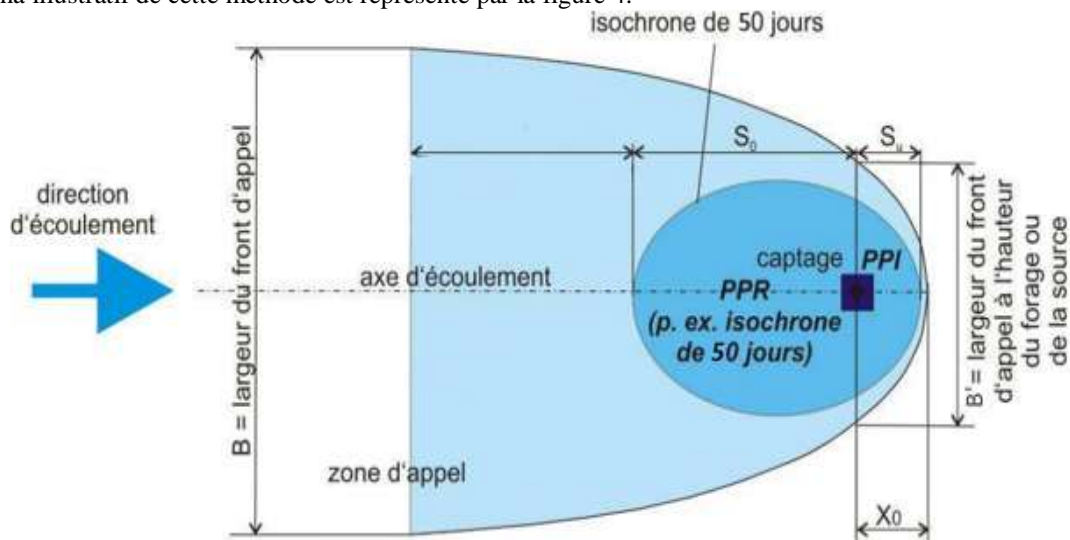
Avec  $V = \frac{K.i}{n}$  ( t=50jours pour les PPR et t= 3500jours pour les PPE)

- K : Perméabilité de l'aquifère en (m/j) ;
- n: Porosité efficace de l'aquifère ;
- b : Epaisseur de l'aquifère saturé (m) ;
- Q : Débit de pompage dans l'ouvrage ( $m^3/j$ ) ;
- i : Gradient hydraulique de l'écoulement régional en l'amont des ouvrages ;
- $S_0$  : Distance en amont sur l'axe d'écoulement pour l'isochrone de temps (m) ;
- Su : Distance en aval sur l'axe d'écoulement pour l'isochrone de temps (m) ;



-  $V$  : la vitesse effective d'écoulement (ou de transfert) de l'eau souterraine (m/j).

Le schéma illustratif de cette méthode est représenté par la figure 4.



**Figure 4:-** Schéma d'écoulement avec les grandeurs estimées par la formule de Wyssling et dimensionnement des périmètres de protection (Wyssling, 1979).

Représentation des périmètres de protection rapprochée et éloignée

Une fois que les grandeurs  $B$ ,  $X_0$ ,  $b$ ,  $S_0$  et  $S_u$  sont connues, il faut dessiner les périmètres de protection. Le PPR, qui est défini comme l'isochrone de 50 jours, aura une forme ellipsoïdale. Le PPE prendra une forme parabolique avec une longueur du grand axe équivalente à  $X_0 + 2.S_0$ .

- Longueur de l'ellipse ( $Lo$ ) qui représente l'isochrone calculé est :

$$Lo = 2a \text{ avec } a = \frac{(S_0 + S_u)}{2} \text{ ce qui revient à } Lo = 2 \frac{(S_0 + S_u)}{2} \quad (19)$$

$a$  représente la moitié de la longueur  $Lo$

- Largeur de l'ellipse ( $La$ ) qui représente l'isochrone calculé est :

$$La = 2\sqrt{a^2 - (a - S_u)^2} \quad (20)$$

- La distance de protection perpendiculaire ( $Dp$ ) à la direction de l'écoulement à la hauteur du forage est déterminée à partir de l'équation 21, pour un temps de parcours considéré.

$$Dp = \sqrt{a^2 - (a - S_u)^2} \quad (21)$$

• Estimation des périmètres et des surfaces de protection correspondantes

Les périmètres et les surfaces de protection en forme d'ellipse sont déterminés à partir des formules suivantes :

- Aire d'une ellipse se calcul par l'équation suivante :

$$A = \Pi.a.b \quad (22)$$

- Périmètre d'une ellipse :

$$P = 2.\Pi \left( \frac{\frac{3}{2}a^2 + \frac{3}{2}b^2}{2} \right)^{2/3} \quad (23)$$

Avec :  $A$  : aire d'une ellipse ( $m^2$ ) ;

$P$  : périmètre d'une ellipse ( $m$ ) ;

$a$  : demi-grand axe de l'ellipse ( $m$ ) (correspond à la moitié de la longueur ( $Lo$ ) de l'ellipse) ;

$b$  : demi-petit axe de l'ellipse ( $m$ ) (représente la distance perpendiculaire à la direction de l'écoulement souterrain en haut de l'ouvrage de captage).

## Resultats:-

Rayons des périmètres de protection

Périmètre de Protection Immédiat (PPI)

La nappe du Continental Terminal est généralement libre au niveau du District d'Abidjan. Ce système d'aquifère correspond au type 2 selon la méthode CFR. Les ouvrages captant les eaux souterraines de cette nappe doivent bénéficier d'un PPI de rayon fixé à 40 m (Tableau II).

**Tableau II:-** Valeurs minimales des rayons fixés dans la méthode du 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	$r = 40 \text{ m}$	$60 \text{ m} \leq r \leq r_6$	$500 \text{ m} \leq r \leq r_6'$

Cependant, le terrain a permis de constater que les forages visités ont des rayons de PPI inférieurs à 40 m. Les rayons sont compris généralement entre 5 et 30 m (Figure 5).



**Figure 5:-** Illustration du périmètre de protection immédiate (clôture en vert) du forage n°7 de Djibi.

#### Rayons des périmètres de protection rapprochée (PPR) et éloignée (PPE)

##### Krijgsman et Lobo-Ferreira et d'infiltration

Les rayons des PPR et des PPE des forages des champs captants de Niangon Nord2 et de Djibi déterminés sont consignés dans le tableau III.

**Tableau III:-** Rayons des PPR et PPE des forages à partir de la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira et d'infiltration

Champs Captants	N° des Forages	PPR (m)		Rayons perpendiculaires (m)	PPE (m)	
		Rayons amont (m)	Rayons aval (m)		Rayons amont (m)	Rayons aval (m)
Niangon Nord 2	NN1	127	50	83	1501	60
	NN2	130	53	86	1501	64
	NN3	126	49	82	1384	58
	NN4	130	54	86	1501	65
	NN5	133	57	89	1538	70
	NN6	134	58	90	1644	71



	<b>NN7</b>	118	42	74	1300	47
	<b>NN8</b>	135	58	91	1644	72
	<b>NN9</b>	129	53	85	1574	63
	<b>NN10</b>	133	57	89	1678	70
	<b>NN11</b>	134	57	90	1711	71
	<b>NN12</b>	131	54	87	1574	66
	<b>Djibi</b>					
	<b>D1</b>	139	62	95	1128	78
	<b>D2</b>	153	76	109	1637	104
	<b>D3</b>	155	79	112	1668	109
	<b>D4</b>	149	72	105	1721	97
	<b>D5</b>	151	75	108	1623	101
	<b>D6</b>	150	74	107	1603	99
	<b>D7</b>	139	63	96	1416	80

Les rayons déterminés varient respectivement :

1. de 118 à 135 m et de 139 à 155 m pour les rayons amont des PPR ;
2. de 42 à 58 m et de 62 à 79 m pour les rayons aval des PPR ;
3. de 1300 à 1711 m et de 1128 à 1721 m pour les rayons amont des PPE ;
4. de 47 à 72 m et de 78 à 109 m pour les rayons aval des PPE ;
5. de 74 à 91 m et de 95 à 112 m pour les rayons perpendiculaires (Rp à la direction de l'écoulement en haut du forage des PPR et PPE

Les rayons aval des PPR et des PPE des ouvrages de captage sont plus ou moins proches. Les plus faibles distances s'observent au niveau des forages de Niangon Nord 2 (NN7 et NN3). Quant aux valeurs les plus élevées, elles sont observées au niveau des forages D4, D6, D5, D2 et D3 du champ captant de Djibi.

### Wyssling

Avant la détermination des rayons des différents PP, Wyssling préconise la détermination d'abord de la dimension de l'aire d'alimentation de chaque forage en donnant la largeur du front d'appel en amont (B), à la hauteur du forage (B') et la distance en aval ( $X_0$ ) des ouvrages de captage (Tableau IV).

**Tableau IV:-** Dimensions de l'aire d'alimentation des forages des champs captants de Niangon Nord 2 et de Djibi.

Champs captants	N° des forages	B (m)	$X_0$ (m)	B' (m)
<b>Niangon Nord 2</b>	<b>NN1</b>	374	60	187
	<b>NN2</b>	402	64	201
	<b>NN3</b>	365	58	183
	<b>NN4</b>	413	66	207
	<b>NN5</b>	438	70	219
	<b>NN6</b>	447	71	224
	<b>NN7</b>	297	47	149
	<b>NN8</b>	453	72	226
	<b>NN9</b>	397	63	199
	<b>NN10</b>	436	70	218
	<b>NN11</b>	443	71	222
	<b>NN12</b>	415	66	208
<b>Djibi</b>	<b>D1</b>	493	78	246
	<b>D2</b>	653	104	326
	<b>D3</b>	684	109	342
	<b>D4</b>	606	97	303
	<b>D5</b>	636	101	318
	<b>D6</b>	622	99	311
	<b>D7</b>	499	80	250

L'analyse montre que B varie de 297 à 684 m ;  $X_0$  de 47 à 109 m et B' de 149 à 326 m. les valeurs au niveau de Niangon Nord 2 sont très faibles que celles de Djibi.

Pour ce qui concerne les rayons des PPR et PPE, ils sont représentés dans le tableau ci-dessous

**Tableau V:-** Rayons des PPR et des PPE des forages par la méthode de Wyssling.

N° des Forages	PPR (m)			PPE (m)		
	Distances amont (m)	Distances aval (m)	Distances perpendiculaire (m)	Distances amont (m)	Distances aval (m)	Distances perpendiculaires (m)
NN1	116	59	83	4107	116	689
NN2	119	62	86	4116	124	715
NN3	115	58	82	4105	113	681
NN4	120	63	87	4119	128	725
NN5	122	65	89	4127	135	746
NN6	123	66	90	4129	138	754
NN7	107	50	74	4084	93	615
NN8	124	67	91	4131	139	759
NN9	118	61	85	4114	123	711
NN10	122	65	89	4126	135	745
NN11	113	66	90	4128	137	751
NN12	120	63	87	4120	128	727
D1	127	70	95	4143	151	791
D2	141	84	109	4190	198	911
D3	144	87	112	4199	207	933
D4	137	80	105	4176	185	878
D5	140	83	108	4185	193	899
D6	139	82	106	4181	189	810
D7	128	71	95	4145	153	797

L'analyse des PP déterminés par la méthode de Wyssling varient respectivement :

1. de 107 à 124 m et de 127 à 144 m pour les distances amont des PPR ;
2. de 50 à 67 m et de 70 à 87 m pour les distances aval des PPR ;
3. de 74 à 91 m et de 95 à 112 m pour les distances perpendiculaires des PPR ;
4. de 4084 à 4131 m et de 4143 à 4199 m pour les distances amont des PPE ;
5. de 93 à 139 m et de 151 à 207 m pour les distances aval des PPE ;
6. de 615 à 759 m et de 791 à 933 m pour les distances perpendiculaires des PPE.

#### Périmètres et surfaces de protection

##### Périmètres de Protection

Krijgsman et Lobo-Ferreira

Le tableau VI illustre les périmètres de protection des forages de Niangon Nord 2 et de Djibi.

**Tableau VI:-** Estimation des valeurs des forages par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira.

Champs captants	N° des forages	Périmètre rapproché (m)	Périmètre éloigné (m)
Niangon Nord 2	NN1	514	2967
	NN2	532	2978
	NN3	508	2750
	NN4	536	2981
	NN5	554	3061
	NN6	559	3258
	NN7	462	2568
	NN8	562	3260
	NN9	529	3110
	NN10	553	3315
	NN11	557	3378
	NN12	540	3117
	D1	585	3213

<b>Djibi</b>	<b>D2</b>	670	3328
	<b>D3</b>	685	3334
	<b>D4</b>	646	3278
	<b>D5</b>	661	3296
	<b>D6</b>	655	3253
	<b>D7</b>	589	2865

A partir de la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira, les périmètres obtenus varient de 462 à 685 m pour les PPR et de 2568 à 3378 m pour les PPE.

Les périmètres les plus faibles (462 m et 2568 m) sont observés au niveau du forage NN7. Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau des forages D4(646), D6 (655), D5 (661), D2(670) et D3 (685) pour les périmètres rapprochés et NN10 (3315), D2 (3328), D3 (3334) et NN11 (3378) pour les périmètres éloignés.

### Wyssling

Le tableau VII présente les mesures des périmètres de protection des forages par la méthode de Wyssling

**Tableau VII:-** Estimation des périmètres de protection des forages par la méthode de Wyssling.

<b>Champs captants</b>	<b>N° des forages</b>	<b>Périmètre rapproché (m)</b>	<b>Périmètre éloigné (m)</b>
<b>Niangon Nord 2</b>	<b>NN1</b>	510	8703
	<b>NN2</b>	527	8782
	<b>NN3</b>	504	8678
	<b>NN4</b>	534	8813
	<b>NN5</b>	549	8882
	<b>NN6</b>	554	8907
	<b>NN7</b>	458	8479
	<b>NN8</b>	557	8922
	<b>NN9</b>	524	8769
	<b>NN10</b>	548	8878
	<b>NN11</b>	552	8897
	<b>NN12</b>	535	8820
<b>Djibi</b>	<b>D1</b>	580	9030
	<b>D2</b>	663	9442
	<b>D3</b>	679	9519
	<b>D4</b>	640	9325
	<b>D5</b>	655	9400
	<b>D6</b>	648	9365
	<b>D7</b>	584	9048

Les dimensions des périmètres varient de 458 à 679 m pour les PPR et de 8479 à 9519 pour les PPE. Les périmètres les plus faibles (458 m et 8479 m) sont observés au niveau du forage NN7. Les forages D4, D6, D5, D2 et D3 présentent les mesures les plus importants avec respectivement des valeurs de 640, 648, 655, 663 et 679m pour le PPR et de 9325, 9365, 9400, 9442 et 9519 m pour le PPE.

### Surface des PPR et des PPE

Krijgsman et Lobo-Ferreira

Les mesures des superficies de protection (tableau VIII) varient de 0,019 à 0,041 km<sup>2</sup> pour les PPR et de 0,156 à 0,306 km<sup>2</sup> pour les PPE. Les surfaces les plus faibles (0,019 Km<sup>2</sup> et 0,156 Km<sup>2</sup>) sont enregistrées au niveau du forage NN7. Les forages D4, D6, D5, D2 et D3 ont par ordre croissant les superficies les plus importantes avec respectivement des valeurs de 0,037 ; 0,037 ; 0,038 ; 0,039 et 0,041 Km<sup>2</sup> pour le PPR, et de 0,284; 0,285; 0,292; 0,298 et 0,306 Km<sup>2</sup> pour le PPE.

**Tableau VIII:** Estimation des superficies des PPR et PPE des forages des champs captants de Niangon Nord 2 et de Djibi par la méthode Krijgsman et Lobo-Ferreira.

Champs captants	N° des forages	Surfaces des PPR (Km <sup>2</sup> )	Surfaces des PPE (Km <sup>2</sup> )
Nianguon Nord 2	NN1	0,023	0,202
	NN2	0,025	0,210
	NN3	0,022	0,185
	NN4	0,025	0,212
	NN5	0,027	0,226
	NN6	0,027	0,243
	NN7	0,019	0,156
	NN8	0,028	0,245
	NN9	0,024	0,219
	NN10	0,027	0,245
	NN11	0,027	0,252
	NN12	0,025	0,224
Djibi	D1	0,030	0,251
	D2	0,039	0,298
	D3	0,041	0,306
	D4	0,037	0,284
	D5	0,038	0,292
	D6	0,037	0,285
	D7	0,030	0,224

**Wyssling**

Les superficies définies par les PPR et les PPE des forages par la méthode de Wyssling sont inscrites dans le tableau IX

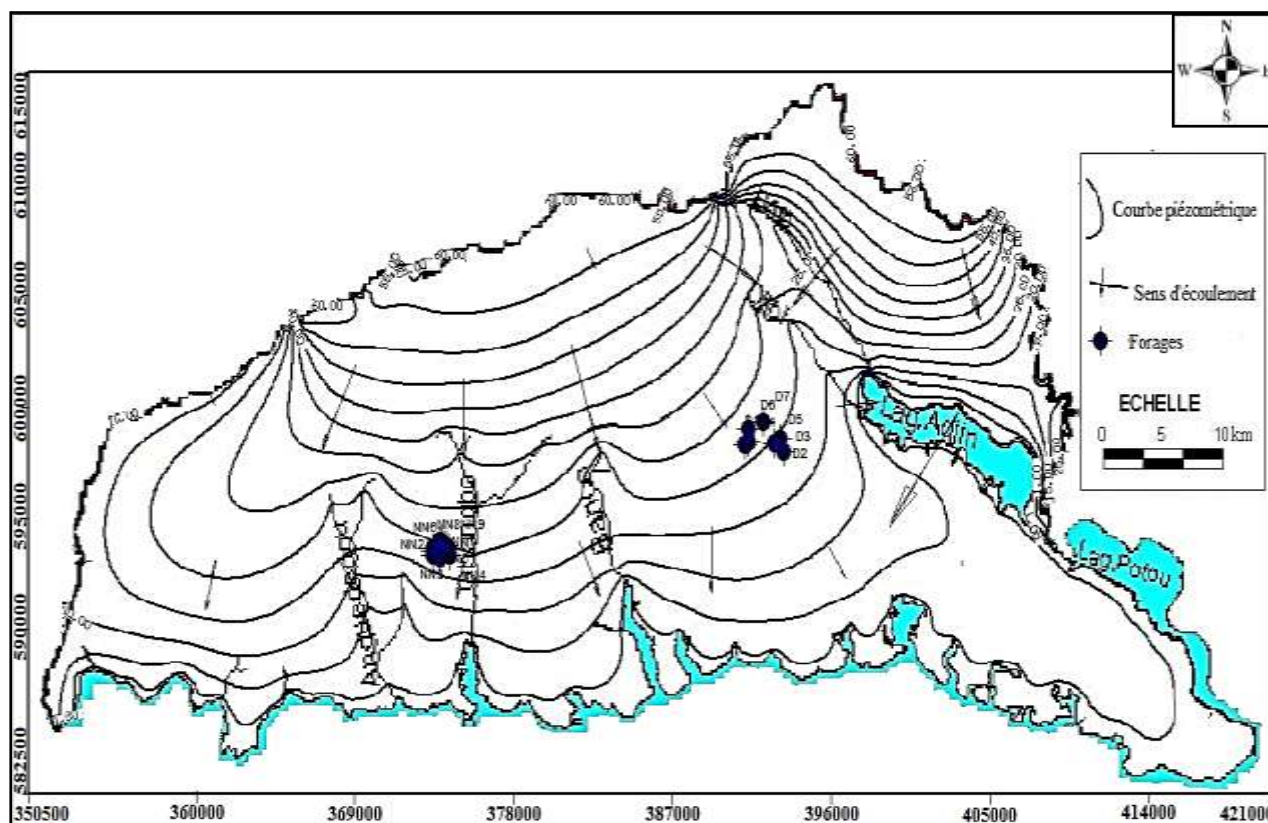
**Tableau IX:-** Estimation des superficies des PPR et PPE des forages par la méthode de Wyssling.

Champs captants	N° des forages	Surfaces des PPR (Km <sup>2</sup> )	Surfaces des PPE (Km <sup>2</sup> )
Nianguon Nord 2	NN1	0,023	4,57
	NN2	0,024	4,76
	NN3	0,022	4,51
	NN4	0,025	4,83
	NN5	0,026	4,99
	NN6	0,027	5,05
	NN7	0,018	4,03
	NN8	0,027	5,09
	NN9	0,024	4,73
	NN10	0,026	4,98
	NN11	0,027	5,03
	NN12	0,025	4,85
Djibi	D1	0,029	5,34
	D2	0,038	6,28
	D3	0,040	6,45
	D4	0,036	6,01
	D5	0,038	6,18
	D6	0,037	6,10
	D7	0,030	5,38

Les mesures des superficies de protection varient de 0,018 à 0,040 km<sup>2</sup> pour les PPR et de 4,03 à 6,45 km<sup>2</sup> pour les PPE. Les surfaces les plus faibles (0,018 Km<sup>2</sup> et 4,03 Km<sup>2</sup>) sont observées au niveau de l'ouvrage de captage NN7. Les forages D4, D6, D5, D2 et D3 présentent les superficies les plus importantes avec respectivement des valeurs de 0,036; 0,037; 0,038; et 0,040 Km<sup>2</sup> pour le PPR, et de 6,01; 6,10; 6,18; 6,28 et 6,45 Km<sup>2</sup> pour le PPE.

### Représentation des PP et identification des sources potentielles de pollution des eaux souterraines

La figure 6 montre la disposition des ouvrages de captage sur la carte piézométrique du District d'Abidjan extrait des travaux de Deh (2013). Cette carte permet de connaître la direction d'écoulement des eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal (CT).

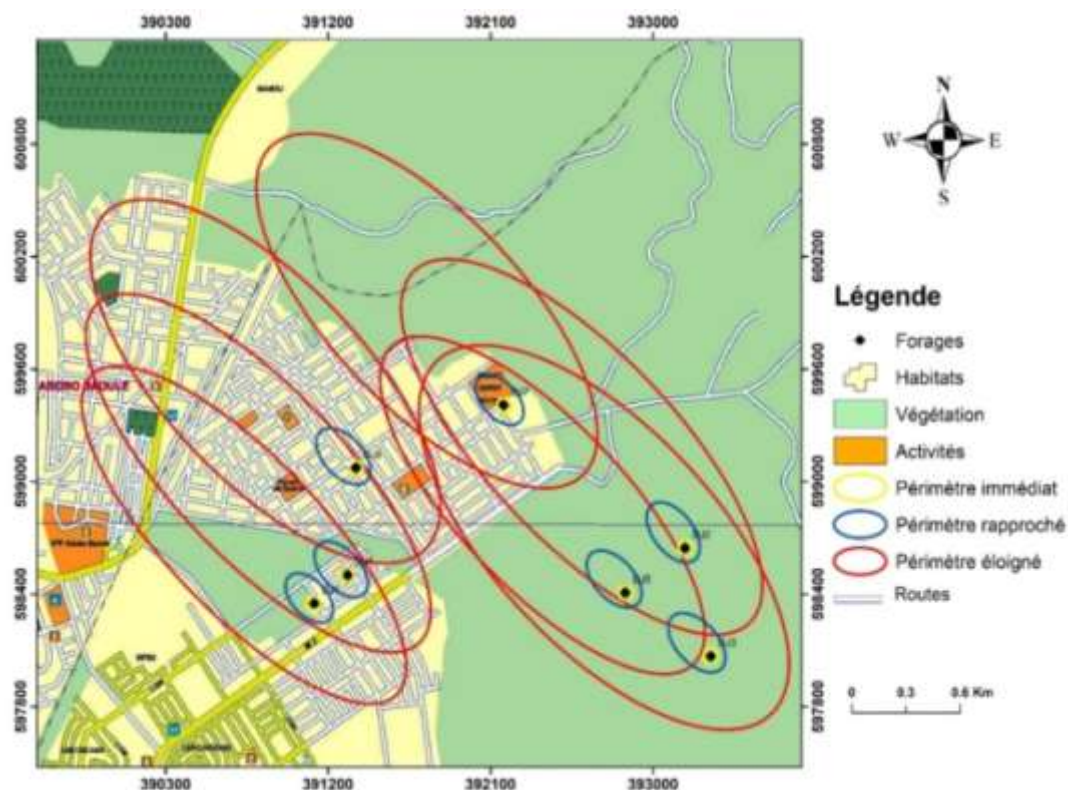


**Figure 6:-** Positionnement des forages par rapport à la direction d'écoulement de la nappe du Continental Terminal d'Abidjan (Deh, 2013).

A l'analyse de cette carte, les directions principales d'écoulement sont du Nord vers le Sud et du Nord-Ouest vers le Sud-est. Ces directions sont prises en compte dans l'établissement des différents périmètres de protection (Figures 7 et 9).

### Champ captant de Djibi à Angré Cocody

La figure 7 illustre les différents périmètres de protection autour des forages de Djibi. A ce jour, on a une prolifération de nouvelles constructions d'habitats dans les périmètres rapprochés et éloignés. Certaines de ces habitations occupent la surface de protection immédiate du forage telle que définie dans cette étude (figure 8). La superposition des différents périmètres de protection (PP) sur la carte d'aménagement du District d'Abidjan permet également de constater des activités anthropiques (sources de pollution) et des voies à l'intérieur des périmètres de protection rapprochée et éloignée (Figure 8). Les activités sont plus généralement situées en amont des forages. Les installations dans ces zones doivent être réglementées et contrôlées par l'Autorité chargée de la gestion du domaine public hydraulique afin d'éviter tout risque de contamination des eaux souterraines au niveau des ouvrages de captage. En effet, les eaux usées domestiques résultant des activités de ménage constituent la principale source qui menace la qualité des eaux de ces forages.



**Figure 7:-** Périètres de protection des forages de Djibi à Cocody-Angré.



**Figure 8:-** Illustrations des installations à proximité des forages du champ captant de Djibi.

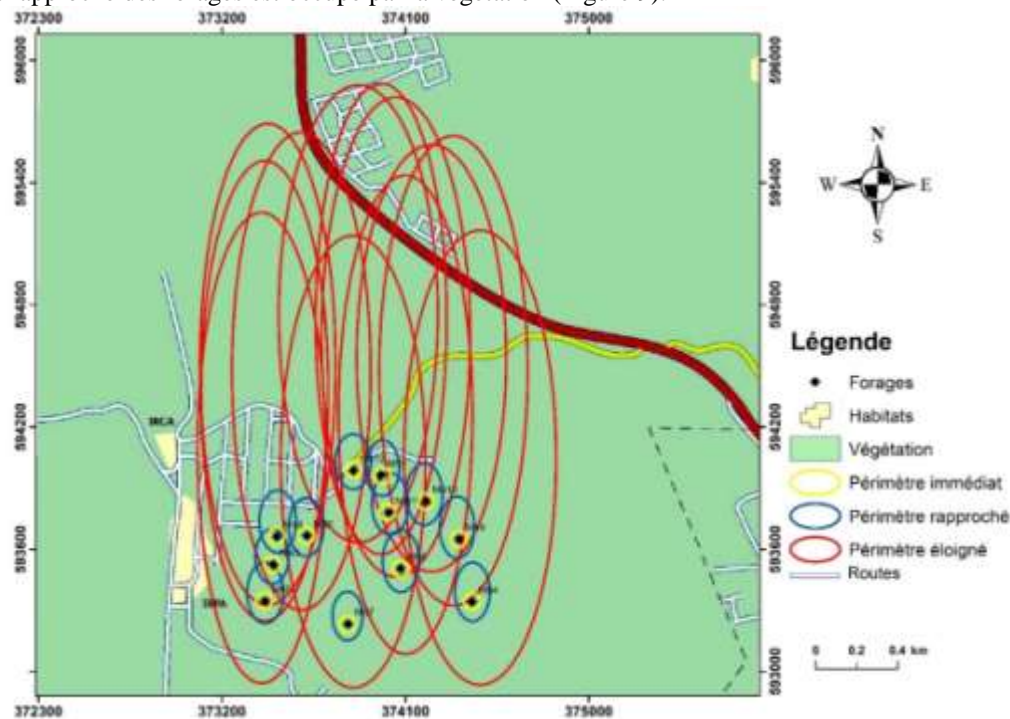
#### **Champ captant de Niangon Nord 2 à Yopougon**

La figure 8 présente la superposition des périmètres de protection (PP) des ouvrages de captage de Niangon Nord 2 sur la carte du plan d'aménagement du District d'Abidjan.

A ce jour, ces ouvrages de captage sont éloignés de la ville, et ne sont pas menacés de contamination par les eaux usées domestiques. En effet, Ils se trouvent dans une zone non urbanisée et inhabitée qui ne présente pas



d'installations ou d'activités anthropiques susceptibles de contaminer les eaux souterraines. L'environnement immédiat et rapproché des forages est occupé par la végétation (Figure 9).



**Figure 9:-** Périmètres de protection des forages de Niangon Nord 2 à Yopougon.

### Discussion:-

La détermination des périmètres de protection autour des ouvrages de captage de Djibi et Niangon Nord 2 a été réalisée à partir de trois méthodes. Il s'agit de la méthode CFR pour les PPI, de la méthode de Krijgsman et Lobo et celle établie par Wyssling pour les PPR et PPE.

Le rayon des PPI a été fixé à 40 m selon la typologie du système aquifère. Cette valeur minimale est attribuée au système aquifère poreux non confiné (type 2), ce qui est le cas de la nappe du CT d'Abidjan dans son ensemble.

Cependant, le rayon des PPI de la plupart des forages visités varie entre 5 et 30 m. Les études réalisées par le BNETD (2008) utilisant la méthode des isochrones par les abaques de Sauty et Thiery (1975) prévoient un rayon de délimitation de 30 m, identique au rayon minimal fixé au Québec (MINEFQ, 1995) et en Hollande. Selon Bussard (2005), la protection immédiate est à une distance de 10 m en Allemagne, en Belgique, au Danemark et en Suisse ; de 15 m en France et de 30 m au Québec et au Pays-Bas.

En effet, Compte tenu de l'intensification des activités anthropiques et des installations non réglementées observées au niveau des forages de la Djibi, un rayon plus important est préférable pour assurer la protection maximale des eaux souterraines. La zone de protection immédiate définie suivant un rayon de 40 m va permettre de couvrir les points d'infiltration préférentiels des eaux pluviales et favoriser l'isolement des ouvrages qui seront distants des activités anthropiques et des habitations (Djémin, 2010).

Les rayons de dimensionnement des PPR et des PPE sont obtenus à partir de la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira combinée à la méthode d'infiltration, et de la méthode de Wyssling.

Les rayons amont des PPR des forages déterminés par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira et par celle de Wyssling varient respectivement de 118 à 155 m et de 107 à 144 m, et les rayons aval varient de 42 à 79 m et de 50 à 87 m. Les résultats obtenus des deux méthodes sont proches. Ces méthodes sont toutes deux convenables pour définir la protection rapprochée des ouvrages de captage des eaux souterraines.

Au niveau des PPE, les rayons amont déterminés par la méthode Krijgsman et Lobo-Ferreira combinée à la méthode de l'infiltration et par la méthode de Wyssling varient respectivement de 1128 à 1721 m et de 4084 à 4199 m et les rayons aval de 47 à 109 m et de 93 à 207 m. La méthode de Wyssling donne des dimensions de rayons de PPE plus importantes que celles obtenues par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira combinée à la méthode d'infiltration. Il convient donc d'utiliser la méthode de Wyssling pour une protection éloignée maximale des ouvrages de captage des eaux souterraines.

En comparaison avec d'autres études, il apparaît que les résultats obtenus au niveau des PPR sont très proches de ceux obtenus par Djemin (2010), allant de 130 à 185 m en amont et de 37 à 92 m en aval du captage. Cependant, ils diffèrent sensiblement des dimensions des rayons trouvées par Sekongo (2018) avec la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira qui varient de 72 à 97 m en amont et de 75 à 101 m en aval des ouvrages de captage de la nappe de Bonoua. Au niveau des PPE, les dimensions des rayons aval obtenus par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira combinée à la méthode d'infiltration sont proches de celles déterminées par Djemin (2010), qui varient de 40 à 124 m. Mais, elles sont inférieures aux valeurs de Sekongo (2018), allant de 148 à 301 m. Cependant, les rayons aval des PPE estimées par la méthode de Wyssling sont supérieures à celles de Djemin (2010) et plus ou moins inférieures à celles de Sékongo (2018) obtenues par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira.

En effet, ces différences de valeurs observées pourraient s'expliquer par le fait que les paramètres utilisés (perméabilité, gradient hydraulique, coefficient d'emménagement, porosité, etc.) à Bonoua sont différents de ceux d'Abidjan. De plus, les grandeurs des paramètres considérés peuvent varier selon la zone d'étude ainsi que selon l'approche méthodologique développée.

Dans certains pays pour une distance minimale de 100 m, le PPR est défini sur un temps de parcours ou l'isochrone de 50 jours (Angleterre, Allemagne, France) ou de 60 jours pour d'autres comme le Pays-Bas (Hollande) et le Canada (Bussard, 2005). Dans cette étude, le temps de transfert considéré à Abidjan est de 50 jours. Les valeurs des rayons amont des PPR des ouvrages des champs captants de Djibi et de Niangon Nord 2 sont supérieures à cette distance de protection minimale de 100 m recommandée. Concernant les PPE, le temps de transfert ou isochrone de temps définit est de 5 et 10 ans au Canada ainsi que de 10 et 25 ans dans certains pays. Le temps de transfert considéré au niveau du District d'Abidjan est de 3500 jours, soit environ 10 ans (Kouamé et al., 2016). Ces valeurs de 50 et 3500 jours sont donc convenables et peuvent servir à définir les dimensions de la zone.

La dimension du PPI considérée et les différentes valeurs obtenues pour les PPR et les PPE, à partir des méthodes de Krijgsman et Lobo-Ferreira et celle de Wyssling sont inférieures aux valeurs maximales de protection proposées par le Décret N°2013-440 du 13 juin 2013 du code de l'eau de Côte d'Ivoire (MEF-CI, 2013). Dans ce décret, les limites maximales sont de 1 Km pour le PPI, de 5 Km pour le PPR et de 10 Km pour le PPE. Ainsi, pour une protection efficace et maximale des eaux souterraines des ouvrages de captage, il est nécessaire d'utiliser les méthodes permettant d'avoir des PP qui ne sont ni sous-dimensionnés pour être sécuritaires ou ni surdimensionnés pour ne pas entraîner trop d'inconvénients d'ordre économique, social et environnemental.

Les périmètres de protection rapprochée et éloignée des forages des champs captants de Djibi et de Niangon Nord 2 ont également été déterminés par Kouassi (2018) à partir du modèle numérique visual MODFLOW. Les valeurs obtenues pour ces deux champs captants varient de 184 à 486 m pour le rayon amont et de 105 à 386 m pour le rayon aval du PPR ; de 3987 à 7758 m pour le rayon amont du PPE et de 124 à 408 m pour le rayon perpendiculaire des PPR et PPE.

On observe que pour les PPR, le modèle numérique donne des dimensions supérieures à celles obtenues dans cette étude. Au niveau des PPE, les valeurs de rayons perpendiculaires obtenus à partir de la méthode de Wyssling sont plus élevées que celles observées dans les résultats de Kouassi (2018), et les dimensions des rayons amont sont comprises dans l'intervalle de ces valeurs obtenues. Aussi, les dimensions des PPR et PPE autour des ouvrages de captage de la nappe de Bonoua obtenues par Koblan (2016). à partir du modèle numérique sont différentes de celles déterminées dans cette étude. Les rayons des PP issus du modèle numérique sont supérieurs à ceux obtenus à partir des méthodes analytiques utilisées.

En effet, les différences de dimensions des PP observées entre la méthode numérique visual MODFLOW et les méthodes analytiques de Krijgsman et Lobo-Ferreira et de Wyssling pourraient s'expliquer par le fait que les paramètres utilisés (perméabilité, gradient hydraulique, coefficient d'emménagement, porosité etc.) dans cette

étude différent de ceux utilisés par Koblan (2016) et Kouassi (2018) . De plus, les méthodes utilisées sont différentes.

Au regard, de tout ce qui précède des deux méthodes analytiques, la méthode de Wyssling présente les meilleurs résultats en termes de distance importante de protection pouvant garantir au mieux la protection des eaux souterraines des ouvrages de captage. Les dimensions des rayons issues de la méthode de Wyssling sont plus plausibles que celles obtenues par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira. La méthode de Wyssling permet de définir les PPR et les PPE alors que la méthode Krijgsman et Lobo-ferreira nécessite de combiner a d'autre méthode pour déterminer les périmètres de protection éloignée (PPE).

L'environnement immédiat et rapproché des ouvrages de captage de la Djibi sont dominés par les habitations. Par conséquent, les eaux souterraines pourraient être contaminées par les eaux usées domestiques si le quartier de Djibi se construit sans tenir compte d'un réseau d'assainissement adéquat. Concernant le champ captant de Niangon Nord 2, les eaux souterraines sont pour le moment dans une zone qui ne présente presque pas de risque de contamination. Ces observations ont également été soulignées lors des études de [33]. Idéalement, il convient donc de définir en plus des périmètres de protection immédiate, les zones de protection rapprochée et de protection éloignée autour des ouvrages des différents champs captant.

### Conclusion Générale

Cette étude a été entreprise en vue d'une gestion durable et efficace des eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal par la détermination des périmètres de protection autour des nouveaux ouvrages de captages de la ressource. Trois périmètres de protection (PPI, PPR et PPE) ont été déterminés à partir des méthodes analytiques qui tiennent compte de l'écoulement souterrain des eaux : la méthode CFR, la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira utilisée conjointement avec celle de l'infiltration et la méthode développée par Wyssling.

Ainsi, le rayon du PPI des forages déterminée à partir de la méthode CFR est de 40 m. Ceux des PPR et PPE en fonction des méthodes sont les suivants : Pour la Méthode Krijgsman et Lobo-Ferreira, les variations sont de 118 à 155 m pour le PPR amont ; de 42 à 79 m pour le PPR aval; de 1128 à 1721 m pour le PPE amont; de 47 à 109 m pour le PPE aval ; et de 74 à 112 m pour la distance de protection perpendiculaire à la direction d'écoulement au droit du captage. Pour la Méthode de Wyssling, les variations sont de 107 à 144 m pour le PPR amont de 50 à 87 m pour le PPR aval; de 74 à 112 m pour la distance de protection perpendiculaire à la direction d'écoulement au droit du captage du PPR; de 4084 à 4199 m pour le PPE amont; de 93 à 207m pour le PPE aval ; de 615 à 933 m pour la distance de protection perpendiculaire à la direction d'écoulement au droit du captage du PPE.

Les périmètres de protection obtenus ont une forme elliptique du fait de la prise en compte de l'écoulement souterrain par les méthodes utilisées. Les valeurs obtenues par la méthode de Wyssling sont plus plausibles que celles obtenues par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira. La méthode de Wyssling est plus simple et convient pour déterminer les distances des PPR et PPE. Les eaux usées domestiques résultant des activités de ménage sont essentiellement les risques potentiels de contamination encourus par les eaux souterraines des ouvrages du champ captant de Djibi. Ces risques sont tributaires à l'urbanisation non maîtrisée avec un faible taux de raccordement des ménages aux réseaux collectifs qui peut occasionner la migration ponctuelle des eaux usées vers les eaux souterraines. Les eaux souterraines au niveau du champ captant de Niangon Nord 2, ne sont pas exposées à ce jour au risque de contamination.

### Références Bibliographiques:-

- [1] Aghui, N. et Biemi, 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 tome 20, pp.331-347.
- [2] 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.
- [3] Bear, J. et Jacobs, M. (1965): On the movement of the water bodies injected into aquifers, Journal of Hydrology, volume 3, pp. 37-57.
- [4] BNETD (Bureau National d'Etude Technique et de Développement) (2006): Projet de délimitation des périmètres de protection autour des retenues d'eau de surface destinées à l'alimentation en eau potable des populations des villes de Daloa, Gagnoa et Adzope. Proposition technique et financière, 18 p.
- [5] BNETD (Bureau National d'Etude Technique et de Développement) (Février 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 109 p.
- [6] Bonnet M., Bertone, F. (1998): La Méthode de Retro trajectoire : 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.
- [7] Bussard, T. (2005): Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants", Thèse de Doctorat de l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne, 162 p.
- [8] Deh, S. K. (2013): Contributions de l'évaluation de la vulnérabilité spécifique aux nitrates et d'un modèle de transport des organochlorés à la protection des eaux souterraines du district d'Abidjan (sud de la côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, 183p.
- [9] DHH (Direction de l'Hydraulique Humaine en Côte d'Ivoire) (2001): Ministère des Infrastructures Economiques, Direction de l'hydraulique Humaine, Abidjan, 66 p.
- [10] Djemin, E. J. (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-Abidjan, 61 p.
- [11] Dongo, K., Kouamé, K.F., Kone, B., Biemi, J., Tanner, M. et Cissé, G. (2008): Analyse de la situation de l'environnement sanitaire des quartiers défavorisés dans le tissu urbain à Yopougon à Abidjan, Côte d'Ivoire, Vertigo, 8(3), pp. 1-11.
- [12] Garouani, E.A. et 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, BP 2202, Route l'Imouzzer, Fès, Maroc et le Laboratoire des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan 10p.
- [13] INS (Institut National de Statistiques) (2021): Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH). Données socio-démographiques et économiques des localités, résultats définitifs par localités, District Autonome d'Abidjan, 37p.
- [14] Jourda, J. P. (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, 319 p.
- [15] Jourda, J.P., Kouamé, K.J., Saley, M.B., Kouadio, B.H., Oga, Y.S., Deh, S. (2006a): Contamination of the Abidjan Aquifer by sewage: An assessment of extent and strategies for protection. Groundwater pollution in Africa, Editors Yongxin Xu and Brent Usher, Taylor and Francis/Balkema, Great-Britain, pp. 291-300.
- [16] 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-Géoressources, Centre géoscientifique de Québec, commission géologique du Canada, Centre géoscientifique et le Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada.
- [17] Koblan, A. K. (2016): Détermination des Périmètres de protection des nouveaux ouvrages de Captage de la nappe de Bonoua par Modelisation Hydrogéologique". Mémoire de Master en Sciences de la Terre, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 81 p.
- [18] Kouamé, A. A. (2017): Apport de la modélisation hydrogéologique dans l'étude des risques de contamination de la nappe d'Abidjan par les hydrocarbures: cas du benzène dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Lausanne, 312 p.
- [19] Kouamé, K.J. (2007): Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution", Thèse de doctorat, Université de Cocody, 229 p.
- [20] Kouamé, K. J., Jourda, J.P., Deh, S.K., Djemin, E.J., Saley, M.B., Anani, A.T. et Biemi J. (2013): Apport des méthodes mathématiques dans la délimitation des périmètres de protection autour des ouvrages de captage des eaux souterraines d'Abidjan (Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 7(5), pp 1987-2006.
- [21] Kouassi, K.A. (2013): Modélisation hydrodynamique en milieu poreux saturé par approche

- inverse via une paramétrisation multi-échelle : Cas de l'aquifère du Continental Terminal d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, 268 p
- [22] Kouassi, G.Y.S. (2018): Détermination des périmètres de protection des nouveaux champs captants du District d'Abidjan : cas de Djibi, Niangon II et Songo", Mémoire de Master en Sciences de la Terre, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 61 p.
- [23] Kraemer, S.R., Haitjema, H.M. et Kelson, V.A. (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.
- [24] Lobo-Ferreira J.P., Krijgsman, B. and FESEKER T. (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 (2004), vol. 43, Num. 4. pp. 651-659
- [25] MEF-CI (Ministère des Eaux et Forêts de Côte d'Ivoire), (1998): Loi n°98-755 du 23 décembre 1998 portant Code de l'Eau, République de Côte d'Ivoire, 68 p.
- [26] MEF-CI (Ministère des Eaux et Forêts de Côte d'Ivoire) (2013): Décret n°2013-440 du 13 juin 2013 déterminant le régime juridique des périmètres de protection des ressources en eau des aménagements et ouvrages hydrauliques". République de Côte d'Ivoire, 5 p.
- [27] 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).
- [28] ONEP (Office Nationale de l'Eau Potable) (2015): Rapport de suivi du patrimoine, 15p.
- [29] 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 du grade de Maître des sciences (M.Sc.), Université du Québec, institut national de la recherche scientifique\_INRs-Géoressource, 262 p.
- [30] Sauty et Thiery (1975): Utilisation d'abaques pour la détermination des périmètres de protection, BRGM 75 SGN 430 AME.
- [31] Sekongo, S.K. (2018): Détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage de la nappe du Sud Comoé : cas des forages d'Abobakro (Sous-Préfecture de Bonoua), Mémoire de Master, Université Félix Houphouët Boigny, 92 p.
- [32] SODECI (Société de Distribution d'Eau en Côte d'Ivoire), (2015): Etude de la gestion et de la protection de la nappe d'Abidjan". Actualisation des études hydrogéologiques SOGREAH de 1997, 78 p.
- [33] Soro, N., Ouattara, L. , Dongo, K., Kouadio, K. E., Ahoussi, K. E., Soro, G., Oga, M.S., Savané, I. et 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, 2010.
- [34] Verreault, M. (2003): Etude méthodologique pour l'estimation de l'aire d'alimentation décapage d'eau souterraine en milieu complexe. Mémoire de maîtrise en sciences de la terre, université du Québec à Chicoutimi, 144 p.
- [35] Wyssling, V.L. (1979): Eineneue Formel zur Berechnung der Zuströmdauer (Laufzeit) des Grund wassers zueinem Grund wasser-Pumpwerk .EclogaeGeologicaeHelvetiae, Vol.72, n°2.