

Détermination des périmètres de protection des forages du champ captant de Songon, Abidjan, Côte d'Ivoire

Kassi Alexis KOUAME^{1*}, Kan Jean KOUAME², Aminata DIOMANDE¹, Koffi Fernand KOUAME²
et Jean Patrice JOURDA²

¹ 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), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

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

(Reçu le 24 Juin 2025 ; Accepté le 01 Août 2025)

* Correspondance, courriel : kassialexiskouame@yahoo.com

Résumé

Les ouvrages de captage de la nappe du Continental Terminal au niveau de la commune de Songon utilisés pour l'approvisionnement en eau potable de la population d'Abidjan font l'objet d'une menace par la présence d'une activité industrielle située en amont des ouvrages de ceux-ci. La présente étude vise à déterminer les périmètres de protection autour de ces ouvrages de captage en vue de garantir la gestion durable de la qualité des eaux souterraines du champ captant de Songon. L'approche méthodologique utilisée a porté sur l'utilisation des méthodes de Krijgsman et Lobo-Ferreira et de Wyssling. Ces méthodes ont servi à la détermination des rayons caractéristiques des périmètres de protection rapprochée et éloignée. Les rayons caractéristiques du périmètre de protection rapprochée obtenus avec la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira varient de 107 à 133 m pour le rayon amont, de 25 à 49 m pour le rayon aval. Concernant le périmètre de protection éloignée, les rayons amont et aval obtenus avec la méthode Krijgsman et Lobo-Ferreira varient respectivement de 1161 à 1565 m pour le rayon amont, de 27 à 57 m pour le rayon aval. Pour les deux périmètres le rayon perpendiculaire à la direction d'écoulement au droit du forage oscille de 61 à 77 m. Ceux obtenus avec la méthode Wyssling au niveau du périmètre de protection rapprochée varient de 97 à 121 m pour le rayon amont, de 34 à 59 m pour le rayon aval. Les rayons amont et aval du périmètre de protection éloignée définis par la méthode de Wyssling sont compris entre 3889 et 3947 m pour le rayon amont, entre 53 et 111 m pour le rayon aval. Le rayon perpendiculaire à la direction d'écoulement au droit des forages varie de 58 à 84 m concernant le périmètre de protection rapprochée et de 454 à 662 m pour le périmètre protection éloignée. Ces différentes valeurs pourront guider les autorités dans la mise en place des périmètres de protection autour de ces forages et à surtout régler les activités à l'intérieur de ces différents périmètres.

Mots-clés : *champ captant, périmètre de protection, Wyssling, Krijgsman et Lobo-Ferreira, Songon, Abidjan.*

Abstract

Determination of the protection perimeters of the Songon wellfield boreholes, Abidjan, Côte d'Ivoire

The Continental Terminal groundwater catchment structures in the Songon commune, used to supply drinking water to the population of Abidjan, are threatened by the presence of an industrial activity located upstream of the structures. The aim of this study is to determine the protection perimeters around these catchment structures, in order to guarantee sustainable management of groundwater quality in the Songon catchment area. The methodological approach used was based on the Krijgsman and Lobo-Ferreira and Wyssling methods. These methods were used to determine the characteristic radii of the near and far protection perimeters. The characteristic radii of the close protection perimeter obtained using the Krijgsman and Lobo-Ferreira method range from 107 to 133 m for the upstream radius, and from 25 to 49 m for the downstream radius. For the remote protection perimeter, the upstream and downstream radii obtained using the Krijgsman and Lobo-Ferreira method range from 1161 to 1565 m for the upstream radius, and from 27 to 57 m for the downstream radius. For both perimeters, the radius perpendicular to the direction of flow at the borehole varies from 61 to 77 m. The radii obtained using the Wyssling method for the close protection perimeter range from 97 to 121 m for the upstream radius, and from 34 to 59 m for the downstream radius. The upstream and downstream radii of the remote protection perimeter defined by the Wyssling method range from 3889 to 3947 m for the upstream radius, and from 53 to 111 m for the downstream radius. The radius perpendicular to the direction of flow at the boreholes varies from 58 to 84 m for the close protection perimeter and from 454 to 662 m for the far protection perimeter. These different values can guide the authorities in setting up protection perimeters around these wells and, above all, in regulating activities within these different perimeters.

Keywords : *wellfield, protection perimeter, Wyssling, Krijgsman and Lobo-Ferreira, Songon, Abidjan.*

1. Introduction

Le rejet continu et permanent d'importantes quantités de déchets liquides et solides dans les milieux naturels favorise la dispersion et la diffusion d'éléments polluants dans les milieux récepteurs [1]. L'accumulation de ces éléments dans les formations superficielles (sols et sédiments) en teneurs élevées entraîne automatiquement, grâce aux phénomènes qui accompagnent l'infiltration des eaux superficielles, la contamination des eaux souterraines. Les rejets industriels, les eaux usées domestiques, de même que l'utilisation des pesticides et des engrais sont autant de causes qui ont contribué, au cours de ces dernières décennies, à la détérioration réelle de la qualité de la nappe du Continental Terminal [2, 3]. Cette nappe connaît depuis quelques années des problèmes de pollution nitrée dans sa partie Sud [4 - 7] ; ce qui a entraîné l'abandon des forages du Plateau et d'Adjamé dont les eaux de captage présentaient un taux élevé de nitrate. Pour pallier à ces problèmes, de nouveaux forages ont été réalisés dans la sous-préfecture de Songon. Mais en amont de ces forages, une nouvelle zone industrielle est implantée dans la sous-préfecture d'Anyama. Cette zone industrielle a pour ambition de devenir la plus grande zone industrielle du District d'Abidjan. Le risque de pollution lié au positionnement de cette zone industrielle par rapport au champ captant de Songon et à l'intensification des activités industrielles pourrait conduire plus tard à la dégradation de la qualité des eaux captées. Pour garantir à long terme une production d'eau de bonne qualité, il convient de mettre en place des stratégies de gestion de ces eaux souterraines. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les périmètres de protection autour des ouvrages de captage en vue de garantir la qualité des eaux souterraines du champ captant de Songon.

2. Méthodologie

2-1. Présentation de La zone d'étude

La zone d'étude est à cheval entre les sous-préfectures de Songon et d'Anyama où sont situés respectivement le champ captant et la nouvelle zone industrielle. Elle se situe entre les latitudes $5^{\circ}20'$ et $5^{\circ}32'$ Nord et les longitudes $4^{\circ}6'$ et $4^{\circ}16'$ Ouest. Ce territoire a une superficie d'environ 341 km^2 (**Figure 1**). Le District d'Abidjan concentre la plus grande population de la Côte d'Ivoire. Sa population est passée de 2 877 948 habitants en 1998 et à 4 395 243 habitants en 2014 avec un taux d'accroissement de 4,6 %/an [8]. Les relevés pluviométriques de la station d'Abidjan-Aéroport révèlent que les pluviométries moyennes mensuelles sont comprises entre 28 et 456 mm sur la période 1976-2017. Les mois de mars et d'avril sont les mois les plus chauds avec une température moyenne mensuelle supérieure à $28,5^{\circ}\text{C}$. Les mois de juin à septembre sont les moins chauds avec un maximum de température égal à $26,7^{\circ}\text{C}$. Le réseau hydrographique est composé de plusieurs rivières dont les plus importantes sont le Banco, l'Anguedédou, le Gbangbo de direction Nord-Sud et le Niéké de direction NE-SW. Cette zone est délimitée par la lagune Ebrié au Sud [9]. Du point de vue hydrogéologique, la zone d'étude qui appartient au bassin sédimentaire côtier ivoirien regorge les ressources en eaux souterraines les plus importantes du pays. Ces ressources en eau souterraine sont contenues dans trois niveaux d'aquifère : l'aquifère du quaternaire ; l'aquifère du Mio-Pliocène (Continental Terminal) ; l'aquifère crétacé supérieur (Maestrichtien) [10].

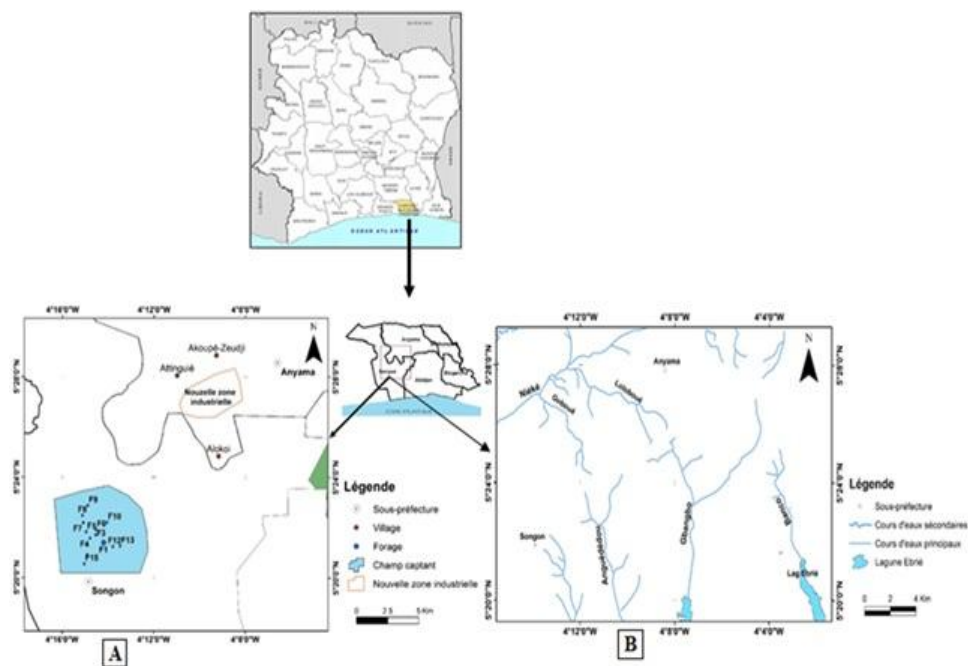


Figure 1 : Présentation de la zone d'étude A : localisation B : réseau hydrographique

2-2. Données et Méthodes

2-2-1. Données

Les données utilisées pour réaliser cette étude peuvent être regroupées en 3 (**Tableau 1**). Il s'agit d'abord des données de forages : coordonnées géographiques, niveau statique, débits d'exploitation, profondeur, coupe géologique ; ensuite des données hydrodynamiques de l'aquifère : épaisseurs de la zone saturée, porosité de l'ordre de 15 % [10], temps de transfert = 60 jours pour les périmètres de protection rapprochée

et 3700 jours pour les périmètres de protection éloignée [7], gradient hydraulique = 1,8 ‰ [10], conductivité hydraulique = 10^{-3} m/s soit 86,4 m/j [5], infiltration = 247,4 mm.an⁻¹ soit $6,8 \cdot 10^{-4}$ m/j [7] et enfin des données cartographiques : carte d'aménagement de Songon [11].

Tableau 1 : Données des forages du champ captant de Songon

Forage	Profondeur (m)	Niveau statique (m)	Epaisseur Saturée (m)
F1	160	55,47	104,53
F2	137	38,28	98,72
F3	142	31,4	110,6
F4	129	23,27	105,73
F5	136	37,05	98,95
F6	147	41,42	105,58
F7	143	41,1	97,9
F8	129,28	36,33	92,95
F9	135,7	41,9	93,8
F10	152,45	46,77	105,68
F11	146,03	37,68	108,35
F12	158,05	50,93	107,12
F13	151,55	48,5	103,05
F14	147,07	49,96	97,11
F15	156	37,51	118,49

2-2-2. Méthodes de détermination des périmètres de protection

2-2-2-1. Méthode de Krijgsman et Lobo-ferreira

La méthode Kijgsman et Lobo-Ferreira consiste à calculer la distance correspondant à un temps de transfert proposé comme étant la limite du périmètre de protection rapprochée.

2-2-2-1-1. Détermination du périmètre de protection immédiate (PPI)

La vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution et le degré de confinement de la nappe sont deux critères essentiels lors de la détermination des rayons de délimitation des périmètres de protection immédiate. La superficie du périmètre de protection immédiate dépend de la typologie des nappes ou du type du système aquifère [12]. Il existe six types d'aquifères : (Type 1 : Système aquifère poreux et confiné ; Type 2 : Système aquifère poreux non confiné ou nappe libre ; Type 3 : Système aquifère poreux semi-confiné ; Type 4 : système aquifère constitué de formations carbonatés (formations calcaires) ; Type 5 : Système aquifère constitué de formations ignées ou métamorphiques fissurées ; Type 6 : Système aquifère constitué de formations ignées ou métamorphiques peu fissurées). La nappe du Continental Terminal correspond au système aquifère de type 2. Selon le **Tableau 2**, la valeur minimale du rayon du périmètre de protection immédiate correspondant au type 2 est égale à 40 m.

Tableau 2 : Valeurs minimales utilisées dans la méthode de calcul du rayon fixe pour la délimitation des périmètres de protection [12]

Types d'aquifères	Périmètre immédiat	Périmètre rapproché (t=50jours)	Périmètre éloigné (t=3500jours)
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	$r = 40 \text{ m}$	$60 \text{ m} \leq r \leq r_6$	$500 \text{ m} \leq r \leq r'_6$

2-2-2-1-2. Détermination des périmètres de protection rapprochée (PPR)

La méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira est basée sur la résolution analytique de l'équation d'écoulement de l'eau en milieu poreux dans le temps. En considérant le milieu homogène et isotrope, elle permet de déterminer les rayons de délimitation des périmètres de protection rapprochée à partir de l'isochrone de 60 jours. **L'Équation** analytique de l'écoulement en fonction du temps est la suivante :

$$t_x = \frac{n}{Ki} \left[r_x - \left(\frac{Q}{2\pi Kbi} \right) \ln \left\{ 1 + \left(\frac{2\pi Kbi}{Q} \right) \times r_x \right\} \right] \quad (1)$$

t_x = temps de transfert (jour) ; K = conductivité hydraulique (m.j-1) ; Q = débit de pompage (m³.j-1) ; b = épaisseur de l'aquifère (m) ; i = gradient hydraulique ; n = porosité de l'aquifère ; R_x = rayon délimitant une surface suivant l'isochrone de temps de transfert t_x (m).

La méthode considère uniquement l'écoulement horizontal régional vers l'ouvrage de captage en tenant compte du gradient hydraulique [13]. À cause du gradient hydraulique, une partie de la zone d'influence en aval ne fera pas partie de l'aire d'alimentation (**Figure 2**).

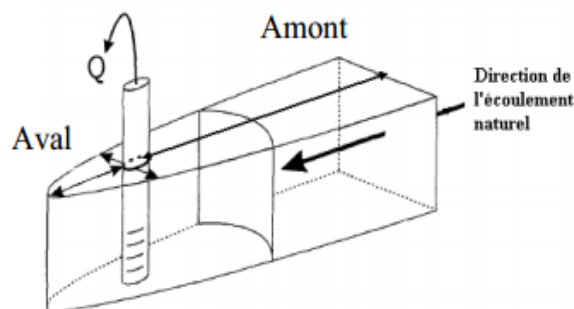


Figure 2 : Illustration de la zone d'appel et de la surface normale à l'écoulement souterrain naturel [13]

La zone à protéger en priorité contre une pollution due à une activité se situe en amont du captage [14]. De ce fait le périmètre de protection rapprochée prendra alors la forme d'une ellipse caractérisée par trois distances de protection (**Figure 3**) : 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}) et la distance perpendiculaire à l'écoulement au droit de l'ouvrage ($r_{\text{perpendiculaire}}$). La détermination des distances qui définissent l'isochrone correspondant à la zone de protection rapprochée du captage se fait à partir de la résolution de l'équation 1 en régime transitoire. **L'Équation** a été simplifiée par [13] comme suite :

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

$$\text{où, } A = \frac{n}{Ki}$$

$$\text{et } F = \frac{2\pi Kbi}{Q} \quad (3)$$

Les solutions analytiques de **l'Équation 2** correspondent aux rayons caractéristiques de l'ellipse formant le périmètre de protection rapprochée : Ces solutions s'expriment comme suite :

$$r_{\text{amont}} = \frac{0.00002x^5 - 0.0009x^4 + 0.37x^3 + x}{F} \quad (4)$$

$$\text{avec, } x = \sqrt{\frac{2Ft}{A}} \quad r_{\text{aval}} = \frac{0.042x^3 + 0.37x^2 + x}{F} \quad (5)$$

Si on considère la surface à protéger comme un repère et que le point de captage est l'origine du repère, la distance aval sera du côté négatif du repère. Alors, lors de la détermination de la distance aval l'expression x sera affectée d'un signe négatif. **L'Équation 5** s'écrira comme suite :

$$r_{\text{aval}} = \frac{-0.402x^3 + 0.37x^2 - x}{F} \quad (6)$$

La distance de protection perpendiculaire à la direction de l'écoulement (au droit du forage) est exprimée par **l'Équation** suivante :

$$r_p = 4 \times \sqrt{\frac{Q}{n.b}} \quad (7)$$

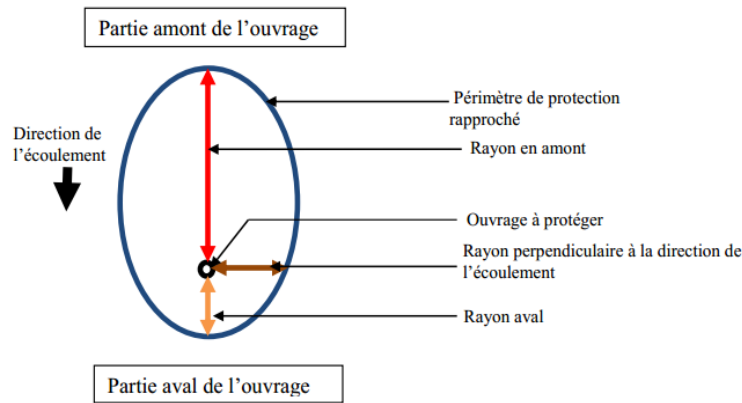


Figure 3 : Caractérisation des PPR selon la méthode analytique [12]

2-2-2-1-3. Détermination du périmètre de protection éloignée (PPE)

Le périmètre de protection éloignée forme aussi une ellipse dont le rayon perpendiculaire à l'écoulement est assimilable à celle du périmètre de protection rapprochée. Le rayon aval du périmètre éloigné correspond à l'inverse de l'équation 3. Il s'exprime comme suit :

$$r_{\text{aval}} = \frac{1}{F} \quad (8)$$

La méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira ne permet pas de définir le rayon amont du périmètre de protection éloignée. Le rayon amont du périmètre de protection éloignée des forages du champ captant de Songon est déterminé en calculant l'aire de recharge de la nappe par la méthode d'infiltration qui prend en compte le débit d'exploitation du forage et l'infiltration annuelle. 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 ;

$$A = \frac{Q}{I} \quad (9)$$

avec, $A = \pi r^2$

$$\text{La solution de l'Équation 9 est : } r_{\text{amont}} = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot I}} \quad (10)$$

A : surface du cercle (m^2) équivalente à l'aire de recharge de la nappe ; r_{amont} : rayon de protection éloigné en amont du forage ; Q : débit d'exploitation (m^3/j) ; I : infiltration (m/j).

2-2-2-2. Méthode analytique de Wyssling

Cette méthode est généralement appliquée pour la délimitation des périmètres de protection. À travers une formule mathématique, elle permet de calculer le temps d'écoulement (t) d'une goutte d'eau souterraine située sur un point quelconque de l'aquifère jusqu'au captage. Le temps de transfert servira ainsi à délimiter les isochrones nécessaires pour la définition des périmètres de protection. Elle ne s'applique que dans le cas des nappes libres [15]. L'application de la méthode suppose que : l'aquifère est homogène et illimité, l'ouvrage capte toute l'épaisseur saturée de l'aquifère, la couche formant la base de l'aquifère est imperméable, l'écoulement général de nappe est unidirectionnel et le régime permanent est supposé atteint.

2-2-2-2-1. Détermination des caractéristiques de la zone d'alimentation

La zone d'alimentation est le secteur en surface du sol qui contribue à l'alimentation du captage par infiltration. Le dimensionnement de cette zone sert d'outil de gestion du territoire pour un développement prudent de la région en évitant d'implanter des sources potentielles de pollution sur des secteurs sensibles (zones de fortes contributions). Cette zone englobe les 3 périmètres de protection et s'étend sur une très grande surface [15]. La forme de la zone d'alimentation est une parabole qui s'étend sur une distance X_0 en aval du captage. Ses limites amont ne sont pas connues car elle comprend toutes les eaux qui contribuent à l'alimentation du captage (**Figure 4**).

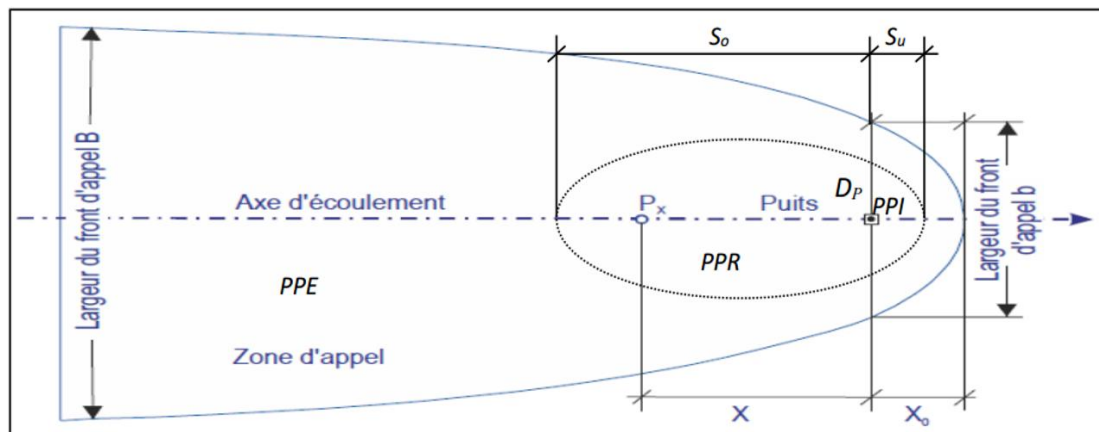


Figure 4 : Schéma d'écoulement avec les grandeurs estimées par la formule de Wyssling et dimensionnement des périmètres de protection [15]

Dans un premier temps on détermine la largeur maximale de la zone d'alimentation par le calcul. Soit, Q le débit du captage :

$$Q = KeBi \quad (11)$$

La largeur de la zone d'alimentation B s'exprimera de la manière suivante

$$B = \frac{Q}{K.e.i} \quad (12)$$

La limite aval de la zone d'alimentation du captage notée x_0 est déterminée à partir de la **Relation** suivante :

$$X_0 = \frac{B}{2\pi} \quad (13)$$

La largeur de la zone d'alimentation à hauteur du captage b est considérée égale à la moitié de la largeur maximale de la zone d'alimentation :

$$b = \frac{B}{2} \quad (14)$$

2-2-2-2. Détermination des périmètres de protection rapprochée et éloignée

Une fois la zone d'alimentation déterminée, on cherche sur la direction d'écoulement les distances en amont et en aval du captage correspondant à un temps de transfert souhaité. Dans le cadre de cette étude le temps de transfert de 60 jours a été utilisé pour la détermination du périmètre de protection rapprochée. Ce temps correspond au temps nécessaire pour l'élimination des polluants mobiles et persistants d'origine microbiologique. Le temps de transfert retenu pour le périmètre de protection éloignée est 3700 jours du fait de la persistance de certains polluants. Ces distances sont calculées à partir des **Formules** suivantes :

$$S_0 = \frac{1 + \sqrt{1 + 8X_0}}{2} \quad (15)$$

$$\text{Et } S_u = \frac{(-1) + \sqrt{1 + 8X_0}}{2} \quad (16)$$

$l = v_0.t$ où v_0 correspond à la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine, son expression est :

$$V_0 = \frac{K.i}{n} \quad (17)$$

S_0 : distance en amont du captage depuis le forage jusqu'à la distance correspondant au temps t souhaité en mètre ; S_u : distance en aval du captage sur l'axe d'écoulement depuis le forage jusqu'à la distance correspondant au temps t souhaité ; t : temps de transfert de l'eau souterraine en jour.

Le rayon perpendiculaire à l'écoulement au droit du forage de l'ellipse qui représente l'isochrone calculé est D_p :

$$D_p = \sqrt{a^2 - (a - s_u)^2} \quad (18)$$

$$\text{avec, } a = \frac{S_0 + S_u}{2}$$

Une fois que les grandeurs B, X_0 , b, S_0 et S_u sont connues, il faut dessiner les périmètres de protection. Les périmètres de protection rapprochée et éloignée définissent une forme d'ellipse.

2-2-3. Estimation des périmètres et surfaces de protection

Le périmètre d'une ellipse est déterminé à partir de l'**Équation** :

$$P=2\pi \left(\frac{\frac{3}{2}a^2 + \frac{3}{2}b^2}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (19)$$

avec, a = grand rayon de l'ellipse en m ; b = petit rayon de l'ellipse en m ; P = périmètre de l'ellipse en m.

En se basant sur les rayons obtenus avec la méthode de Wyssling ***l'Équation 19*** devient :

$$P=2\pi \left(\frac{\left(\frac{L_0}{2}\right)^{\frac{3}{2}} + Dp^{\frac{3}{2}}}{2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (20)$$

L_0 correspond à la somme des rayons amont et aval de l'ellipse défini en fonction de l'isochrone choisi.

Les aires de protection équivalentes sont exprimées par ***l'Équation*** suivante :

$$A=\pi ab \quad (21)$$

3. Résultats

3-1. Périmètre de protection immédiate

Le périmètre de protection immédiate est fixé en fonction de la typologie de l'aquifère et de la législation du pays. Les forages de Songon captent les eaux du Continental Terminal. Cette nappe étant une nappe libre, elle correspond au système aquifère de type 2. Le rayon de ce type d'aquifère est fixé à 40 m soit une superficie de 5024 m². Ce périmètre se délimite au moyen d'une clôture cadénassée d'une hauteur d'environ 2 m (***Figure 5***). Les observations de terrain ont montré que les forages de Songon bénéficient d'un rayon de protection et de superficie variable.



Figure 5 : Périmètre de protection immédiate d'un forage à Songon

3-2. Périmètres de protection par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira

3-2-1. Rayons de protection rapprochée et éloignée

Les rayons de protection rapprochée et éloignée sont consignés dans le **Tableau 3**. Il en ressort que dans la zone d'étude, plus le débit d'exploitation est élevé, plus la superficie de la zone d'appel est grande et donc plus le rayon de protection est grand. Cela est dû au fait que lors du pompage il se crée une zone de dépression (zone d'appel) dans laquelle tous les filets liquides se dirigent vers le point de captage. Les dimensions de cette zone sont fonction du débit de pompage et des paramètres hydrauliques de l'aquifère. Pour une protection efficace, le périmètre de protection rapprochée doit couvrir toute la zone d'appel.

Tableau 3 : Rayons de protection rapprochée et éloignée

Forage	Q _{exp} (m ³ /j)	R _{amont} PPR(m)	R _{aval} PPR(m)	R _{perpendiculaire} (m)	R _{aval} PPE(m)	R _{amont} PPE(m)
F1	3648	116	33	61	36	1307
F2	2880	110	28	56	30	1161
F3	2904	107	25	53	27	1166
F4	4968	126	43	71	48	1525
F5	4320	123	40	68	45	1422
F6	3720	116	33	61	36	1320
F7	2928	111	29	56	31	1171
F8	4200	125	41	69	46	1402
F9	5232	133	49	77	57	1565
F10	4416	122	39	67	42	1438
F11	4752	124	40	68	50	1492
F12	4656	123	40	68	44	1477
F13	5040	128	44	72	50	1536
F14	4704	127	44	72	49	1484
F15	4632	120	37	64	40	1473

3-2-2. Périmètres et superficies de protection

Les périmètres ainsi que les superficies de protection rapprochée et éloignée sont consignés dans le **Tableau 4**. Il en ressort que les périmètres ainsi que les superficies de protection rapprochée et éloignée augmentent avec le débit d'exploitation.

Tableau 4 : Périmètres et superficies de protection

Forage	Q _{exp} (m ³ /j)	PPR (m)	S _{PPR} (ha)	PPE (m)	S _{PPE} (ha)
F1	3648	358	1,11	2545	12,86
F2	2880	335	0,96	2262	10,43
F3	2904	322	0,89	2263	9,91
F4	4968	403	1,40	2977	17,49
F5	4320	391	1,32	2780	15,72
F6	3720	360	1,12	2570	13,05
F7	2928	338	0,10	2282	10,65
F8	4200	397	1,35	2748	15,79
F9	5232	432	1,61	3073	19,64
F10	4416	385	1,21	2804	15,52
F11	4752	392	1,33	2907	16,50
F12	4656	391	1,32	2879	16,26
F13	5040	410	1,45	3002	17,20
F14	4704	408	1,44	2906	17,31
F15	4632	375	1,21	2860	15,33

3-3. Périmètres de protection par la méthode de Wyssling

3-3-1. Zone d'alimentation

Les caractéristiques de la zone d'alimentation consignées dans le **Tableau 5** montrent que la largeur B est comprise entre 169 et 359 m, la largeur b est comprise entre 84 et 179 m et la limite aval X_0 varie de 27 à 57 m. Les dimensions de la zone d'alimentation évoluent avec le débit d'exploitation des forages.

Tableau 5 : Caractéristiques de la zone d'alimentation

Forage	Q_{exp} (m ³ /j)	Largueur B (m)	Largueur b (m)	Limite aval X_0 (m)
F1	3648	224	112	36
F2	2880	187	94	30
F3	2904	169	84	27
F4	4968	302	151	48
F5	4320	281	140	45
F6	3720	226	113	36
F7	2928	192	96	30
F8	4200	290	145	46
F9	5232	359	179	57
F10	4416	267	134	43
F11	4752	282	141	45
F12	4656	279	140	44
F13	5040	314	157	50
F14	4704	311	156	50
F15	4632	251	126	40

3-3-2. Rayons de protection rapprochée et éloignée

Les rayons de protection rapprochée et éloignée consignés dans le **Tableau 6** indiquent qu'ils augmentent avec le débit d'exploitation. Les valeurs rayons perpendiculaires obtenues pour les périmètres de protection éloignée ont tendance à surprotéger la partie aval du captage alors que la limite de l'aire d'alimentation (X_0) correspond à la limite au-delà de laquelle le pompage n'a plus d'influence. Par conséquent il est préférable d'utiliser la limite aval de la zone d'alimentation (X_0) de l'ouvrage à protéger.

Tableau 6 : Rayons de protection rapprochée et éloignée

Forage	Q_{exp} (m ³ /j)	Ramont S_0 PPR(m)	Raval S_u PPR(m)	R_{perp} PPR (m)	Ramont PPE(m)	Raval PPE(m)	R_{perp} PPE(m)
F1	3648	105	42	66	3906	1307	523
F2	2880	100	37	61	3895	1161	478
F3	2904	97	34	58	3889	1166	454
F4	4968	114	52	77	3930	1525	607
F5	4320	112	50	74	3923	1422	585
F6	3720	105	43	67	3907	1320	526
F7	2928	100	38	62	3896	1171	485
F8	4200	113	51	76	3926	1402	596
F9	5232	121	59	84	3947	1565	662
F10	4416	110	48	73	3920	1438	573
F11	4752	112	50	75	3924	1492	587
F12	4656	112	50	74	3923	1477	584
F13	5040	116	54	77	3934	1536	620
F14	4704	115	53	78	3933	1484	617
F15	4632	108	46	70	3914	1473	554

3-3-3. Périmètres et superficies de protection

Les périmètres ainsi que les superficies de protection rapprochée et éloignée consignés dans le **Tableau 7** indiquent qu'ils augmentent avec le débit d'exploitation. Les valeurs moyennes des périmètres et superficies enregistrées au niveau du champ captant de Songon sont respectivement 451 m et 1,78 ha pour les périmètres de protection rapprochée puis 8078 m et 354,17 ha pour les périmètres de protection éloignée.

Tableau 7 : Périmètres et superficies de protection des forages

Forage	Q _{exp} (m ³ /j)	PPR (m)	S _{PPR} (ha)	PPE (m)	S _{PPE} (ha)
F1	3648	422	1,54	7963	326,88
F2	2880	390	1,31	7845	297,16
F3	2904	372	1,2	7782	281
F4	4968	483	2,02	8201	383,83
F5	4320	467	1,9	8137	368,78
F6	3720	424	1,55	7970	328,56
F7	2928	394	1,34	7860	301,10
F8	4200	474	2,00	8166	375,74
F9	5232	523	2,37	8365	421,74
F10	4416	458	1,82	8100	360,13
F11	4752	468	1,9	8141	369,70
F12	4656	466	1,88	8133	367,90
F13	5040	492	2,10	8237	392,32
F14	4704	490	2,08	8228	390,26
F15	4632	444	1,70	8047	347,40

3-4. Cartographie des Périmètres de Protection

Les **Figures 6a, 6b, 6c et 6d** illustrent les périmètres de protection obtenus avec la méthode de Wyssling. Les périmètres de protection définis à partir de la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira ne seront pas représentés car ils sont contenus dans ceux déterminés par la méthode de Wyssling. Ils sont orientés suivant le sens d'écoulement des eaux souterraines. La **Figure 6a** présente les ouvrages les plus proches de la zone industrielle (F9, F10 et F13). L'analyse de cette figure indique que la zone industrielle ne se situe pas à l'intérieur des périmètres de protection rapprochée et éloignée. Elle est située à environ 15 Km des forages les plus proches. Cependant malgré la distance, son emplacement actuel en amont du champ captant peut être source de contamination si les eaux usées industrielles sont mal gérées ou non traitées. Les polluants persistants peuvent s'infiltrer et atteindre la nappe du Continental Terminal. La **Figure 6b** illustre les périmètres de protection des forages F1, F4, F7, F11. Cette figure montre que les périmètres rapprochés et éloignés renferment des sites habités, des routes bitumées et des voies non revêtues. La visite de terrain a permis d'identifier d'autres activités telles que des plantations d'hévéa, de manioc et de palmier à huile dont l'entretien nécessite utilisation de produits phytosanitaires (herbicides, pesticides, engrais) dans le périmètre de protection rapprochée des forages F4, F7, F11 et le village de Songon Agban Attié dans le périmètre rapproché du forage 1 avec le risque de contamination par les eaux usées domestiques. La **Figure 6c** illustre les périmètres de protection des forages F14, F6, F5, F2. Sur cette carte, les périmètres de protection rapprochée ne renferment pas d'activités potentielles de contamination des eaux souterraines mais plutôt des routes bitumées. Dans les périmètres de protection éloignée se trouvent des villages. La visite de terrain a montré la présence de plantations industrielles et fermes agricoles. Par contre, les forages 2 et 5 sont les plus agressés car leurs zones de protection rapprochée renferment des villages et des fermes agricoles constituant un risque de contamination des eaux souterraines. L'illustration des périmètres de protection des forages F8, F3, F12, F15 représentée à la **Figure 6d** montre l'existence de route bitumée, de route non

revêtu et des habitations où les eaux usées sont stockées dans les fosses septiques dont les eaux constituent un risque de contamination important pour les eaux souterraines. Les périmètres immédiats des forages 3 et 8 sont entourés par les activités agricoles (hévéculture) utilisant des produits phytosanitaires dangereux pour les eaux souterraines.

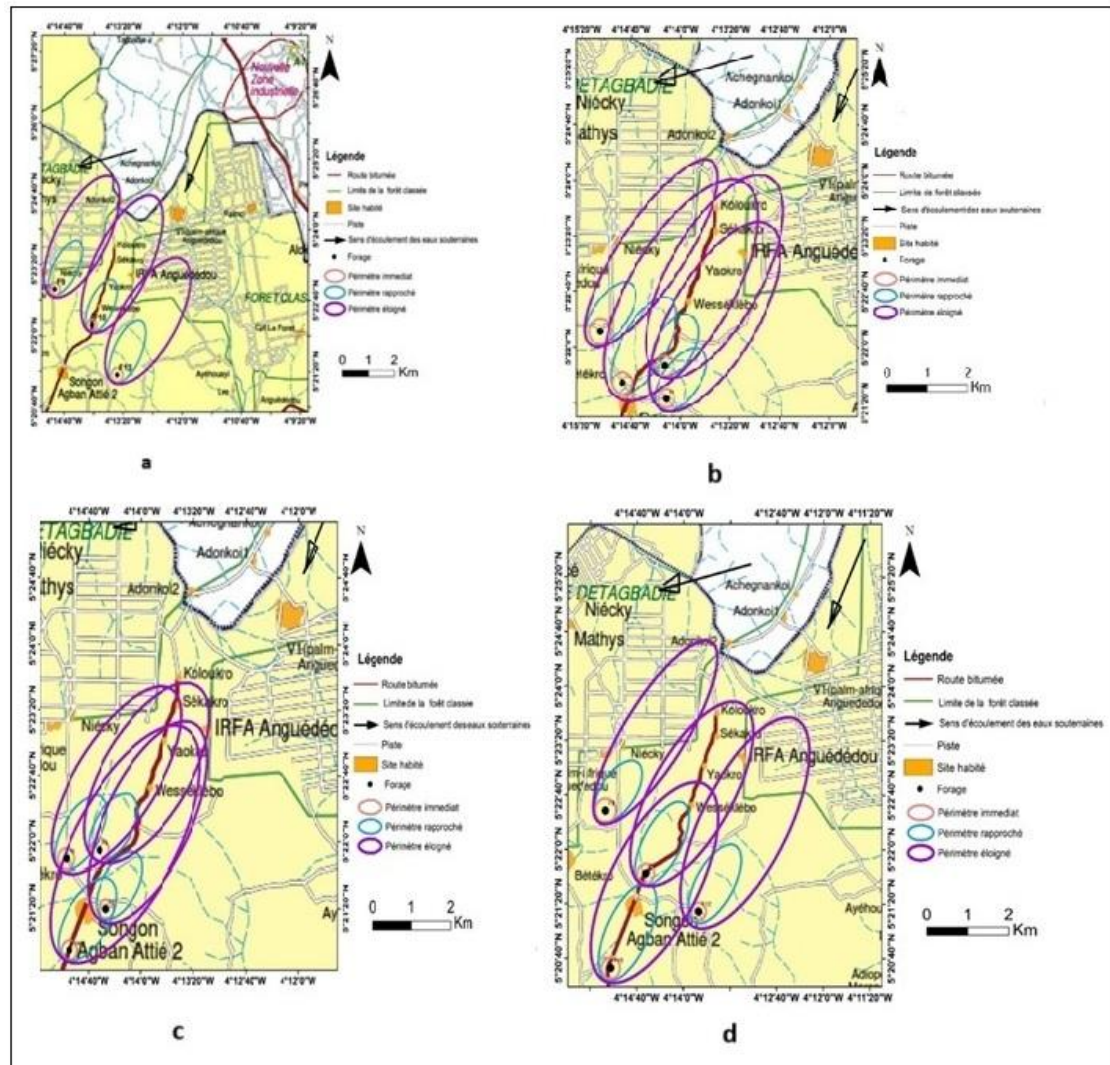


Figure 6 : Illustration des périmètres de protection des forages du champ captant de Songon : a (F9, F13, F10), b (F1, F4, F7, F11), c (F14, F6, F5, F2), d (F8, F3, F12, F15)

4. Discussion

Le rayon de délimitation des périmètres de protection immédiate défini est de 40 m [12]. Le rayon de délimitation varie d'un pays à un autre. En Angleterre, Ecosse, Irlande du Nord le rayon minimal est de 50 m tandis qu'au Pays-Bas et au Québec il est de 30 m. Des études antérieures ont permis de prévoir un rayon de 30 m autour des ouvrages [11]. Cependant, sur le terrain, les rayons des PPI varient entre 10 et 30 m. Le périmètre de protection immédiate augmente lorsque les risques de pollution sont importants [1]. Il sera préférable d'utiliser un rayon plus important pour les ouvrages de captage de Songon afin de 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. La zone de protection immédiate définie suivant un rayon de 40 m va

permettre de couvrir une grande superficie. Cette surface va favoriser l'isolement des ouvrages qui seront éloignés des activités anthropiques et des habitations, limitant ainsi l'infiltration et la migration directe de polluants. Les rayons amont de délimitation des périmètres de protection rapprochée déterminés à partir de la méthode analytique de Krijgsman et Lobo-Ferreira, compris entre 107 et 133 m, sont plus élevés que les rayons obtenus avec la méthode de Wyssling qui varient de 97 à 121 m. En se basant sur d'autres travaux qui recommandent un rayon amont minimal de 100 m pour des forages à grand débit [1], les rayons amont obtenus avec les deux méthodes analytiques sont des résultats satisfaisants. Sauf le rayon amont du périmètre de protection rapprochée du forage F3 obtenu avec la méthode de Wyssling qui ne couvre pas suffisamment la superficie à protéger. Les périmètres de protection rapprochée définis par la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira reflètent mieux la réalité car les valeurs obtenues sont raisonnables comparativement aux valeurs définies par le code de l'eau de la Côte d'Ivoire (rayon maximal : 5 km) et la méthode de Wyssling. Les études antérieures menées sur les nouveaux champs captants du District d'Abidjan dont celui de Songon ont permis la détermination des périmètres de protection à partir de la méthode numérique [16]. Les rayons des périmètres rapprochés déterminés avec cette méthode sont supérieurs à ceux obtenus avec la méthode analytique de Krijgsman et Lobo-Ferreira. Ces rayons amont et aval varient respectivement de 176 à 454 m et de 102 à 309 m. Cette différence peut s'expliquer par la méthode appliquée pour la détermination des périmètres de protection et les données utilisées. Les rayons amont des périmètres de protection rapprochée déterminés à partir de la méthode Krijgsman et Lobo-Ferreira varient de 107 à 133 m. Ces valeurs sont conformes à la distance minimale de 100 m recommandée pour tous les forages à grand débit. Les rayons aval de ces forages varient de 25 à 49 m avec la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira. Les travaux exécutés sur les anciens champs captants du District d'Abidjan [17] ont permis d'avoir les rayons différents des rayons obtenus avec les forages du champ captant de Songon.

Ces valeurs varient respectivement pour les rayons amont de 130 à 185 m et de 37 à 92 m. Cette différence de valeurs est due au fait que les données utilisées pour le calcul des rayons sont différentes. En effet, les valeurs de débits d'exploitation et de conductivité hydraulique considérées sur les anciens champs captants sont élevées par rapport aux valeurs utilisées dans cette étude. De même, les valeurs des épaisseurs saturées des forages sont faibles par rapport à celles du champ captant de Songon. Elles varient de 34,45 à 86 m alors que ceux de Songon varient de 92,95 à 118,49 m. Pour les périmètres de protection éloignée, les rayons amont des forages varient de 1161 à 1536 m pour la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira et de 3889 à 3947 m pour la méthode analytique de Wyssling. Dans certains pays le périmètre de protection éloignée est facultatif car la surveillance des activités au sein de ce périmètre est difficile. Les rayons amont des périmètres de protection éloignée déterminés avec la méthode analytique de Wyssling sont très élevés par rapport aux valeurs obtenues avec la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira. Ces différences de valeurs sont dues à l'imprécision de la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira dans la détermination des périmètres de protection éloignée. En effet, lors de la délimitation des périmètres de protection éloignée la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira ne tient pas compte de la configuration de l'aquifère et du gradient hydraulique. Alors les périmètres de protection éloignée définis par la méthode de Wyssling reflètent mieux la réalité car cette méthode intègre mieux les données hydrogéologiques de l'aquifère. Contrairement aux rayons obtenus à partir de la méthode des abaques [18], la méthode de Wyssling représente mieux la réalité. Elle est la plus appropriée pour la délimitation des périmètres de protection éloignée autour des ouvrages de captage et a permis d'obtenir des rayons qui assurent une protection maximale par rapport à la méthode de Krijgsman et Lobo-Ferreira. Les rayons amont définis par la méthode de Wyssling sont conformes à la norme internationale qui recommande un rayon amont minimal de 800 m pour des forages à grand débit [1]. Ils sont également en accord avec le code de l'eau de la Côte d'Ivoire qui prévoit un rayon maximal égal à 10 km.

5. Conclusion

Cette étude de protection du champ de captant de Songon, qui alimente la population abidjanaise nous a conduit à une analyse du milieu physique et humain. La détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine destinés à l'alimentation en eau potable, constitue l'unique moyen pour la sauvegarde de la qualité naturelle de l'eau produite. Les dimensions des périmètres de protection immédiate, rapprochée et éloignée des ouvrages de captage ont été déterminées par les méthodes de Krijgsman et Lobo-Ferreira et celle de Wyssling. Ces méthodes nécessitent la connaissance de l'épaisseur de l'aquifère, de la perméabilité, du gradient, de la porosité efficace et du débit d'exploitation de l'ouvrage. Elle suppose l'existence d'un milieu homogène et infini. Les valeurs des rayons de délimitation des périmètres obtenues sont de 40 m pour le PPI, 97 à 133 m pour le rayon amont des PPR, 34 à 59 m pour le rayon aval des PPR et PPE, 50 à 600 m pour le rayon perpendiculaire à l'écoulement au droit du forage pour les PPR et les PPE, 1000 à 4000 m pour le rayon amont des PPE.

Remerciements

Nous tenons à remercier la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI), pour la mise à disposition des données de forages utilisées dans cette étude.

Références

- [1] - T. BUSSARD, Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants. Thèse n° 3277 (2005) de l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne présentée à la faculté environnement naturel, architectural et construit. Institut des infrastructures, des ressources et de l'environnement section de génie civil, (2005) 162 p.
- [2] - N. SORO, L. OUATTARA, K. DONGO, K. E. KOUADIO, K. E. AHOUSSE, G. SORO, M. S. OGA, I. SAVANE et J. BIEMI, Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological. Chemical Sciences*, Vol 4, N°6 (2010) 2203 - 2219
- [3] - K. E. AHOUSSE, M. S. OGA, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, N. SORO et J. BIEMI, Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 5 (5) (2011) 2114 - 2132
- [4] - L. KOUADIO, S. ABDOULAYE, J. P. JOURDA, M. LOBA et A. RAMBAUD, Conséquences de la pollution urbaine sur la distribution d'eau d'alimentation publique à Abidjan. *Cahiers de l'Association Scientifique Européenne pour l'Eau et la Santé*, Vol. 3, N°1 (1998) 61 - 75
- [5] - M. S. OGA, Ressources en eau souterraine dans le Grand Abidjan (Côte D'Ivoire) : Approche hydrochimique et isotopique. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, (1998) 245 p.
- [6] - J. P. JOURDA, K. J. KOUAME, M. B. SALEY, B. H. KOUADIO, Y. S. OGA et K. S. DEH, Contamination of the Abidjan Aquifer by sewage : An assessment of extent and strategies for protection. Ground water pollution in Africa, Editors YongxinXu and Brent Usher, Taylor and Francis/Balkema, Great-Britain, (2006) 291 - 300
- [7] - K. J. KOUAME, 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, (2007) 229 p.
- [8] - INS, Répertoire des localités, District autonome d'ABIDJAN, (2014) 18 p.

- [9] - K. E. AHOUSSE, Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2008) 270 p.
- [10] - B. F. LOROUX, Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier de Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat de 3ème cycle ; Université de Bordeaux I, N° 1429 (1978) 93 p.
- [11] - BNETD, 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, Direction de l'Hydraulique Humaine, (2008) 109 p.
- [12] - B. KRIJGSMAN et J. P. LOBO-FERREIRA, A new methodology for delineating wellhead protection areas. University Amsterdam, van Tuyl van Serooskerkenweg, 101 (2001) 12 p.
- [13] - J. BEAR et M. JACOBS, On the movement of the water bodies injected into aquifers. *Journal of Hydrology*, 3 (1965) 37 - 57
- [14] - E. A. GAROUNI et A. MERZOUK, Approche géomatique pour la délimitation des périmètres de protection des ressources en eau souterraine (champ captant). Laboratoire des ressources naturelles et environnement, Faculté des sciences et techniques et le Laboratoire des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Maroc, (2004) 10 p.
- [15] - L. WYSSLING, Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmungsdauer (Laufzeit) des Grundwassers zueinem Grundwasser-Pumpwerk, (1979) 401 - 406
- [16] - A. E. L. EBA, S. K. DEH, G. E. AKE, E. KONAN, R. BALLIET, K. J. KOUAME et J. P. JOURDA, Ouvrages de captage d'eau et périmètres de protection : cas des nouveaux champs captants de Djibi et de Niangon Nord II à Abidjan (Côte d'Ivoire), *Int. J. Adv. Res.*, 10 (11) (2022) 561 - 579
- [17] - K. J. KOUAME, J. P. JOURDA, S. K. DEH, E. J. DJEMIN, M. B. SALEY, A. T. ANANI et J. BIEMI, Apport des méthodes mathématiques dans la détermination des périmètres de protection autour des ouvrages de captage des eaux souterraines d'Abidjan (Côte d'Ivoire), *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 7 (5) (2013) 987 - 2006
- [18] - SAUTY et THIERY, Utilisation d'abaques pour la détermination des périmètres de protection. BRGM 75 SGN 430 AME, (1975) 71 p.