



Le diagnostic qualitatif et environnemental de l'aquifère superficiel de la zone de captage intensif de Godomey et la délimitation de ses zones de protection sont réalisés en vue de proposer des éléments de plan d'actions pour la protection du champ captant de la SONEB. Ce travail s'est basé sur les analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux de cet aquifère et sur les résultats d'un modèle numérique de l'ensemble du système aquifère de la zone. Les résultats d'analyses bactériologiques ont montré que la totalité des échantillons d'eau de puits à grand diamètre prélevés sont contaminés par des germes totaux et Escherichia coli. Quant aux eaux des forages, étant relativement bien protégées, elles ne sont en général pas encore sujettes à une telle pollution. Le diagnostic environnemental a révélé que l'urbanisation anarchique des périmètres de protection, le grand nombre de décharges sauvages d'ordures, les eaux usées domestiques, les sites de teinturerie et les puits individuels transformés en dépotoirs d'ordures sont les sources potentielles de pollution de l'aquifère superficiel de la zone de captage de Godomey.



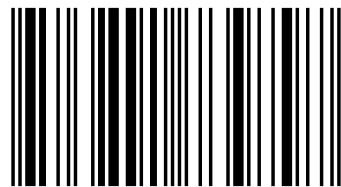
Edia Flavien Dovonou

Le Docteur Flavien Edia DOVONOU est né en décembre 1970 au Bénin. Actuellement Enseignant-Chercheur à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin, il a fait dans ce livre l'état des lieux de la pollution des eaux souterraines au Bénin avant de proposer des mesures de mitigation pour la durabilité de leur gestion.

Edia Flavien Dovonou
Moussa Boukari

Gestion environnementale des aquifères superficiels au Sud-Bénin

Etat des lieux et mesures de protection



**Edia Flavien Dovonou
Moussa Boukari**

Gestion environnementale des aquifères superficiels au Sud-Bénin

**Edia Flavien Dovonou
Moussa Boukari**

**Gestion environnementale des
aquifères superficiels au Sud-Bénin**

Etat des lieux et mesures de protection

Éditions universitaires européennes

Impressum / Mentions légales

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Information bibliographique publiée par la Deutsche Nationalbibliothek: La Deutsche Nationalbibliothek inscrit cette publication à la Deutsche Nationalbibliografie; des données bibliographiques détaillées sont disponibles sur internet à l'adresse <http://dnb.d-nb.de>.

Toutes marques et noms de produits mentionnés dans ce livre demeurent sous la protection des marques, des marques déposées et des brevets, et sont des marques ou des marques déposées de leurs détenteurs respectifs. L'utilisation des marques, noms de produits, noms communs, noms commerciaux, descriptions de produits, etc, même sans qu'ils soient mentionnés de façon particulière dans ce livre ne signifie en aucune façon que ces noms peuvent être utilisés sans restriction à l'égard de la législation pour la protection des marques et des marques déposées et pourraient donc être utilisés par quiconque.

Coverbild / Photo de couverture: www.ingimage.com

Verlag / Editeur:

Éditions universitaires européennes

ist ein Imprint der / est une marque déposée de

OmniScriptum GmbH & Co. KG

Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Allemagne

Email: info@editions-ue.com

Herstellung: siehe letzte Seite /

Impression: voir la dernière page

ISBN: 978-3-8417-3979-7

Zugl. / Agréé par: Cotonou, Université d'Abomey-Calavi, 2012

Copyright / Droit d'auteur © 2014 OmniScriptum GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Tous droits réservés. Saarbrücken 2014

Table des matières

Avant-propos.....	2
Introduction.....	3
Chapitre I : Qualité chimique naturelle des eaux.....	6
1.1 - Eau de pluie.....	6
1.2 - Eau de surface.....	7
1.3- Eau souterraine.....	9
Chapitre II : Pollution des eaux.....	13
2.1 - Mécanisme de pollution.....	13
2.2 - Transfert des polluants.....	14
2.3 - Sources et typologie des contaminants.....	18
2.4 - Vulnérabilité des aquifères à la pollution.....	19
2.5 - Aléas et risques environnementaux associés à la vulnérabilité des aquifères.....	20
2.6- Propriétés physiques et hydrauliques des sols du plateau d’Allada.....	21
Chapitre III : Protection des captages d’eau souterraine contre la pollution.....	23
3.1.- Configuration du réseau d’écoulement des nappes en condition de pompage.....	23
3.2.- Critères de délimitation des zones de protection d’un captage unique.....	24
3.3 - Délimitation des aires de protection d’un champ de captages.....	30
3.4 - Aspects réglementaires et servitudes liées aux zones de protection.....	42
3.5 - Réseau de surveillance et réseau d’alerte.....	44
3.6 - Plan d’intervention et plan de secours.....	45
Chapitre IV : Stratégies de protection des aquifères.....	49
4.1- Efforts de modélisation du système aquifère du plateau d’Allada	49
4.2- Propositions antérieures de périmètres de protection du champ de captage de Godomey.....	54
Chapitre V : Diagnostic environnemental et qualitatif du champ de captage de Godomey et mesures de protection de la ressource.....	59
5.1-Diagnostic environnemental et qualitatif du champ de captage de Godomey.....	59
5.2 - Eléments pour l’élaboration et la mise en œuvre d’un plan d’action stratégique de protection du champ de captage intensif de Godomey.....	82
5.3 -Menaces de contaminations prioritaires et mesures de gestion.....	87
5.4 - Dispositifs de surveillance et d’alerte sur la qualité des eaux du champ de captage.....	91
5.5 - Plan de gestion des imprévus ou catastrophes.....	91
Conclusion.....	93
Références bibliographiques.....	95

Avant-propos

Le développement de l'urbanisation s'est accentué ces dernières années sur le champ de captage de la Société Nationale des Eaux du Bénin situé dans la commune d'Abomey-Calavi au Bénin en Afrique de l'Ouest. Globalement, à l'échelle d'un bassin, l'urbanisation est citée comme l'un des principaux problèmes à l'origine du risque de pollution des ressources en eau. Les impacts de l'urbanisation sur l'eau et les milieux aquatiques sont multiples. En effet, l'eau, nécessaire à la vie et constituant un atout pour le développement, est très sensible à la pollution. En conséquence, elle doit être protégée. C'est l'objectif de cet ouvrage qui aborde la problématique de la gestion environnementale de l'aquifère superficiel de la zone de captage intensif de Godomey, dans le bassin sédimentaire côtier du Bénin en Afrique de l'Ouest.

Cet ouvrage est structuré en cinq chapitres. Le chapitre 1 aborde la qualité chimique naturelle des eaux. Le chapitre 2 traite de la pollution des eaux. Le chapitre 3 aborde la problématique de la protection des captages d'eaux souterraines contre la pollution. Le chapitre 4 traite des stratégies de protection de la ressource. Enfin le chapitre 5 présente le diagnostic qualitatif et environnemental du champ de captage intensif de Godomey et propose les mesures de protection de la qualité de la ressource.

Cet ouvrage a été rédigé sous la supervision du Professeur Moussa BOUKARI, Hydrogéologue et Directeur du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin) à qui je rends un hommage solennel pour son engagement dans la recherche dans le domaine de la gestion des eaux souterraines au Bénin et en Afrique, sans oublier le Professeur Daouda MAMA, Chimiste et Maître de conférences des Universités, Directeur Adjoint de l'Institut National de l'Eau au Bénin.

Introduction

Le sommet du Millénaire des Nations Unies (2000) qui a défini les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD), et le Sommet Mondial sur le Développement Durable (2002) ont convenu de «réduire de moitié, d'ici 2015, le pourcentage de la population qui n'a pas accès à l'eau potable ».

A l'instar de la plupart des pays africains, le Bénin s'est engagé dans l'élaboration et la mise en œuvre de politiques conformes aux Objectifs du Millénaire pour le Développement. Ainsi, au titre des perspectives décennales de développement 2006-2015 en rapport avec les OMD et la vision Alafia 2025, le Bénin fait de la politique de gestion des ressources en eau, une approche de plusieurs objectifs stratégiques opérationnels. En effet, le problème de la qualité de l'eau de boisson est un problème universel. Par rapport à d'autres régions du monde, le Bénin est doté d'eau douce en abondance. Celle-ci mérite d'être gérée judicieusement et d'être préservée contre toutes formes de pollution.

L'aquifère du plateau d'Allada, intensivement exploité à Godomey pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou, est le plus abondant des aquifères du Continental Terminal des trois plateaux qui occupent la moitié méridionale du bassin sédimentaire côtier, avec une superficie d'environ 2000 Km² (Boukari, 1998). Il s'agit d'un système très vulnérable du fait de ses caractéristiques intrinsèques, de l'occupation de ses superficies par les populations, de son voisinage avec l'Océan Atlantique, le lac Nokoué et la lagune de Cotonou.

Dans le contexte actuel de la politique de gestion durable des ressources en eau au Bénin, l'identification du risque de pollution et la protection de ces ressources sont d'une importance capitale. Il s'agit de sauvegarder la qualité de ces ressources à moyen et à long termes. Cette protection peut débiter par la délimitation des zones susceptibles d'être atteintes par la pollution que l'on qualifiera de zones vulnérables ou à risques. L'urbanisation anarchique des périmètres du champ de captage, la mauvaise gestion des déchets solides ménagers et biomédicaux, l'absence d'une

politique d'assainissement des eaux usées domestiques et industrielles, l'utilisation d'engrais chimiques en grande quantité par les maraîchers le long des plans d'eau qui ceinturent le champ sont autant de potentielles sources de pollution des eaux souterraines.

L'objectif général de ce travail est de faire le diagnostic qualitatif et environnemental de l'aquifère superficiel de la zone de captage intensif de Godomey et de jeter les bases d'un plan d'actions stratégiques pour la protection du champ captant de la SONEB.

Les objectifs spécifiques visés sont :

- i) procéder à un diagnostic qualitatif des eaux souterraines et de l'environnement dans le champ captant ;
- ii) évaluer le degré actuel de pollution de l'aquifère superficiel dans les périmètres du champ ;
- iii) identifier et répertorier les sources potentielles de pollution des eaux souterraines à l'intérieur et au voisinage du périmètre du champ captant ;
- iv) délimiter des périmètres de protection requis pour le champ de captage de Godomey sur une base scientifique ;
- v) identifier et proposer des éléments de base pour un plan d'actions stratégiques de protection du champ de captage intensif de Godomey.

Pour atteindre ces objectifs, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- le mode de gestion actuel des déchets solides et liquides par les occupants du périmètre de captage intensif de Godomey ne contribue pas à garantir à moyen et à long termes, la bonne qualité chimique et bactériologique du système aquifère sous-jacent ;
- la pollution des plans d'eau avoisinant le périmètre de captage intensif de Godomey constitue, entre autres, des sources potentielles de pollution des eaux souterraines de ce champ ;

- il est encore possible de délimiter et de mettre en place des périmètres de protection pour le champ de captage de Godomey.

L'approche scientifique utilisée pour la délimitation de ces périmètres repose sur les résultats du modèle du système aquifère de ce champ captant réalisé entre 2004 et 2010 par la Direction Générale de l'Eau, avec l'appui de la DANIDA et de l'Université d'Abomey-Calavi. Bien que cette délimitation ne fasse pas partie de l'objectif de cet effort de modélisation, les résultats obtenus en ce qui concerne la zone de contribution et celle du rabattement sont exploitables pour une telle délimitation, ce qui veut dire que la qualité de notre résultat de délimitation dépend intimement de celle de ce modèle.

Chapitre I : Qualité chimique naturelle des eaux

1.1- Eau de pluie

Il est difficile de parler de qualité naturelle des eaux de pluie, car elles subissent la pollution atmosphérique avant même d'arriver au sol. L'effet le plus spectaculaire de cette pollution est l'acidité. Mais, même sans cette pollution, en raison de leur teneur en dioxyde de carbone CO_2 qui est toujours présent dans l'atmosphère, ces eaux de pluie sont naturellement acides (www.eautarci.com). Le pH de l'eau de pluie est régulièrement contrôlé depuis les années 1970 à travers le monde (André, 1995). Selon le même auteur, le pH de l'eau de pluie, de par le monde, est toujours inférieur à 7, ce qui s'explique aisément : l'eau dissout de nombreux gaz lorsqu'elle se condense dans les nuages et lorsqu'elle tombe. Or le gaz qui vient en quatrième position par ordre d'abondance dans l'atmosphère sèche est le dioxyde de carbone. André (1995) rapporte également que les mesures faites aux Etats-Unis ont donné des pluies plus acides que le vinaigre dont le pH est 2, 8. A cette acidité naturelle s'ajoute l'acidité due à la présence d'oxydes d'azote NO_x et du dioxyde de soufre SO_2 qui sont rejetés lors de la combustion des combustibles classiques comme le pétrole et le charbon (Gilli et al., 2008). En effet, l'oxyde d'azote dissous dans l'eau formera de l'acide nitreux HNO_2 et de l'acide nitrique HNO_3 , tandis que le dioxyde de soufre produira de l'acide sulfureux H_2SO_3 qui s'oxydera à l'air en acide sulfurique H_2SO_4 (Gilli et al., 2008).

Dans notre sous-région ouest-africaine, Yoboué et al., (2005) ont étudié la composition chimique des eaux de pluie en Côte d'Ivoire de 1995 à 2002 (région de Lamto). Il ressort de ces études que la composition chimique moyenne de ces eaux se présente comme suit : 17,6 $\mu\text{eq/L}$ d'ammonium ; 30,5 $\mu\text{eq/L}$ de nitrates ; 30,8 $\mu\text{eq/L}$ de calcium. Ces valeurs sont proches de celles obtenues par Galy-Lacaux et al. (2008) qui ont étudié la composition chimique des eaux de pluie dans un écosystème de savane au Niger de 1984 à 2005. Dans ces eaux, les carbonates représentent 40 % des ions qui y sont présents. La teneur en nitrates est de 18,1 $\mu\text{eq/L}$ et celle des nitrites de 11,6 $\mu\text{eq/L}$. La teneur en chlorures de sodium est de 8,7 $\mu\text{eq/L}$. Ces valeurs sont

cependant différentes de celles obtenues au Cameroun en Afrique centrale, par Sigha-Nkamdjou et al., (2003), qui ont étudié la composition chimique des eaux de pluie dans cet écosystème forestier sous climat équatorial. Ces eaux, suivies entre 1999 et 2000, ont donné la composition chimique suivante : 10,5 µeq/L de nitrates ; 6,9 µeq/L de nitrite ; 8,9 µeq/L de calcium ; 5,1 µeq/L de sulfate. Il en ressort que la composition chimique de l'eau de pluie varie sensiblement d'un endroit à un autre.

Au Bénin, les données sur la qualité physico-chimique des eaux de pluie sont rares. Une étude réalisée par Boukari (1998) a révélé que les eaux de pluie de la ville de Porto-Novo contiennent : 34,4 µeq/L de chlorures ; 19,2 µeq/L de sulfate ; 3,6 µeq/L de magnésium ; 34,8 µeq/L de sodium et 14,8 µeq/L de nitrates. La teneur élevée de ces eaux en chlorures et en sodium témoigne de l'influence de l'embrun marin sur la composition chimique des eaux de pluie à Porto-Novo et le long de la côte béninoise en général.

1.2 - Eau de surface

Selon Chevallier (2007), la qualité physico-chimique des eaux de surface est soumise à des processus d'évolution naturelle depuis la source jusqu'à l'embouchure :

- évolution du transport solide : les courants charrient en amont les matériaux grossiers, et en aval, des particules plus fines ; ainsi la taille des dépôts décroît vers l'aval ;
- évolution biologique : l'activité biologique et, en particulier, la présence de bactéries, augmente de l'amont vers l'aval, avec des implications pour la décomposition des matières organiques. L'introduction de matières organiques dans le cours d'une rivière par exemple, modifiera en aval ses conditions environnementales naturelles ;
- diminution de l'oxygène dissous : elle est due à la dégradation aérobie de la matière organique : ce phénomène constitue, sous des conditions spécifiques, un processus d'auto-purification ;

- modification des paramètres physico-chimiques : augmentation de la température, du pH, et de la concentration en ammoniac (NH_3) ;
- sédimentation des boues anaérobies, avec libération de gaz méthane (CH_4) et de sulfure de fer (pyrites de fer) ;
- évolution de la minéralisation chimique et organique : les concentrations de matières organiques et des minéraux dissous croissent de l'amont vers l'aval et causent l'eutrophisation.

Selon Mama (2010), l'eutrophisation peut être causée par des processus naturels (épisodes saisonniers de prolifération d'algues lacustres par exemple) ou artificiels (pollutions, excès d'éléments minéraux, phosphates provenant de détergents, etc.).

Les étapes du processus sont les suivantes : augmentation de la population de phytoplancton, augmentation de la turbidité, concentrations des algues dans les couches supérieures et mort soudaine de la végétation, suivie de l'installation de matières organiques, de la diminution des niveaux d'oxygène dissous (Albinet, 1970).

L'eutrophisation conduit à une augmentation significative du pH liée à une libération de substances toxiques, telles que NH_3 , qui affecte négativement la qualité de l'eau destinée à la consommation (Bhatt, 1993).

Le suivi de la qualité des ressources en eau de surface du Bénin devient de plus en plus une préoccupation des acteurs du secteur de l'eau. Le pays ne dispose pas en effet d'un système organisé et opérationnel de collecte, de centralisation et de traitement des données se rapportant à la qualité des eaux de surface. Toutefois, la Direction Générale de l'Eau considère que des données intéressantes existent dans le pays à travers des mesures et études effectuées à différentes époques par diverses institutions. Il paraît de toute évidence que le déficit de centralisation et de traitement par un organisme compétent devra être corrigé pour une meilleure valorisation de ces données indispensables pour l'appréciation de l'évolution du profil de la qualité de ces eaux.

Des observations et analyses faites par l'ORSTOM (actuellement IRD), vers la fin des années 60, par l'ex-Université Nationale du Bénin dans les années 80, et le groupement GIGG en 1983, il ressort que les eaux du domaine lagunaire de Cotonou sont souvent très douces et très peu minéralisées (entre 50 et 100 mg/L) et ont un pH de 6,8 à 7,2. D'après ces mêmes sources, une couche salée très fortement minéralisée (plus de 15 g/L) existe dans la partie aval du cours de l'Ouémé, celle-ci est surmontée d'une couche à salinité variable de l'ordre de 5 g/L en fonction des périodes de l'année.

1.3 - Eau souterraine

Aux limites amont, aval, latérales et supérieure d'un aquifère, des échanges importants peuvent avoir lieu avec les eaux de surface. Ainsi, en tout point d'un aquifère à nappe libre et dans le secteur amont d'un aquifère captif, l'infiltration des eaux de précipitation et de ruissellement permet une recharge en eau du système aquifère (Banton et al., 1997). Dans certaines conditions hydrodynamiques, l'infiltration des eaux des rivières et des lacs peut aussi contribuer de façon significative à la recharge de la nappe (Bradbury et al., 1991).

L'eau souterraine contient également des substances (gaz, liquides ou solides) dont les concentrations et la stabilité dépendent de paramètres tels que le pH du milieu, la texture des sols (Carter et al., 1987). La qualité des eaux souterraines est le résultat d'une acquisition naturelle de minéralisation à laquelle se surajoutent les apports anthropiques (Champagne et Chapuis, 1993). Du point de vue naturel, Les eaux souterraines ont acquis leurs caractéristiques physico-chimiques à la traversée des différents compartiments du cycle de l'eau : atmosphère, sol, eau de surface, zone non saturée, aquifère noyé (Gilli et al., 2008). Selon le même auteur, l'atmosphère apporte, entre autres, chlorures, sulfates, sodium et potassium en provenance des aérosols marins, mais aussi des composés portés par la pollution atmosphérique (sulfates, nitrates, hydrocarbure...) provenant de la combustion des combustibles fossiles (charbon, pétrole) par les centrales thermiques, le chauffage domestique, la circulation automobile, ou les poussières arrachées aux sols nus notamment. Le sol

est la première interface entre l'eau et les minéraux : les carbonates, sulfates de calcium ou de magnésium y sont dissous. Les silicates s'y altèrent en argiles, libérant comme ions : le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium. Ces dissolutions et hydrolyses sont rendues possibles grâce à la chaleur et à la présence de dioxyde de carbone produit dans le sol par l'activité biologique. En effet, dans le sol, la dégradation de la matière organique, produit du CO₂, des nitrates, du potassium notamment, ainsi que des acides humiques et fulviques (Chapuis, 1999). Ces derniers vont se minéraliser au cours du temps (CO₂), constituant ainsi un potentiel de dissolution des carbonates et d'altération des silicates dans la zone non saturée et même dans la zone noyée des nappes sous-jacentes. La zone non saturée et la zone noyée constituent, elles aussi, des interfaces eau-roche, sur lesquelles l'eau se minéralise. Selon Lallemand-Barrès et Roux, (1989), les qualités des eaux souterraines sont assez bien connues, notamment parce que leur captage concourt, dans une large mesure, à l'alimentation en eau potable des populations (environ 63% des productions d'eau sont à cette fin, en comptant les eaux de source) et que dans ce cadre, elles sont régulièrement contrôlées. Les eaux souterraines sont plus ou moins minéralisées en fonction :

- * de la nature des roches, et des minéraux rencontrés au cours de l'infiltration ;
- * du temps de contact de l'eau avec ses minéraux, donc de la vitesse de percolation de l'eau dans le sous-sol ;
- * du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration.

On voit l'importance des minéraux solubles des roches et de la conductivité hydraulique de l'aquifère dans la minéralisation de l'eau. Dans l'aquifère, il s'établit un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle des roches : l'eau prend une minéralisation qui demeure stable dans le temps et sert à caractériser un faciès hydrochimique (Chevalier et al., 2001).

Dans les réservoirs calcaires, les eaux sont dures, moyennement à fortement minéralisées en sels de calcium et magnésium ; elles entartrent les conduites au cours de leur exploitation en eau d'alimentation (www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraine).

Dans les réseaux karstiques, l'eau peut se charger de particules argileuses en suspension au cours des fortes pluies (www.epa.gov/ada).

Au contact du gypse, l'eau se charge en sulfate de calcium et devient dure (séléniteuse) et impropre à la consommation (Lallemand-Barrès et Roux, 1989).

L'eau des nappes alluviales a une qualité qui dépend de celle de la rivière. Selon Dalton et al. (1981), la chimie des eaux souterraines est dominée par la présence de certains ions plus abondants que d'autres dans les systèmes hydrogéologiques, ou plus facilement mis en solution. Ces ions sont ainsi appelés des ions majeurs. Ce sont dans un ordre non relié à leur abondance relative possible : le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium, pour les cations, ainsi que le bicarbonate, le carbonate, les chlorures et le sulfate, pour les anions. Fréquemment, la silice, sous ses diverses formes, est aussi considérée comme un élément majeur et regroupée avec les ions-majeurs. A côté de ces éléments majeurs, certains autres ions qualifiés d'éléments mineurs peuvent aussi être retrouvés dans les eaux, mais en fréquence et abondance moindres : le bore, le fer, le fluor, le manganèse, le nitrate, le strontium (Dupuis, 1963). Tous les autres ions ou éléments sont qualifiés d'éléments traces, apparaissant normalement en concentration très faible. En bordure de mer, les aquifères peuvent être en contact avec l'eau de mer. Il intervient un échange au niveau de l'interface eau douce-eau salée, avec contamination de l'eau d'infiltration par les embruns salés. L'eau de la nappe devient plus ou moins saumâtre. L'invasion de la nappe d'eau douce par l'eau salée est accélérée par les pompages et le rabattement de la nappe (Boukari, 1998). C'est le cas du champ de captage de Godomey, notre zone d'étude. Sur ce champ, les paramètres suivants (conductivité, minéralisation totale et résidu sec) tendent à augmenter du Nord vers le Sud. Cette tendance caractérise également tous les éléments analysés à l'exception des nitrates, des sulfates, et des fluorures pour lesquels aucune tendance ne se dégage (Boukari, 1998). Selon le

même auteur, en ce qui concerne les chlorures, le gradient de concentration montre une tendance à croître latéralement de la partie centrale du secteur vers le lac Nokoué à l'Est et la mer au Sud. Les données des prélèvements d'août 1991 et 1992 révèlent que les échantillons provenant des piézomètres situés entre le champ de captage et l'océan présentent un faciès bicarbonaté calcique. Ceux provenant des piézomètres du champ de captage sont soit bicarbonatés calciques soit bicarbonatés sodiques voir chlorurés sodiques (Boukari, 1998).

Retenons que la qualité chimique des eaux de pluie varie en fonction des milieux géographiques et est le reflet des particules chargées de l'atmosphère. Elle varie aussi en fonction des régions. Les eaux de surfaces sont au contact direct avec le sol et sont sujettes à la pollution chimique et bactériologique due en grande partie aux activités anthropiques. Par contre, les eaux souterraines étant contenues dans des couches géologiques, elles ne sont pas directement exposées à la pollution anthropique et leur qualité chimique et même bactériologique est souvent meilleure à celle des eaux de pluie et de surface.

Chapitre II : Pollution des eaux

Une eau renferme une teneur en substances dissoutes ou en suspension, d'origine naturelle, appelée « bruit de fond ». Le degré de pollution ou contamination est apprécié par la mesure de l'écart entre le bruit de fond et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau incriminée (El Magnouni, 1996).

Un polluant est par conséquent un facteur physique, chimique ou biologique issu de l'activité humaine et provoquant sous une intensité ou une concentration anormale, une altération de la qualité de l'eau naturelle (EPA, 2000).

L'eau souterraine est considérée comme polluée lorsqu'elle contient des substances autres que celles liées à la structure naturelle des terrains où elle a séjourné et en particulier, lorsque les concentrations des constituants dissous ou en suspension dépassent les concentrations maximales admissibles fixées par les standards nationaux ou internationaux (Everet, 1991).

2.1 - Mécanisme de pollution

Le mécanisme de pollution varie suivant les types de nappe (Festiger et Walter, 2002).

Dans une nappe libre, une pollution se produisant à la surface du sol peut s'infiltrer jusqu'à la surface de la nappe.

Dans une nappe captive, la pollution ne peut provenir que d'injections volontaires de déchets liquides par un forage, ou de mise en communication de nappes par des ouvrages non étanches.

Dans un aquifère fissuré, la pollution est introduite par les bétouilles et les puits par l'intermédiaire de la zone non saturée (Gilli et al., 2008).

Ces mécanismes dans le cas d'une pollution due au déversement d'hydrocarbures sont schématisés sur la figure 1.

2.2 - Transfert des polluants

L'extension du panache de pollution dans la nappe dépend de l'écoulement naturel de l'eau qui implique l'entraînement du produit par convection, et de la variabilité des vitesses qui se traduit par la dispersion longitudinale et transversale du panache au cours de sa propagation (Jacobson et al., 2002).

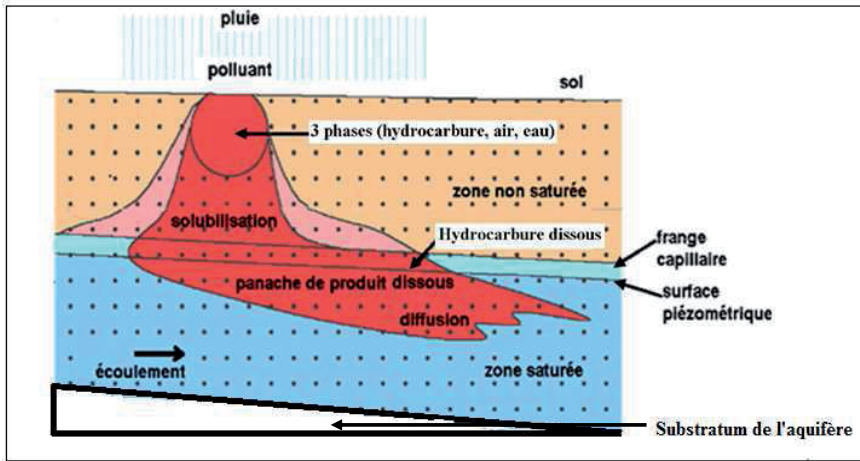


Figure 1 : Mécanisme de transfert d'hydrocarbure après déversement (d'après Lallemand-Barres et Roux, 1989)

2.2.1 - Polluants chimiques

2.2.1.1 - Polluants minéraux

La concentration des polluants dépend de leur solubilité dans l'eau. La solubilité des métaux lourds étant généralement contrôlée par les anions les plus abondants dans l'eau souterraine, la mobilité des métaux lourds dépendra de la solubilité de leurs hydroxydes, carbonates, sulfates, chlorures et sulfures (Jacobson et al., 1994). La solubilité de certains métaux lourds, tels que Fe, Mn, Cu, est très fortement influencée par le pH et le potentiel redox de l'eau et son oxygénation. Les cations peuvent être aussi piégés par les précipités : en effet, des modifications de

propriétés chimiques d'une solution, à savoir par exemple, variation de température, le potentiel redox, le pH, entraînent la précipitation de certains composés, dans lesquels peuvent se trouver piégés des métaux traces. C'est le cas notamment de Cu, Pb, Zn, qui peuvent précipiter avec les hydroxydes de Fe et de Mn (Lemer et al., 1990).

Enfin, les métaux sous forme ionique, seront retenus par échange d'ions ou adsorption, par les argiles, les acides humiques, les hydroxydes, dans le sol et dans la zone non saturée (MEFQ, 1995).

Les réactions d'adsorption-désorption dans les matériaux de l'aquifère entraînent un retard dans le transfert du polluant, qui peut être décrit par le facteur de retard, correspondant au rapport de la vitesse moyenne de l'eau à la vitesse moyenne de transfert du polluant (Miall, 1984).

Les métaux lourds peuvent être partiellement résorbés par d'autres ions en compétition dans l'eau si leur concentration est suffisante. D'autre part, les métaux sont absorbés sélectivement : les hydroxydes de fer fixent préférentiellement Cu, Pb, Hg, Cr tandis que les hydroxydes d'aluminium préfèrent Cu, Ni, Co, Cr, Mo, et les argiles fixent plus volontiers Zn, Cu, Pb, et Hg (Ostry et al., 1987).

La solubilité des polluants, tels que les chlorures, nitrates et sulfates n'est pas un facteur limitant de leurs concentrations, ces sels étant, dans la plupart des cas, solubles.

Selon Seguin (1987), la fixation des anions est en général plus faible que celle des cations dans les sols ; par conséquent, un excédent d'azote nitrique qui se trouve disponible dans le sol risque d'être entraîné vers la nappe, notamment lors de la recharge des nappes. La migration des nitrates vers la nappe peut avoir lieu à l'échelle de l'année (Seguin, 1987).

2.2.1.2 - Polluants organiques

Les substances organiques polaires sont maintenues en solution sous forme moléculaire, par les liaisons hydrogènes. Les substances organiques non polaires sont en général peu solubles dans l'eau. Elles forment une phase non miscible à l'eau (Foster et al., 2002).

Les produits organiques peuvent disparaître dans le sol et dans l'eau souterraine de différentes façons : réactions chimiques aboutissant à des produits non toxiques, et surtout dégradation par les microorganismes. Le type de transformation dépend de l'espèce et porte le nom, suivant le cas, de détoxification, dégradation, activation (Frind et al., 2002).

La dégradation transforme un produit complexe en produits simples. L'activation est la conversion d'une substance non toxique en une molécule toxique. La détoxification consiste en la perte de caractère toxique (Frind et al., 2002).

La dégradation est plus lente dans l'eau souterraine que dans le sol (Goosens et Van Damme, 1987). Elle peut même être utile. Ces transformations peuvent conduire à la destruction complète du polluant ou à la production d'autres polluants organiques. Certaines molécules dites récalcitrantes, ne sont pas métabolisées ou minéralisées suffisamment pour être éliminées (Grubb, 1993).

Un autre mécanisme d'élimination des produits organiques peut être l'adsorption par le sol ; c'est le cas pour les hydrocarbures halogénés et autres composés organiques non polaires (Healy et Cook, 2002). On ne saurait négliger la volatilisation de certains produits, benzène et hydrocarbures chlorés par exemple qui diffusent du sol vers l'atmosphère. Les hydrocarbures non miscibles à l'eau, qui auront atteint la nappe, se déplacent à la surface de celle-ci s'ils sont plus légers que l'eau, ou imprégneront l'aquifère s'ils sont plus denses que l'eau (Healy et Cook, 2002).

2.2.2 - Polluants microbiologiques

Le transfert des bactéries et virus dans les sols, est limité d'une part par la filtration et d'autre part, par l'adsorption.

a) Transfert des polluants microbiologiques par filtration

Le transfert des polluants peut être limité si la taille des pores du milieu poreux est comparable à celle des microorganismes. Le processus de filtration dans une roche constituée de graviers et sables, ne sera pas très efficace, en raison des faibles diamètres des bactéries et des virus, par rapport aux diamètres des pores (Rock, 2002).

Dans l'aquifère, le phénomène de filtration est lié aux conditions hydrauliques (vitesse d'écoulement et direction d'écoulement) (Roy, 1985).

b) Transfert des polluants microbiologiques par adsorption-désorption

L'adsorption des virus et bactéries se fait en quelques heures, selon les travaux de laboratoire. Les virus sont plus fortement adsorbés sur des matériaux colloïdaux que sur les sables (Sanford, 2002).

L'adsorption augmente quand le pH diminue. Par ailleurs, la teneur en cations diminue la mobilité des virus, dont les charges résiduelles négatives sont neutralisées, ce qui favorise l'adsorption par les argiles. Les virus ne sont pas fixés de manière irréversible : des variations de pH, une forte pluie peuvent les libérer (Moreau, 1980).

c) Transfert des polluants microbiologiques par percolation

La percolation dépend de la force ionique du milieu, par exemple les variations dues aux pluies. La saturation du sol est un facteur important : on ne retrouve plus de virus après percolation sur 40 cm de sol non saturé ; par contre, on retrouve 1/10000 des virus après 1,60 m de transfert dans un sol saturé (Sara, 1991). La succession des cycles pluie/séchage provoque l'inactivation des virus (Scanlon et al., 2002).

2.3 - Sources et typologie des contaminants

On distingue généralement deux principaux ensembles de sources de contamination, selon leurs extensions spatiales (USEPA, 1987) :

- *les sources ponctuelles* résultant de l'introduction d'une quantité importante de contaminants à l'intérieur d'un intervalle de temps donné (temps court pour un déversement accidentel et temps long pour une fuite) ; ces sources affectent des zones limitées dans l'espace, d'où le transfert d'importantes concentrations en contaminants dans la zone non saturée du sol.
- *les sources diffuses* résultant de l'introduction d'une quantité faible (ou limitée) de contaminant sur de grandes superficies, d'où le transfert de faible concentration en contaminants dans la zone non saturée du sol.

Selon USEPA (1987), pour ces différentes contaminations, la dimension temporelle peut être rapide (instantanée), lente (continue), chronique (répétitive) ou intermittente (sans cycle défini).

Ces contaminations peuvent intervenir durant les diverses étapes des activités humaines à savoir : l'extraction de matières naturelles, la transformation, la production, l'entreposage, le transport, l'évacuation des sous-produits de fabrication (www.geonics.com). La contamination des eaux souterraines résulte alors de l'émission non contrôlée de composés xénobiotiques, conséquence directe d'activité de production planifiée (www.geonics.com).

Bien que moins fréquentes ou moins visibles, les contaminations « *indirectes* » des eaux souterraines peuvent provenir de la perturbation des réactions ou échanges naturels de matières impliquant l'aquifère, par suite d'activités humaines autres que celles citées, par exemple, une intrusion saline occasionnée par un pompage plus ou moins intensif (www.groundwatersoftware.com).

La typologie des contaminations peut notamment être basée sur quatre critères (Banton et al., 1997) :

- l'importance relative de la contamination au regard de l'exploitation de l'eau ;
- la hiérarchisation des contaminations ou des priorités quant aux impacts négatifs sur l'exploitation de l'eau ;
- le cadre spatio-temporel de l'évolution des contaminations ;
- la nature et l'ampleur des moyens à mettre en œuvre pour limiter les impacts de la contamination ou pour recouvrer une qualité acceptable de l'eau.

2.4 - Vulnérabilité des aquifères à la pollution

La vulnérabilité des aquifères est définie comme une propriété relative, non mesurable et adimensionnelle, basée sur la supposition que l'environnement peut fournir une protection des eaux souterraines contre les impacts anthropiques, en particulier ceux qui sont engendrés par les polluants entrant dans l'environnement souterrain (Vassolo et al., 1998). La vulnérabilité évalue donc la faiblesse de cette protection naturelle. Les eaux souterraines peu profondes sont des ressources aquatiques très vulnérables (Paillet et Pedler, 1996).

La prévention contre la pollution des nappes constitue une étape importante dans la gestion des aquifères, à laquelle les scientifiques consentent de plus en plus d'efforts. Cette étape comporte notamment, l'étude de la vulnérabilité des nappes d'eaux souterraines à la pollution (Hamza et al., 2007).

Selon Gilli et al., (2008), on peut distinguer une vulnérabilité intrinsèque, inhérente au milieu géologique et aux conditions climatiques locales, et une vulnérabilité spécifique, liée aux propriétés du contaminant lui-même.

La vulnérabilité intrinsèque est donc le cas extrême de vulnérabilité spécifique pour un traceur intégralement conservé (par exemple les chlorures) entre son point de déversement et la cible (aquifère ou point de captage). A l'opposé, un corps organique peu mobile et facilement adsorbable ou dégradable ne passera pas de l'amont à l'aval (www.aqtesolv.com).

La vulnérabilité spécifique sera, dans l'immense majorité des cas, moins grande que la vulnérabilité intrinsèque.

L'évaluation et la cartographie de la vulnérabilité sont mises en œuvre selon diverses méthodes. L'étude de la vulnérabilité de la nappe de la région de Cotonou et ses environs a été faite par l'application de la méthode DRASTIC notamment. Elle tient compte des caractéristiques intrinsèques de l'aquifère en exprimant sa prédisposition ou sa vulnérabilité à une pollution liée à une activité provenant de la surface du sol. La méthode DRASTIC prend uniquement en compte les facteurs hydrogéologiques qui influent sur la vulnérabilité. Il s'agit des propriétés physiques qui jouent un rôle dans la migration et l'atténuation d'un contaminant au sein du complexe sol - zone aérée - aquifère. Sept paramètres sont pris en compte : la profondeur du plan d'eau, la recharge efficace annuelle de l'aquifère, la lithologie de l'aquifère, les types de sol, la topographie, l'impact de la zone non saturée et la conductivité hydraulique de l'aquifère. La méthode GOD quant à elle considère trois paramètres : le type d'aquifère, l'impact de la zone non saturée et la profondeur de la nappe. Cette méthode selon Bézégues et *al.*, 2002, permet de réaliser une estimation rapide de la vulnérabilité d'un aquifère.

2.5 - Aléas et risques environnementaux associés à la vulnérabilité des aquifères

La notion de vulnérabilité est souvent associée à celle d'aléa et de risque (Gilli et al., 2008). Un aléa environnemental est défini comme un événement instantané ou un processus continu qui, lorsqu'il se réalise, induit la possibilité de dégrader la qualité de l'environnement, directement ou indirectement.

Par contre, le risque est la conjonction d'un aléa et d'un milieu vulnérable ; par conséquent, un aléa ne présente un risque que lorsqu'il est susceptible d'affecter quelque chose de valeur (la cible), en l'occurrence, les eaux souterraines (Figure 2).

Le risque sur une nappe sera l'effet d'un aléa, par exemple une fuite de polluant industriel, sous le contrôle de la vulnérabilité du milieu aquifère, sans oublier

l'influence de l'écoulement de la nappe, susceptible de déplacer les impacts. Le modèle conceptuel origine-trajet-cible (Figure 2) envisage donc le transfert de l'aléa vers la nappe (vulnérabilité de la ressource), puis vers ses puits de captage (source, forage, puits).

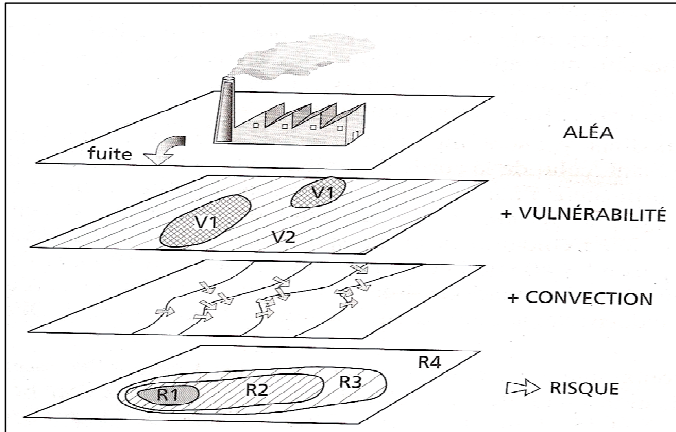


Figure 2 : Facteurs du risque de pollution d'une nappe (d'après Gilli et al., 2008)

2.6 – Propriétés physiques et hydrauliques des sols du plateau d'Allada

Selon Azontondé (1991), les sols du plateau d'Allada sont assez sableux en surface avec 5 à 15% d'argile. Ce taux passe rapidement à 35% entre 30 et 60 cm de profondeur puis à 45 et même 50% au-delà de cette profondeur. Ils présentent une structure particulière à grumeleuse en surface, une structure polyédrique moyenne peu apparente dans l'horizon d'accumulation. L'indice d'instabilité structurale de Henin (I_s) est bon (<1) en surface (10-30 cm) et moyen (1-3) en profondeur. L'indice d'érodibilité (K) de l'équation de prévision de l'érosion, déterminé avec le nomographe de Wischmeier (1962) est assez bon ($\pm 0,5$) en surface, moyen ($\pm 0,1$) en profondeur. Le drainage interne est toujours parfaitement assuré. La perméabilité (K') (conductivité hydraulique) est bonne et varie entre 5 et 8 cm h^{-1} en surface et devient moyenne (3-6 cm h^{-1} en profondeur). La réserve d'eau dans ces sols est sensiblement

constante et varie entre 40 et 50 mm à 30 cm du sol puis entre 60 et 70 mm à 60 cm du sol. Les sols qui sont formés sur le Continental Terminal présentent après la pluie et avant le ressuyage un aspect boueux et très glissant; ce qui leur a valu l'appellation de la "Terre de Barre". Ces sols ont en général de bonnes propriétés physiques et hydrauliques.

En conclusion, nous pouvons dire que de façon générale, les eaux sont exposées à la pollution chimique. Le mécanisme de la pollution des eaux souterraines varie suivant les types de nappe. Une fois la ressource contaminée, le transfert des polluants (minéraux ou organiques) s'effectue suivant deux composantes, à savoir la composante verticale et la composante horizontale. Par contre, le transfert des bactéries et virus dans les sols, est limitée d'une part par la filtration et d'autre part, par l'adsorption. Les sources de contamination des eaux souterraines sont soit ponctuelles soit diffuses. La vulnérabilité des aquifères à la pollution nécessite la prévention contre la pollution de la ressource, car il est plus facile de dissoudre un morceau de sucre dans un verre d'eau que de l'en retirer (Chevallier, 2007).

Chapitre III : Protection des captages d'eau souterraine

contre la pollution

3.1- Configuration du réseau d'écoulement des nappes en condition de pompage

En conditions naturelles, un aquifère est en état d'équilibre dynamique, et le pompage dans un puits provoque un rabattement de la surface de la nappe d'eau souterraine (Figure 3).

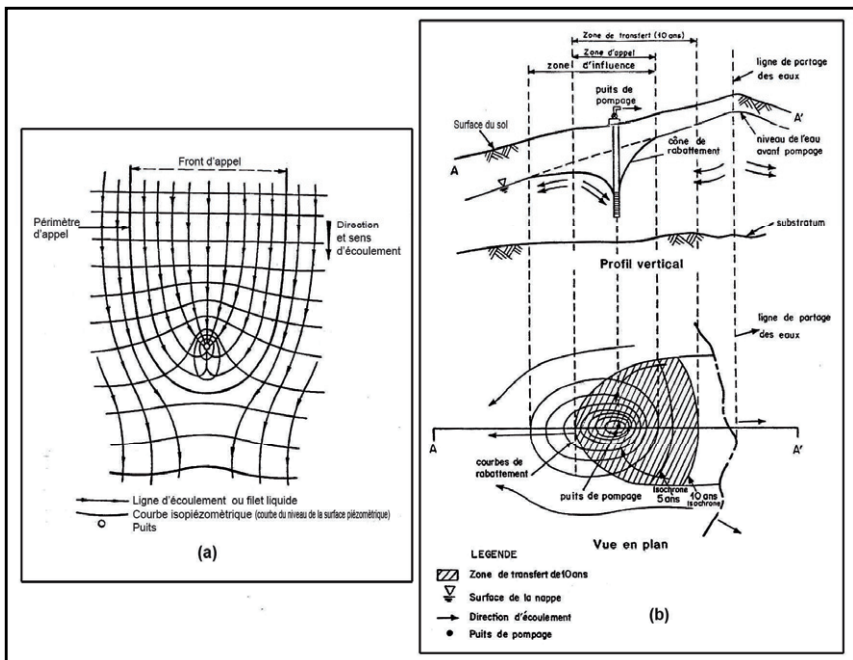


Figure 3 : Pompage dans un puits en milieu poreux (a) et détermination des temps de transfert (b) (d'après Lallemand-Barres et Roux, 1989)

A débit constant, les trois facteurs déterminant les dimensions du cône de rabattement sont : les paramètres hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emmagasinement), le temps de pompage et le régime d'écoulement (Rasmussen,

2006). Il faut distinguer deux zones : la zone d'appel et la zone d'influence du champ captant sur la nappe superficielle.

La zone d'influence est la zone dans laquelle les niveaux d'eau sont influencés, donc rabattus par le pompage. La zone d'influence s'étend à la fois dans la zone d'appel et hors de la zone d'appel (Figure 3-a). C'est la zone superficielle qui correspond au cône de rabattement.

La zone d'appel est la partie de la zone d'influence dans laquelle l'ensemble des lignes de courant se dirigent vers le puits ou le forage en pompage, donc où l'eau est captée (Figure 3-b). Elle est comprise dans l'aire d'alimentation du captage qui se prolonge en amont jusqu'à une limite du système. Les dimensions du cône de rabattement, de la zone d'influence et de la zone d'appel, varient en fonction du débit de pompage.

Dans le processus de délimitation des périmètres de protection, il est fréquemment fait mention de ces zones. La zone d'appel a une importance considérable parce que les polluants introduits dans cette zone sont susceptibles d'atteindre le puits de pompage. Selon qu'il s'agisse d'un captage unique ou d'un champ de captage, les méthodes de délimitation des périmètres de protection diffèrent.

3.2- Critères de délimitation des zones de protection d'un captage unique

3.2.1- Définition et objectif

Selon IWPP, 1995, une aire de protection est une surface, délimitée selon la méthode du rayon fixé, ou la méthode analytique, semi analytique, ou numérique d'écoulement/transport de masse de soluté qui contribue à un champ de captage et à travers laquelle les contaminants sont susceptibles de migrer pour atteindre les captages après une période de temps spécifié.

Les aires de protection sont donc des surfaces délimitées, au sein desquelles toutes activités susceptibles de porter atteinte à la qualité de l'eau sont interdites (Paradis, 2000).

Le seuil de temps de transit (résidence) est déterminé par le service public en charge de l'approvisionnement en eau potable, en tenant compte des conditions hydrologiques et des besoins de la communauté locale. Un minimum de temps de transit (par exemple 5 ans pour une zone de protection déterminée à l'aide d'un modèle et 50 heures pour une zone de protection déterminée par un rayon fixé) est requis (Pochon et Zwahlen, 2003). Toutefois, il est fortement conseillé de délimiter des aires de protection au-delà de ce minimum pour garantir un niveau élevé de protection (Rasmussen et al., 2006).

L'objectif de la délimitation d'une aire de protection est d'identifier un périmètre pour la gestion et la protection du champ de captage à l'intérieur de l'aire de contribution (Rasmussen et al., 2006). C'est un périmètre dans lequel la réponse à une contamination chimique est trouvée, les sources potentielles de contamination sont inventoriées et des stratégies de gestion sont mises en œuvre (Rasmussen et al., 2006). L'objectif de la délimitation des aires de protection est par conséquent de veiller à une bonne gestion du périmètre afin de le préserver contre toute source potentielle de contamination chimique (www.water.epa.gov).

Divers critères sont utilisés pour délimiter les zones de protection. Les valeurs attribuées à ces critères représentent des limites au-dessus ou en-dessous desquelles le critère considéré cesse de fournir le degré de protection souhaité. Les critères suivants sont pris en compte dans la délimitation des zones de protection: le pouvoir protecteur ou épurateur du sol, le rabattement, le temps de transfert, la distance (arbitraire) et la limite d'écoulement. (Risser et Barton, 1995).

Selon Risser et Barton (1995), le choix d'un critère dépendra à la fois de considérations techniques, socio-économiques et réglementaires. Le but à atteindre peut être :

- soit la délimitation d'une zone permettant un temps d'intervention suffisant en cas de pollution, pour que le captage ne soit pas contaminé ; dans ce cas, le critère choisi sera le temps de transfert, à condition qu'il implique la possibilité d'intervenir avec succès sur toute source de pollution. Dans le cas d'une pollution se produisant à la surface du sol, le temps de transfert inclut le temps de migration verticale dans la zone non saturée, puis le temps de migration horizontale dans la nappe vers le captage ;
- soit la délimitation d'une zone à travers laquelle la concentration du polluant sera atténuée avant d'atteindre le captage ; dans ce cas, on choisit le pouvoir épurateur du sol et de la zone non saturée. Un polluant déversé en surface traversera la zone non saturée dans laquelle pourront intervenir les mécanismes d'adsorption, de filtration, de biodégradation qui réduiront la concentration du polluant à son entrée dans la nappe ; à ces mécanismes s'ajoutera ensuite la dilution dans la nappe ;
- soit l'aménagement d'une zone de protection autour d'un champ captant sur une grande partie de la zone d'appel ; le critère choisi sera le rabattement. C'est cette approche qui a guidé en partie notre délimitation de zones de protection pour le champ captant de Godomey dans le cadre du présent travail.
- soit enfin, la protection de toute l'aire d'alimentation du captage ; on utilise dans ce cas les limites d'écoulement qui peuvent convenir pour de petites nappes et surtout en milieu karstique. Pour les autres nappes, un tel choix peut conduire à une «surprotection » des aquifères.

Le choix du critère devra également tenir compte de sa facilité d'utilisation et de quantification, de la variabilité des conditions hydrogéologiques, et de son adaptation à ces dernières. Enfin, ce choix tiendra compte de l'aptitude du critère à inclure les processus physiques. Il est conseillé de prendre en compte plusieurs critères pour plus d'efficacité :

3.2.2 - Pouvoir épurateur du sol

Les constituants du sol se présentent sous trois phases : une phase solide, constituée des éléments minéraux et organiques, une phase liquide et une phase gazeuse. La reconnaissance d'un sol est basée sur une bonne description du profil pédologique (Vermon et al., 1993), à savoir : situation, exposition, distinction entre horizons organiques, minéraux, texture, structure de chaque horizon, épaisseur, porosité, type de roche, présence ou non d'hydromorphie. A partir de ce profil détaillé, on peut apprécier les capacités dispersives et épuratrices du sol, vis-à-vis d'un effluent. Divers mécanismes étroitement liés sont en effet impliqués : les processus physiques ou mécaniques, qui agissent sur le transport des particules solides, biologiques (phase aérobie et anaérobie) qui ont un effet sur le transport des bactéries et virus, sur la dénitrification des nitrates et sur la dégradation des composés organiques, et géochimiques qui interfèrent sur le transfert des solutés. Ces derniers comprennent l'adsorption/désorption, la précipitation/dissolution, la complexation avec des ions ou des molécules organiques, et sont liés à la présence des colloïdes, des sesquioxides et de la matière organique. Le pouvoir épurateur du sol, puis celui de la zone non saturée, sont importants pour éviter la propagation d'une pollution en direction des nappes. Ils jouent un rôle particulièrement déterminant vis-à-vis des problèmes d'assainissement individuel, de pollution par les décharges, d'épandage.

Par ailleurs, pour les captages implantés près d'une rivière, l'effet filtre des berges peut limiter la pollution de la nappe par le cours d'eau (Bize, 1981).

Une méthode empirique mise au point par Rehse (1977) pour estimer le pouvoir épurateur des terrains traversés, consiste à évaluer dans quelle mesure un polluant déversé sur la surface du sol, verra sa teneur diminuer après parcours vertical jusqu'à la nappe, puis après parcours horizontal dans la nappe jusqu'au point de prélèvement.

Pour cela, des index sont attribués aux différents types de roches qui sont implicitement liés à la perméabilité et au pouvoir de rétention des constituants des

matériaux, et qui tiennent également compte de l'épaisseur. Cette méthode s'apparente à celle de la vulnérabilité.

3.2.3 - Rabattement, zone d'influence et zone d'appel

Le critère de rabattement est directement lié aux concepts de zone d'influence et de zone d'appel. Le rabattement dépend du débit prélevé. Il est très important de définir la zone d'appel du captage car toute pollution intervenant dans cette zone aboutira au captage (Figure 3-b).

La détermination graphique de la zone d'appel du captage, basée sur la formule de Thiessen (Kresic, 2007) utilisable en régime transitoire suppose que l'on connaisse la piézométrie hors pompage puisque l'on effectue un pompage d'essai. Elle consiste à tracer les courbes d'égal rabattement autour du forage, en fonction du débit choisi. A partir des valeurs de charge hydraulique, on construit la surface piézométrique rabattue par le pompage. Le tracé des lignes de courant qui en sera déduit, permet de définir la zone d'appel du forage. Toute pollution dans cette zone aboutira tôt ou tard au captage. Sa limite avale est pressentie être la limite du périmètre de protection rapprochée.

3.2.4 - Temps de transfert et vitesse de transfert

La vitesse effective dérivée de la loi de Darcy (Kresic, 2007) est exprimée par :

$$V = Ki / \omega \quad (1)$$

K = coefficient de perméabilité

i = gradient

ω = porosité effective ou la porosité cinématique

Elle est synonyme de vitesse convective (De Marsily, 1981). A cette notion de vitesse, on peut relier celle du temps de transfert convectif.

Le temps de transfert ou temps de transit est le temps qu'il faut à un polluant pour se déplacer du point d'entrée dans la nappe jusqu'à l'arrivée au captage (www.ene.gov.ca). C'est le TOT (Time Of Travel), c'est-à-dire temps de parcours,

des anglo-saxons. Ce critère inclut plus de processus physiques que les autres critères ; il comprend en effet la convection, la dispersion, et l'interaction solide-soluté. La convection est le facteur prédominant pour les champs captants où les vitesses d'écoulement sont élevées. Dans les nappes à vitesse faible, la dispersion est importante, et les particules de traceur ou de substances polluantes n'arrivent pas simultanément au point d'eau.

A l'intérieur de la zone ou aire d'alimentation du captage, on définit des courbes d'égal temps de transfert ou isochrone (Rasmussen, 2003). La protection du captage est d'autant meilleure que la zone de transfert correspondant à un isochrone donné, est plus étendue (Rasmussen, 2003). Différentes méthodes permettent de calculer la distance correspondant à un temps de transfert que l'on se propose comme limite de périmètre de protection rapproché. Ce temps est pris, dans la plupart des pays, égal à 50 heures (3000 mn) pour un captage unique : c'est le temps minimal nécessaire à l'élimination d'une pollution bactériologique et permettant un délai d'intervention en cas de pollution chimique.

Parmi ces méthodes, citons en deux, selon Lallemand - Barrès et Roux, 1989: la méthode de Hofmann et Lilich (1973) et la méthode de Wyssling (1979).

- la méthode de Hofmann et Lilich (1973) est une méthode simple, qui ne nécessite que peu de données à savoir : porosité efficace, perméabilité, caractéristiques du puits, et un pompage d'essai. Elle ne s'applique que si le milieu est homogène et si le rabattement est faible par rapport à l'épaisseur de l'aquifère (Hofman et al., 1973).
- la méthode de Wyssling (1979) consiste à calculer dans un premier temps, la zone d'appel du captage, puis à chercher la distance correspondant au temps de transfert souhaité, dans la direction d'écoulement. Cette méthode demande un pompage d'essai et certaines données : porosité efficace, perméabilité, épaisseur de l'aquifère, gradient. Une méthode du même type est utilisée aux Etats-Unis par Environmental Protection Agency (EPA) et consiste à

déterminer la limite de la zone d'appel puis une limite en amont du captage correspondant à un temps de transfert que l'on se donne EPA (1987). Ces méthodes sont simples, mais elles ne tiennent pas compte des hétérogénéités de l'aquifère.

Les temps de transfert peuvent être également déterminés à partir d'abaque. Les abaques mis au point par Sauty et Thiery (1975) donnent un moyen pratique de déterminer les courbes d'égal temps de transfert dans les deux cas les plus fréquemment rencontrés : nappe initialement en équilibre hydrostatique (avant pompage) ou nappe en écoulement uniforme dans un aquifère homogène et isotrope, soumis à un pompage à débit constant. D'autres abaques ont été mis au point (Sauty, 1987) pour le cas d'un puits à proximité d'un cours d'eau avec alimentation latérale, et pour le cas d'une batterie de puits alignés.

Les temps de transfert peuvent être aussi déterminés par nomogramme ou nomographe. Le nomogramme mis au point par Van Waegening et Van Duijvenbooden (1978) et le nomographe de Pettyjohn (1987) permettent la détermination rapide d'une distance ou d'un temps de transfert, si l'on connaît l'épaisseur de l'aquifère, la porosité, l'infiltration efficace, la vitesse effective. Enfin, la zone d'appel et les temps de transfert peuvent être déterminés par modélisation comme présenté sur la figure 4.

3.3 - Délimitation des aires de protection d'un champ de captage

3.3.1 - Considérations d'ordre général

La protection des captages d'eau consiste à prendre des mesures pour protéger des forages de captage publics pour l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP), contre une contamination et à s'investir pour maintenir la bonne qualité de la ressource (Rasmussen, 2003). La protection de la source d'eau correspond à la prise de mesures positives pour gérer les potentielles sources de pollution et l'élaboration

d'un plan de contingence pour le futur qui puisse prévoir des sources alternatives d'AEP.

Les principales étapes dans le processus de protection d'une source d'AEP comprennent l'évaluation de l'aire de contribution d'eau pour le captage ou le champ de captage, l'étude des sources potentielles de contamination existant à l'intérieur de cette aire et l'évaluation de la susceptibilité du captage pour ces contaminants. Ceci inclut l'éventualité pour le contaminant d'être relâché et la probabilité pour qu'il soit transporté à travers le sol (zone non saturée), puis l'aquifère, jusqu'à la crépine du captage (Rasmussen et al., 2006).

La délimitation de l'aire de protection d'un captage est souvent un compromis entre la compréhension scientifique et technique de la géohydrologie et du transport de contaminants et la mise en œuvre pratique de cette délimitation pour la sécurité du public (Verreault, 2003). Des guides sur les critères et les méthodes de délimitation des périmètres de protection sont mises au point par de nombreux pays.

La figure 4 illustre la complexité liée à la délimitation des zones de protection avec diverses approches possibles. Il apparaît sur cette figure que les formes des quatre zones délimitées pour le même ouvrage sont très différentes, reflétant ainsi les différentes hypothèses de travail. Dans les quatre cas présentés, ce forage situé à proximité d'une rivière permanente relativement large, est soumis à un pompage en régime permanent dans un aquifère à nappe libre dans lequel l'écoulement est supposé être horizontal et pour lequel le gradient d'écoulement régional est du Sud-Est vers le Nord-Ouest (vers la rivière). En fait, la zone adéquate de protection d'un captage devrait être délimitée suite à une discussion constructive entre l'hydrogéologue professionnel et toutes les parties prenantes (non hydrogéologues) en prenant en considération les inévitables contraintes de temps et de budget.

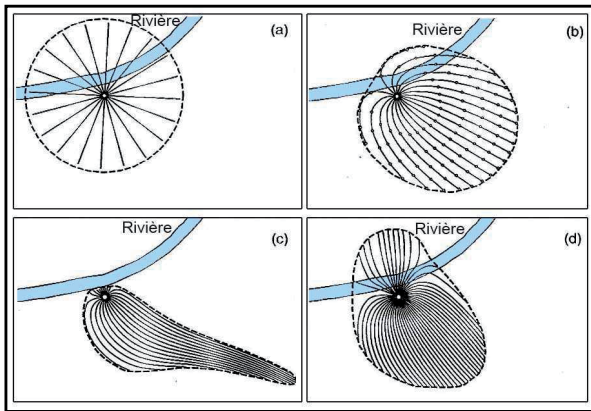


Figure 4 : Zone de contribution pour un isochrone de 5 ans délimitées par diverses méthodes, dans le cas d'un forage unique en pompage à proximité d'un cours d'eau.
 (a) Méthode volumétrique de rayon fixé ; (b) méthode de champ d'écoulement uniforme, chaque cercle correspond à une année d'intervalle ; (c) Méthode prenant en compte les conditions aux limites hydrologiques (comme présentée sur la figure) d) Méthode prenant en compte une

En général, les méthodes de délimitation des zones de protection peuvent être subdivisées en trois catégories ci-après :

- Méthodes non hydrogéologiques : rayon fixé arbitrairement ;
- Méthodes quasi-hydrogéologiques comprenant trois approches qui sont :
 - rayon fixé par calcul ;
 - hypothèse de champ d'écoulement uniforme ;
 - modélisation des eaux souterraines non basée sur la cartographie hydrogéologique ;
- Méthodes hydrogéologiques comprenant les deux approches ci-après :
 - cartographie hydrogéologique (carte de vulnérabilité de l'aquifère) ;
 - modélisation hydrogéologique basée sur la cartographie hydrogéologique ;

A l'exception de la 1^{ère} catégorie, qui est une approche arbitraire, donc simple, de protection d'un captage, toutes les autres méthodes peuvent faire intervenir la délimitation de zones de protection par application du critère " temps de résidence " ou de " transfert " qui se base sur les hypothèses ci-après :

- (i) le contaminant est non conservatif, soumis à divers processus de transport (adsorption, diffusion, dégradation), peut être atténué après un certain temps sous terre ;
- (ii) la détection de contaminants conservatifs (non sujet à atténuation) entrant dans la zone de protection du captage prendra un délai suffisant pour que l'institution en charge d'AEP public puisse prendre des mesures nécessaires, y compris la décontamination de l'eau souterraine ou le développement d'une source alternative de fourniture d'eau ;
- (iii) la détection de tout contaminant déjà à l'intérieur de la zone de protection doit requérir des actions de décontamination immédiates. En dernier ressort, la prise de décision quant au temps de résidence approprié est laissée aux acteurs dans chaque cas individuel, quoiqu'il soit apparu que 5, 10 et 20 ans de zone de capture sont largement utilisés pour délimiter, à l'intérieur de la principale zone de capture, certaines sous-zones de restriction d'utilisation du sol.

Les méthodes quasi hydrogéologiques utilisent de très simples hypothèses qui, dans bien des cas, n'ont pas grand chose de commun avec les conditions hydrogéologiques réelles du site. Comme ces méthodes font appel à certaines équations, il peut sembler à un profane qu'elles possèdent une certaine crédibilité. Lorsqu'ils sont amenés à appliquer des méthodes quasi hydrogéologiques, les hydrogéologues doivent expliquer clairement les limites des diverses hypothèses émises et leurs implications sur la zone finalement délimitée. Notamment, ces méthodes ne prennent pas en compte la stratification des aquifères et la présence de couches imperméables, les composantes verticales de l'écoulement, l'hétérogénéité et l'anisotropie de l'aquifère ou l'interférence entre plusieurs forages crépinés à diverses profondeurs du même champ captant. Aucune de ces méthodes ne doit d'ailleurs être appliquée à des aquifères connus (par définition) pour être hétérogènes et anisotropes comme les aquifères de fractures et ceux karstiques.

Les paragraphes qui suivent et qui vont de 3.3.2 à 3.3.5 présentent les méthodes quasi hydrogéologiques les plus couramment utilisées.

3.3.2 - Délimitation selon un rayon fixé par calcul

Le rayon à fixer est calculé sur la base d'une simple analyse de bilan d'eau statique en deux dimensions, en supposant la charge hydraulique initiale horizontale. En supposant un écoulement radial vers un puits dans un aquifère à substratum horizontal, d'épaisseur saturée constante, la limite cylindrique de capture est délimitée par un isochrone de temps de résidence t , signifiant que toute particule d'eau qui pénètre dans le cylindre ou qui y est contenue, prendra un temps de transit qui ne dépassera pas t jours avant d'être pompée dans le puits (Figure 5). Le bilan d'eau pour la période t est :

$$Qt = N\pi R^2t + n\pi R^2H \quad (2)$$

H : épaisseur saturée initiale de l'aquifère, R : est le rayon de capture pour le temps donné t , N : recharge superficielle, n : porosité effective de l'aquifère, Q : débit de pompage.

Le 1^{er} terme de l'équation est la quantité d'eau fournie par la recharge ; Le 2^{ème} terme est la quantité d'eau contenue dans la portion cylindrique de l'aquifère ; Le terme de droite est la quantité d'eau, extrait du puits durant la période t de pompage. Le rayon R est exprimé comme suit :

$$R = \sqrt{\frac{Qt}{N\pi t + n\pi H}} \quad (3)$$

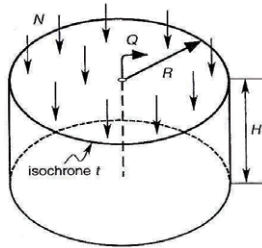


Figure 5 : Equilibre d'eau d'un écoulement radial vers un puits dans un domaine délimité par un isochrone de temps de séjour (d'après Kresic N., 2007)

Quand t devient infiniment grand, le rayon R représente la zone complète de capture (indépendant du temps).

$$R = \sqrt{\frac{Q}{\pi N}} \quad (4)$$

Cette approche est dite approche par la recharge.

Si le terme $N\pi t$ devient petit parce que t devient petit ou N ou les deux, l'équation R devient :

$$R = \sqrt{\frac{Qt}{n\pi N}} \quad (5)$$

Cette approche est dite approche volumétrique.

L'isochrone radiale cylindrique de la figure 5 se présente seulement en l'absence d'un gradient régional significatif. Lorsque ce gradient régional ne peut pas être ignoré (ce qui constitue l'approche la plus réaliste) l'isochrone s'allonge dans la direction du gradient ascendant. Dans ces conditions, la direction et la valeur de l'écoulement ambiant doivent être déterminées et les isochrones doivent être estimés en faisant recours aux solutions propres au captage dans un champ d'écoulement uniforme.

3.3.3 - Délimitation pour un captage dans un champ d'écoulement uniforme

Cette méthode fait l'hypothèse que l'écoulement régional de l'eau souterraine, généré au loin par la recharge de l'aquifère, peut être approximé par un champ d'écoulement uniforme (rectiligne) aux voisinages immédiats du forage. La zone de capture d'un forage dans un champ d'écoulement uniforme n'est pas pour longtemps circulaire et centré sur le forage, mais constitue un domaine allongé avec un gradient ascendant du côté du forage, et parallèle à la direction d'écoulement uniforme. De nombreuses équations analytiques ont été utilisées pour délimiter les zones de capture infinies en régime permanent, en faisant recours aux hypothèses simplificatrices de la boîte de sable. Cette approche est présentée sur la figure 6 et est décrite par les équations établies selon le type hydrodynamique de nappe.

➤ Aquifère à nappe captive

L'équation décrivant le pourtour de la zone de capture (ligne de partage des eaux souterraines) pour un aquifère captif est (Grubbs, 1993, d'USACE, 1999) :

$$x = \frac{-y}{\tan\left(\frac{2\pi Kbiy}{Q}\right)} \quad (6)$$

La distance, dans le sens ascendant du gradient, entre le forage en pompage et le point de stagnation qui marque la fin de la zone de capture à l'aval est :

$$x_0 = -\frac{Q}{2\pi Kbi} \quad (7)$$

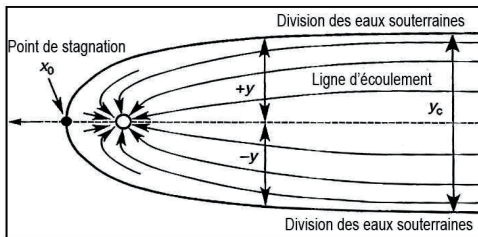


Figure 6 : Vue en plan d'une zone de contribution d'un puits de pompage dans un champ d'écoulement uniforme. Le puits est situé à l'origine (0,0) du plan x, y. (USACE, 1999 dans Kresic N., 2007)

La largeur maximale de la zone de capture à une distance x du forage en pompage est :

$$y_c = \frac{Q}{\kappa b i} \quad (8)$$

➤ **Aquifère à nappe libre**

Selon le même auteur l'équation décrivant la ligne de partage des eaux est :

$$x = \frac{-y}{\tan\left[\frac{\pi\kappa(h_1^2 - h_2^2)y}{QL}\right]} \quad (9)$$

h_1 : charge hydraulique en amont du forage au-dessus du substratum horizontal de l'aquifère avant le pompage ;

h_2 : charge hydraulique à l'aval du forage au-dessus du substratum horizontal de l'aquifère avant le pompage ;

L : distance entre h_1 et h_2 .

La distance du forage au point de stagnation est :

$$x_0 = \frac{QL}{\pi\kappa(h_1^2 - h_2^2)} \quad (10)$$

La largeur maximale de la zone de capture à une distance x vers l'amont du forage est :

$$y_c = \frac{2(QL)}{\kappa(h_1^2 - h_2^2)} \quad (11)$$

L'introduction du facteur temps (approche "isochrone") va changer la forme de la zone complète de capture (à l'infini) telle que présentée sur la figure 6. Puisque les lignes d'écoulement n'ont pas toutes la même longueur, la zone de capture prendra une forme ovale telle que présentée sur la figure 4 (b). Cette forme va s'allonger au fur et à mesure que le temps s'écoule. Des modèles numériques et analytiques d'écoulement de l'eau souterraine permettent un calcul et une reproduction rapide des lignes d'écoulement de diverses longueurs pour le même temps de transit. Les zones de capture sont alors délimitées par des contours avec des points pour de telles lignes d'écoulement comme indiquée sur la figure 4 (b).

3.3.4 - Délimitation par cartographie hydrogéologique

La cartographie hydrogéologique identifie et présente, sous forme de cartes accompagnées de graphiques et de notices, les faits géologiques, hydrologiques et hydrauliques qui contrôlent l'écoulement de l'eau souterraine dans la zone d'intérêt. La zone de capture d'un forage, d'un champ de captage ou d'une source exploitée pour l'AEP peut se révéler complexe, incluant des situations d'interconnexions hydrauliques multiples des aquifères entre eux et avec les eaux de surface. Cartographier correctement en trois dimensions les limites physiques et hydrauliques de tels systèmes d'écoulement, constitue la clé du succès de la délimitation cartographique de la zone de capture d'un captage ou d'un champ de captage. La carte doit indiquer d'où provient l'eau du système d'écoulement capté par l'ouvrage ou le champ à protéger. Une fois que la géométrie du système d'écoulement est bien comprise, elle est cartographiée pour montrer en trois dimensions les lignes équipotentiels et les lignes de courant (Vrba et Azopozec, 1994). L'étape finale consiste à évaluer les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine dans la zone de capture et à délimiter les volumes d'aquifère avec des temps de résidence identiques, c'est-à-dire, les montrer en trois dimensions. Il est entendu que l'approche de délimitation de zone de protection par la cartographie hydrogéologique peut exiger des ressources financières substantielles lorsque les conditions hydrogéologiques sont très complexes et, par conséquent, peut ne pas être réalisable pour certains systèmes d'AEP. Malgré cela, la délimitation de zones de protection par la cartographie hydrogéologique est plus avantageuse lorsqu'elle est utilisée pour une carte de vulnérabilité d'un aquifère au niveau de ses zones de recharge (Wheatcraft, 2000). La cartographie de la vulnérabilité (sensibilité) constitue un type de cartographie hydrogéologique de l'aquifère qui se focalise sur la surface du sol vulnérable à la contamination de l'eau souterraine (aquifère) du fait des facteurs hydrogéologiques et anthropogéniques. On peut citer comme exemples de surfaces vulnérables : les faibles épaisseurs de zone non saturée avec des sédiments perméables, les zones de fractures affleurantes ou subaffleurantes et les topographies karstiques avec des

cavités de dissolution et des pertes ou points d'engouffrement. Les cartes de vulnérabilités sont utilisées pour des objectifs de planification de l'occupation des sols, mais peuvent aussi être établies spécifiquement pour des objectifs de délimitation et de gestion de zones de protection.

Habituellement, trois zones de protection d'un captage sont délimitées quoique le nombre puisse varier en fonction des conditions hydrogéologiques et du type de régulation nécessaire.

Zone I : c'est la zone d'assainissement ou de protection stricte ou immédiate. C'est une zone essentiellement administrative ou de protection physique de la source d'eau avec accès réglementés et restreints. L'objectif visé est de prémunir le point d'eau lui-même contre des dommages et des contaminations délibérés ou accidentels, y compris la contamination de l'aquifère autour du point d'eau. Les dimensions de la zone I sont de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres pour un seul point d'eau ou des dimensions plus grandes lorsqu'il s'agit de plusieurs sources d'eau ou plusieurs forages spatialement rapprochés (Krésić, 2007).

Zone II : elle est appelée parfois zone de protection rapprochée et sa délimitation est basée sur l'analyse des temps de transit. Elle reflète, pour un site spécifique, la compréhension qu'on a du temps minimum de transit d'un éventuel contaminant entre son lieu d'introduction dans le sol et les points de localisation du prélèvement de l'eau souterraine, temps de transit durant lequel il devrait être possible d'initier des activités de décontamination et, le cas échéant, de mettre en œuvre les plans alternatifs de contingence pour l'AEP. Certains considèrent la zone II comme une zone d'atténuation dans laquelle toute bactérie pathogène qui entre à partir des systèmes sceptiques ou des plans d'eau de surface serait atténuée avant d'atteindre le forage. La taille et la forme de la zone II peuvent varier largement en fonction du type d'aquifère et de la conductivité hydraulique des zones les plus perméables. La zone II est entièrement comprise à l'intérieur de la ligne de partage des eaux souterraines et reflète le volume d'eau souterraine qui s'écoulerait dans les forages ou les sources durant un temps donné. Délimiter une zone II correspondant à 50 jours et parfois 10

jours de temps de transit dans les graviers glaciaires (moraines) et, surtout, dans les karts, n'a pas beaucoup de sens, quoiqu'il puisse sembler conservatoire par rapport aux 5 ou 10 ans de zone de capture communément considéré comme protecteurs pour les aquifères d'interstice. En effet, un contaminant peut être introduit dans un aquifère karstique à plus de 10 km d'un forage et apparaître dans ce dernier au bout de 24 heures (Wuolo et al., 1995). En revanche, délimiter une zone II peut ne pas être nécessaire, ou presque, lorsque l'on a affaire à des aquifères captifs profonds protégés par des couches imperméables indurées, des aquifères dont les zones de recharge sont éloignées et des aquifères dans lesquels les temps de résidence calculés sont de l'ordre de centaines ou de milliers d'années (Krésic, 2007);

Zone III : elle est aussi appelée aire de contribution et inclut le volume total de l'aquifère contenu à l'intérieur de la ligne de partage des eaux à partir de laquelle toute l'eau souterraine est potentiellement appelée à s'écouler dans les forages ou les sources considérées eu égard au temps de transit. Cette zone peut être subdivisée en fonction de divers critères, y compris le critère de temps de transit. Son importance est en rapport avec une planification à long terme de la gestion de la ressource en eau souterraine, ainsi que des occupations du sol et des régulations de la protection de l'aquifère y afférentes (Krésic, 2007).

Les cartes hydrogéologiques et de vulnérabilité peuvent être développées dans un environnement SIG (Système d'Information Géographique). Dans le cas d'une carte hydrogéologique de détail (compréhensive), la nature des données sur les couches de terrains concerne la géologie, l'hydrostratigraphie, la tectonique, la topographie, l'hydrographie. De même que les facteurs climatiques influençant la recharge, l'occupation du sol, l'utilisation du sol, les types de sol, l'épaisseur de la zone non saturée, les paramètres hydrodynamiques des aquifères (transmissivité, conductivité hydraulique, porosité, coefficient d'emménagement), les courbes isopièzes, zones de recharge et de drainage (naturelle comme artificielle) des aquifères et leurs localisations et les sources potentielles ou réelles de contamination des sols et des eaux souterraines (Rasmussen et al., 2006). Par opposition à de telles

approches cartographiques, les approches par cartes de vulnérabilité des aquifères à nappe libre sont simples et pragmatiques et sont basées sur des méthodes indicielles diverses. Ces méthodes ne requièrent pas des informations hydrodynamiques mais combinent juste un nombre limité de source d'informations requises. De ce point de vue la méthode DRASTIC est celle qui est la plus largement utilisée. Son appellation regroupe les initiaux anglais des 7 facteurs d'évaluation ci-après : profondeur de l'eau, recharge, nature du terrain aquifère, nature du sol, topographie, impact de la zone non saturée et conductivité hydraulique de l'aquifère. Cependant, la pertinence de la méthode rencontre un succès mitigé du fait de sa subjectivité tant que la carte obtenue n'est pas calibrée avec des données mesurées de concentration de contaminants ou avec celles d'un contaminant spécifique. Calibrer la carte de vulnérabilité des aquifères avec des informations sur la qualité de l'eau souterraine est la meilleure manière de déterminer quels sont les facteurs hydrogéologiques et anthropogéniques qui sont en liaison avec le composant chimique en cause.

3.3.5 - Délimitation par modélisation basée sur la cartographie hydrogéologique

Les modèles numériques, fondés sur les résultats de la cartographie hydrogéologique, sont les meilleurs outils de délimitation de la zone de capture des captages et de gestion des ressources en eau souterraine en général. Quels que soient les efforts et ressources investis dans la cartographie hydrogéologique pour quelque objectif que ce soit, il restera toujours un certain niveau d'incertitude sur la représentation exacte des caractéristiques hydrodynamiques du système aquifère analysé. Les modèles numériques se prêtent bien à l'analyse de ces incertitudes et aident les décideurs à tester divers scénari de gestion et de protection de leur captage. Ils peuvent prendre en compte tous les aspects importants de la cartographie hydrogéologique en trois dimensions (3D) et les convertir en une description quantitative du système d'écoulement. En conséquence, ils peuvent délimiter des formes complexes et des volumes d'aquifères contributifs d'eau au champ de captage et effectuer des analyses de sensibilité des résultats par changement de divers

paramètres d'entrée du modèle tels que la conductivité hydraulique et le taux de recharge de l'aquifère.

Chacune de ces méthodes a des avantages et des inconvénients comme indiqué dans le tableau I. Bien entendu, les aires délimitées varient selon la méthode mise en œuvre. A titre illustratif, la figure 7 présente les résultats comparés de délimitation de zone de protection d'un champ captant par différentes méthodes de plus en plus sophistiquées, pour un isochrone de dix ans en ce qui concerne les trois dernières approches par modélisation (Spadway, Indiana, Etats-Unis d'Amérique).

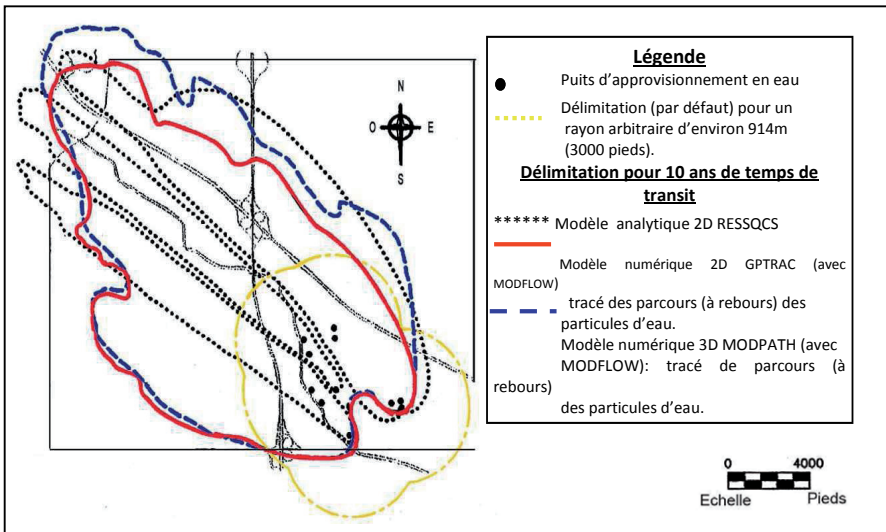


Figure 7 : Aires de protection d'un champ captant délimitées par différentes méthodes (d'après EMCON in IWPP. 1995. Indiana. Etats -Unis)

3.4 - Aspects réglementaires et servitudes liées aux zones de protection

3.4.1- Aspects réglementaires

Du fait de la double appartenance des eaux souterraines au sous-sol et au cycle de l'eau, le droit des eaux souterraines procède à la fois du droit du sous-sol et du droit des eaux, et plus particulièrement du droit des eaux de surface. Au centre du

droit des eaux, se place la question de la propriété. Selon le droit romain, les eaux sont publiques si le terrain sus-jacent fait partie du domaine public, et privées si le terrain est privé (Lallemand Barrès et Roux, 1989). Ainsi, la propriété du sol confère des droits de propriété et d'usage sur les eaux du sous-sol. C'est le cas en France et dans de nombreux pays européens : Autriche, Pays-Bas, Italie, Portugal (Lallemand Barrès et Roux, 1989).

Le droit anglo-saxon, par contre, s'est surtout inspiré de la notion d'eaux communes. Cette loi est appliquée en Grande-Bretagne, dans l'Est des USA et dans certains pays d'Europe (Albinet, 1970). Cette loi est appliquée en Grande-Bretagne, dans l'Est des USA et dans certains pays d'Europe (Lemer et Simmers, 1990).

Au Bénin, la loi N° 2010-44 du 21 Octobre 2010 portant gestion de l'eau en République du Bénin, donne des précisions sur l'établissement des trois périmètres de protection et sur les interdictions possibles dans les deux premiers périmètres et réglementations dans le périmètre de protection éloigné à travers les articles 47 à 50.

Une mesure concrète importante pour la prévention de la pollution des eaux souterraines ou des eaux de source destinées à l'alimentation est la création de zones de protection, à l'intérieur desquelles certaines activités sont réglementées ou interdites. Ces zones de protection sont limitées par les périmètres de protection.

3.4.2 - Servitudes liées aux zones de protection : interdictions et réglementations

Les dispositions relatives aux utilisations et à la protection des eaux souterraines figurent dans la loi N° 2010-44 portant gestion de l'eau en République du Bénin. La protection de la qualité des eaux souterraines est assurée par l'application de procédures types pour la création et la délimitation des zones de protection. Des recommandations sont appliquées dans les différents Etats par les institutions commises à cette fin. Elles donnent un schéma de la délimitation des différentes zones, mais aussi des servitudes à imposer. A titre d'exemple, les

servitudes selon les trois zones de protection décrites plus haut en ce qui concerne la fédération allemande sont rapportées dans le tableau I.

Tableau I : Servitudes dans les différentes zones (cas de l'Allemagne)

Activités	Zone I	Zone II	Zone III A	Zone III B
Toute circulation piétonne ou autre	interdit			
Toute utilisation agricole du terrain	interdit			
Construction, exploitation industrielle, agricole	interdit	interdit		
Route, chemin de fer, plan d'eau, cimetière	interdit	interdit		
Carrières et excavations, exploitations minières, transport de matériaux radioactifs, pacage d'animaux	interdit	interdit	interdit ou réglementé	
Epanchage et utilisation non contrôlée d'engrais organiques et chimiques	interdit	interdit	interdit ou réglementé	
Transport d'eaux usées, fossés remplis d'eau, fossés récepteurs, étangs, épandage de pesticides, herbicides	interdit	interdit	interdit ou réglementé	interdit ou réglementé
Dépôts d'hydrocarbure, stations services, aéroports, dépôts d'ordures, station d'épuration, forage pétroliers, gaz	interdit	interdit	interdit ou réglementé	Réglementé
Canalisations à produits toxiques, raffinerie, usines chimiques	interdit	interdit	interdit ou réglementé	interdit ou réglementé

Source : Lallemand-Barrès et Roux, 1989

3.5 - Réseau de surveillance et d'alerte

Il est souhaitable de concevoir la protection des captages d'une façon dynamique, car il y a lieu de considérer qu'une réglementation ne peut être garantie du seul fait de l'existence des périmètres de protection. Donc pour compléter l'efficacité de la protection des captages, s'il estime que les risques de contamination ne sont pas négligeables, le maître d'ouvrage devra recommander, en plus des contrôles réglementaires sur le captage proprement dit, que soit mis en place un système de surveillance et d'alerte en amont hydraulique du point de prélèvement (Rasmussen, 2006). Son objectif est de permettre de détecter une pollution avant qu'elle n'atteigne les points de prélèvement.

Ce réseau doit être mis en place dans le périmètre de protection rapprochée sur les lignes d'écoulement de la nappe vers le captage, mais à une distance suffisante de

celui-ci pour laisser un temps d'intervention entre la détection du polluant et son arrivée aux installations de pompage (Rasmussen, 2006). Il peut être constitué de forages ou puits existants ou bien de piézomètres réalisés spécialement à cet effet.

3.6 - Plan d'intervention et plan de secours

Lorsque le risque de pollution accidentelle chronique est notable, il peut être utile, que le maître d'ouvrage fasse établir des plans d'intervention en cas de pollution et définir les moyens d'alimenter en eau la population, dans l'hypothèse d'une situation de crise, par des ressources de substitution.

3.6.1 - Plan d'intervention

Le plan d'intervention définit le rôle de chacun, les liaisons entre les services concernés pour assurer l'alerte et l'information, la mise en œuvre des mesures d'urgence éventuellement imposées par les circonstances (www.flwpath.com). Ce plan d'intervention doit faire l'objet d'une mise à jour systématique. Les plans d'intervention concernent d'une façon générale la pollution des nappes d'eau souterraines et des cours d'eau. Les plans d'intervention visent d'une part à sensibiliser les collectivités locales au fait qu'il existe des zones de captage particulièrement vulnérables aux déversements de produits nocifs. D'autre part, ils permettent de fournir aux responsables de la sécurité, des éléments d'information leur permettant de connaître les zones à risque, de mettre en place des aménagements de protection et d'information, de déclencher l'alerte, de définir les dispositifs d'urgence à mettre en œuvre, de prévoir et effectuer les travaux visant à limiter l'extension de la pollution et à la résorber.

3.6.2 - Plan de secours

Si les plans d'intervention s'intéressent à la pollution accidentelle des rivières et des nappes, le plan de secours (contingency planning des anglo-saxons) élaboré pour un service de distribution d'eau potable doit envisager tous les cas d'altération de la qualité de l'eau et notamment le cas où la pollution n'est détectée que

lorsqu'elle affecte déjà l'eau du réseau. Le plan de secours prévoit les risques de pollution, les usagers prioritaires, les solutions pour assurer une alimentation en eau de secours et les étapes du retour vers une situation normale.

3.6.3 - Hydrogéologue agréé

Dans le système français notamment, il existe des hydrogéologues agréés. Il s'agit d'un technicien agréé, capable d'apprécier et d'utiliser les résultats des études préalables pour le calcul des périmètres de protection et de connaître parfaitement la réglementation pour la proposition de servitude. Il est chargé de produire des rapports contenant tous les éléments d'identification du captage, ses caractéristiques techniques et hydrogéologiques, des indications sur sa vulnérabilité, les caractéristiques des périmètres de protection et les réglementations ou interdictions qui sont proposées. A ce titre, le rapport de l'hydrogéologue agréé devrait contenir le maximum d'éléments disponibles tout en restant très synthétique. L'hydrogéologue doit s'appuyer sur les résultats d'études hydrogéologiques préalables approfondies, qui sont indispensables pour assurer le meilleur ratio coût/protection et cout/efficacité et ne faire entreprendre les procédures que si les captages sont réellement protégeables. Dans les zones concernées par les périmètres de protection, l'hydrogéologue agréé propose un certain nombre de servitudes et de travaux de mise en conformité pour les activités existantes.

Tableau II : Méthodes de délimitation des périmètres de protection (d'après WHPA, 1995)

Catégorie	Méthode	Description	Avantages	Inconvénients
Non hydrogéologique	Rayon fixe arbitraire	Rayon fixe autour du puits représentant la zone de contribution	Facile à appliquer. Nécessite seulement des informations issues des logs de forage. N'exige pas des données de terrain	Non approprié au site considéré. Peut aboutir à une surface plus grande ou plus petite que la zone de protection normale des captages.
Quasi hydrogéologique	Rayon fixé par calcul	Un cercle autour du puits fondé sur le critère de temps de transfert spécifique. Le rayon du cercle est basé sur l'équation volumétrique	-	Peut se révéler inapproprié, spécialement là où il existe des conditions aux limites hydrogéologiques significatives ou si l'aquifère est hétérogène et anisotrope.
	Formes simplifiées, standards variables	Les formes standards sont générées en utilisant les modèles analytiques, de variables d'écoulement aux limites et les critères de temps de transfert. La forme standard appropriée est sélectionnée pour s'ajuster aux conditions hydrogéologiques du site.	-	N'est pas approprié là où il existe une hétérogénéité hydrogéologique et des limites hydrogéologiques. En outre, les gradients hydrauliques locaux peuvent différer des gradients régionaux utilisés pour déterminer les limites standards calculées.
	Modèles analytiques ou semi-analytiques d'eau souterraine non basés sur la cartographie hydrogéologique	-Modèles de simulation utilisant des équations d'écoulement d'eau souterraine, d'hydraulique et de puits de captage pour définir l'aire de contribution.	Modèle analytique pouvant prendre en compte certaines hétérogénéités et les conditions d'aquifère libre ou captif ainsi que les conditions limites linéaires	Peut se révéler inapproprié, spécialement là où il existe des conditions aux limites hydrogéologiques significatifs ou si l'approche est hétérogène.
Hydrogéologique	Cartographie hydrogéologique	Cartographie des limites d'écoulement et des caractéristiques géomorphologiques de la zone d'étude.	Méthode la plus appropriée pour la détermination des aires de protection des captages dans des situations d'écoulement en milieu karstique	-
	Modèle numérique d'écoulement / transport de masse de soluté	Modèle de simulation qui utilise une combinaison d'équations numériques complexes, d'écoulement souterrains pour déterminer les aires de contribution	Plus précise, plus flexible. Peut modéliser toutes les situations hydrogéologiques. Variation spatiale, hétérogénéité, anisotropie et plusieurs couches peuvent être intégrées dans le modèle.	Besoin d'un personnel initié pour tourner le modèle. Besoin de beaucoup de données spécifiques du site. La validité du modèle dépend de la quantité de données spécifiques du site.

En conclusion on peut dire que le constat d'absence ou de non performance du plan de gestion des zones de captage est une réalité sur le champ de captage de Godomey. La délimitation d'une aire de protection permet d'identifier un périmètre de sécurité pour la gestion durable de la ressource à l'intérieur de l'aire de contribution. Cette délimitation se fait en se basant sur divers critères. Pour notre travail de délimitation des zones de protection du champ de captage de Godomey, le critère utilisé est le rabattement.

Chapitre IV : Stratégie de protection des aquifères

4.1-Efforts de modélisation du système aquifère du plateau d'Allada et de la plaine littorale adjacente

4.1.1 - Modèle de Pallas

Les modèles sont des outils de gestion des eaux souterraines pour évaluer l'impact de n'importe quelle interposition sur la quantité et la qualité de la ressource. La modélisation entreprise par Pallas en 1988 avait pour but de simuler la réaction de la nappe du Continental Terminal couvrant le plateau d'Allada sous l'effet des programmes d'exploitation prévus pour l'alimentation en eau de Cotonou jusqu'à l'horizon 2010.

L'aquifère du plateau d'Allada a été considéré par Pallas (1988) comme un système hydraulique monocouche, sur la base de la différence minime de niveaux existant entre les différents horizons et l'absence de données sur les variations piézométriques verticales. La nappe contenue dans les sables du cordon dunaire côtier a été elle aussi assimilée au système en estimant que l'élévation du niveau piézométrique observée au niveau du cordon dunaire est en fait dû à un effet d'île produit par le drainage de la nappe au Nord par les lagunes et au Sud par la mer et qu'il n'y avait pas de raison d'imaginer que le cordon dunaire était réellement isolé du Continental Terminal. Les résultats des travaux de recherche effectués par Pallas (1988) ont abouti aux conclusions suivantes :

- le risque de contamination de l'aquifère à partir de la mer existe et doit être sérieusement envisagé.
- l'effet le plus immédiat de l'augmentation des prélèvements entre Godomey et Ouidah sera l'assèchement des lagunes de Toho-Djonou actuellement exploitées pour la pêche et surtout la pisciculture.
- les données existantes étaient insuffisantes pour permettre des prévisions plus précises.

4.1.2 - Modèle de TurkPak International / SCET-Tunisie

Dans le cadre d'un projet d'inventaire des ressources en eau du Bénin, un modèle de simulation du système aquifère de la plaine littorale du Bénin dans son ensemble avait été construit par le groupement TurkPak International / SCET - Tunisie. La zone modélisée couvre en fait la plaine littorale et les bordures sud des plateaux du Continental Terminal (zone des terrasses). Le modèle mathématique utilisé emploie la méthode des différences finies développées initialement par Mc Donald et Harbough de l'USGS en 1984 et écrit en Fortran 77.

L'objectif assigné au modèle était de simuler les conditions de gisement de l'eau souterraine et de prévoir le comportement de l'aquifère dans le futur, sous différentes options d'exploitation, jusqu'à l'horizon 2010.

L'aquifère a été traité, pour diverses raisons, comme un aquifère monocouche surmontant les argiles éocènes avec une épaisseur d'environ 150 m.

Les conclusions finales retenues de ce travail sont les suivantes :

- les niveaux piézométriques dans la zone de Godomey sont déjà négatifs même si la pointe du biseau salé n'a pas encore atteint cette zone ;
- la zone autour de Godomey est déjà soumise à des contraintes et pour certaines valeurs de pompage, les niveaux d'eau descendront encore davantage et peuvent induire la possibilité d'intrusion des eaux de mer ou du lac ;
- les rayons d'influence des pompages intensifs de Godomey n'ont cependant pas encore atteint la mer ; en effet, entre Godomey et la mer, les charges sont encore positives, ce qui maintient l'interface loin du champ ; en plus, les forages de Godomey et de Porto-Novo sont protégés, par des couches d'argile de l'intrusion saline des eaux saumâtres du lac Nokoué ;

- dans le champ de forage proposé vers Ouidah, avec 4 à 5 forages d'un débit moyen de 18 l/s, il y aura une chute de niveau de 1 à 2 m vers l'année 2010 et ceci semble ne pas avoir des effets parce que la recharge est suffisante ;
- il serait souhaitable de réduire les contraintes dans la zone de Godomey et de déplacer les champs de forage vers l'Ouest ou vers le Nord.

4.1.3 - Modèle de SOGREAH

La phase de modélisation a été réalisée pour le compte de la Direction de l'Hydraulique avec une équipe de SOGREAH/SCET-Tunisie. La conception du modèle a été réalisée au Bénin, et son calage entrepris au Bénin et au siège de SOGREAH à Grenoble. L'objectif de cet exercice de modélisation est d'évaluer dans le temps et l'espace le risque d'intrusion saline dans la nappe du Continental Terminal du plateau d'Allada, compte tenu de l'augmentation rapide de la demande en eau liée à la forte croissance de la ville de Cotonou.

Le logiciel utilisé (ESTRA) est conçu par SOGREAH Ingénierie. Le modèle ESTRA, son fonctionnement mathématique et son principe de calcul, le modèle conceptuel et son maillage, les résultats des calculs et leurs interprétations sont ici présentés.

ESTRA est un modèle aux différences finies, conçu pour représenter les systèmes multicouches. Les écoulements dans chaque couche peuvent être soit libres soit captifs, selon les conditions structurales et piézométriques. Les aquifères peuvent être ou non en contact avec la mer. Le modèle est conçu en effet pour pouvoir gérer les nappes avec intrusion saline et traiter le problème de l'ouverture à la mer (sea side window). Il peut effectuer des calculs soit en régime permanent, ce qui permet d'obtenir directement des solutions équilibrées, soit en régime transitoire pour tenir compte des variations réelles en fonction du temps, de certaines conditions et sollicitations (pompages, infiltrations, sécheresse, etc). Le logiciel ESTRA est composé par les modules suivants :

- un module de gestion des données et de calcul en régime permanent, qui ne prend en compte que la dynamique de la phase d'eau douce seule : MONA ;
- un module de calcul en régime transitoire, qui ne prend également en compte que la dynamique de la phase d'eau douce seule ;
- un module de calcul en régime transitoire avec la dynamique des deux phases eau douce et eau salée ;
- un module de gestion des résultats pour les modules de calcul ci-dessus ;

Enfin, pour faciliter l'entrée des données et la préparation des résultats, le programme de calcul ESTRA est muni d'une interface d'échange avec un pré et un post-processeur.

4.1.4 - Modèle de la DGEau-UAC-DANIDA

Le Ministère des Affaires Etrangères du Danemark (Danida) en collaboration avec la Direction Générale de l'Eau (précédemment Direction Générale de l'Hydraulique) et l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin), ont travaillé entre 2004 et 2009, sur la mise au point d'un modèle d'écoulement et d'intrusion saline dans les eaux souterraines du champ de captage de Godomey (DGH, 2004 ; DG Eau et al., 2009).

Cette étude vise à analyser le système aquifère de Godomey pour mieux comprendre son fonctionnement et mettre au point un outil de gestion du champ captant. A cause de la nature complexe de l'écoulement souterrain, la première approche est de développer un modèle conceptuel en se basant sur les propriétés hydrogéologiques du milieu. La deuxième étape est le transfert de ce modèle dans un modèle mathématique. La description mathématique est faite par l'équation de différentiation partielle et l'état auxiliaire (Rasmussen, 2006) qui sont résolus par des méthodes numériques. A l'aide des ordinateurs, il est possible de résoudre ces équations en un temps record. Les équations partielles utilisées dans les modèles mathématiques pour l'écoulement d'eaux souterraines sont l'équation de Laplace pour l'état d'équilibre saturé et son dérivé pour l'état passager saturé.

L'équation de Laplace combine la loi de Darcy et l'équation de continuité dans une équation partielle simple de second degré (Rasmussen, 2006).

Il existe plusieurs types de méthodes numériques. Parmi eux, nous avons :

- les méthodes de différence finie et
- les méthodes d'éléments finis.

La première différence visuelle parmi ces deux méthodes est la discrétion de leur environnement. La méthode de différence finie utilise une maille régulière d'éléments de seize cellules. Elle est mieux pour les couches aquifères de forme rectangulaires ou prismatiques et de composition uniforme (Mc Donald et Harbaugh, 1988). Son avantage est qu'elle offre des formulations mathématiques facilement compréhensibles et résoud les algorithmes. Le code de MODFLOW développé par l'USGS est populaire et souvent appliqué partout dans le monde (Rasmussen, 2006).

Il découle des résultats du modèle calibré pour l'écoulement entre autres ce qui suit :

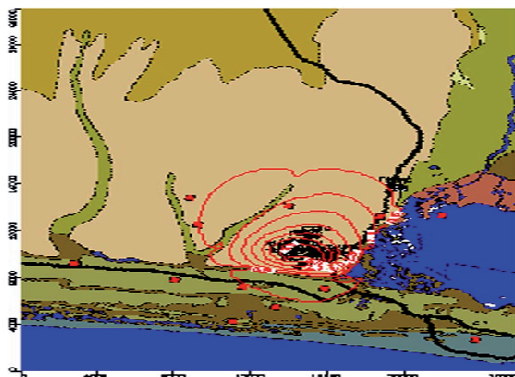


Figure 8 : Cône de rabattement (courbes d'égalité valeur de rabattement en rouge), occasionné par les pompages intensifs en régime permanent tel que calculé par le modèle de la DG Eau

1- Le cône de dépression occasionné par les pompages intensifs (en 2003) a passé la barre de 0 m pour se situer à environ -2 m pour la nappe supérieure superficielle et -3 m pour la nappe inférieure la plus captée à Godomey. Cette situation crée un risque potentiel d'intrusion saline dans le champ (Boukari et al., 2003). Il est moindre du côté de l'océan au Sud où il existe une ligne de partage des eaux

souterraines ; il est par contre menaçant du côté du lac Nokoué qui est très proche du champ de captage du côté est (figure 8). Le début de la salinisation, déjà constaté au niveau des forages les plus proches de ce lac, semble confirmer cette appréhension (Boukari et al., 2003).

2- Les écoulements vers le champ de captage sont sub-verticaux et latéraux ; les écoulements latéraux viennent préférentiellement du Nord (plateau) puis du Sud (plaine littorale) ; les écoulements en provenance de l'Est et surtout de l'Ouest sont moindres mais non nuls comme les bilans d'eau l'ont prouvé (Boukari, 2003). Les forages captant l'aquifère supérieur superficiel et le premier aquifère inférieur sont alimentés essentiellement par le système d'écoulement local ; ils sont donc relativement vulnérables à la pollution à partir de la surface ; les forages captant le deuxième aquifère inférieur notamment, les plus nombreux, sont alimentés par les systèmes d'écoulement intermédiaire et régional ; ils sont par conséquent moins vulnérables à la pollution superficielle ; le caractère régional du système d'écoulement éloigné augmente avec l'augmentation des débits de pompage (Figure 9).

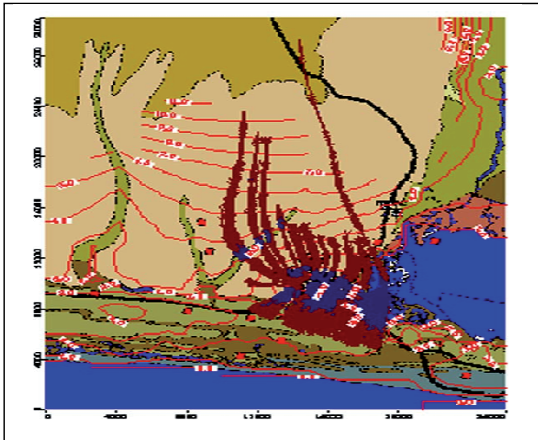


Figure 9 : Zone de contribution calculée par le modèle (trajectoire de parcours à rebours des particules d'eau) pour le champ captant de la SONEB à Godomey (DG Eau et al., 2009)

- 3- Les rabattements consécutifs au débit global de pompage en 2003 sont de l'ordre de 5,5 m pour l'aquifère supérieur et de l'ordre de 6,5 m pour l'aquifère inférieur ; ils augmentent rapidement avec le débit global de pompage (de l'ordre de 9,5 m pour les deux aquifères).
- 4- Le bilan d'eau pour le niveau de pompage en 2003 montre d'une part, que l'essentiel des apports d'eau dans le périmètre de captage de Godomey est représenté par la recharge (57%), suivi des apports souterrains latéraux nord (21%), sud (11%), est ou côté lac (09%) et ouest (02%) ; la lagune Djonou n'intervient que pour (08%). D'autre part, les sorties du périmètre de captage sont représentées essentiellement par les pompages (79%), les pertes vers la zone du lac (08%), le drainage par les dépressions (07%), les pertes vers la lagune Djonou (09%), et les pertes latérales souterraines vers le Nord (2,4%), l'Ouest (1,6%) et le Sud (01%).

Cette étude a été approfondie par l'utilisation des techniques isotopiques dans le cadre du projet AIEA BEN /8/003 (DG Eau-UAC-AIEA) dont la première phase s'est déroulée de 2005 à 2007.

4.2 - Propositions antérieures de périmètres de protection du champ de captage de Godomey

La SONEB a chargé NS Africa Projects (NSAP, 2003) d'investiguer sur l'état et le potentiel d'accroissement de l'approvisionnement en eau à partir du champ de captage de Godomey. A l'issue de cette étude, les recommandations ci-après ont été formulées pour la protection de la ressource en eau souterraine exploitée par la SONEB pour l'alimentation en eau potable des populations de la ville de Cotonou et ses périphéries:

les deux champs de captage nouvellement identifiés et situés au Nord-Ouest du champ de captage de Godomey devraient être protégés d'urgence de toute colonisation humaine anarchique, susceptible de causer une forte pollution des eaux de surface et de la nappe, comme c'est malheureusement, déjà le cas avec

le champ de captage de Godomey. Si possible, des terres pourraient être acquises en toute légalité et conservées pour le développement du champ de captage.

Une mauvaise qualité de l'eau et une exploitation non durable des ressources peuvent limiter le développement économique d'un pays, nuire à la santé de la population et mettre à mal ses moyens de subsistance. L'utilisation durable des ressources en eau est un véritable défi en raison des nombreux facteurs concernés, notamment les changements climatiques, la variabilité naturelle des ressources, ainsi que les pressions exercées par les activités humaines. A l'heure actuelle, la politique de l'eau est toujours en grande partie déterminée par des préoccupations politiques et économiques à court terme qui ne prennent en compte ni les avancées scientifiques ni les critères de bonne gouvernance. Le non-respect des périmètres de protection du champ de captage, sommairement délimités en 1983 par le groupement GIGG est la principale cause des risques de pollution anthropique de l'aquifère superficiel de la zone de captage intensif de Godomey. La gestion et la protection de la ressource en eau seraient alors prises en compte par les schémas d'aménagement du territoire. La protection de ces ressources apparaît comme une des responsabilités primordiales des services compétents de l'état (SONEB, DGEau), qui se doivent de délivrer aux consommateurs, une eau conforme aux normes sanitaires. L'instauration des zones de protection interfère avec d'autres aménagements (routes, urbanisation, activités agricoles, etc.), et exige une concertation entre tous les acteurs et intervenants dès l'engagement de la procédure.

Pour protéger les ressources en eau, un grand nombre d'informations géoscientifiques multidisciplinaires, multisources et souvent multiformats sont nécessaires. Ces informations doivent être structurées selon les thèmes suivants : la zone de recharge de la nappe, l'occupation du sol ; l'évaluation de la vulnérabilité à la contamination et la détermination de périmètres de protection. Cela implique la compilation de l'information existante, l'acquisition de nouvelles données, l'intégration et l'analyse des données géoscientifiques dans une base de données

relationnelles et l'interprétation des résultats en fonction de modèles hydrologiques pour faciliter la gestion et la protection de la ressource (Paradis et al., 2000). Pour cela, des solutions techniques et des outils de traitement et de manipulation des données doivent être mis en place.

En se référant au rapport des plans directeurs et études d'ingénierie pour l'alimentation en eau potable et l'évacuation des eaux pluviales, des eaux usées et des déchets solides (GIGG, 1983), la protection de la nappe du champ de captage de Godomey devrait se faire en délimitant quatre zones :

- périmètre de protection immédiate (zone intérieure)
- périmètre de protection rapprochée (zone d'influence d'hygiène)
- périmètre de protection éloignée (zones III et IV).

➤ **Zone** intérieure (zone I)

Le terrain autour du forage d'exploitation est acquis en toute propriété par l'exploitant (la SONEB) et clôturé. A l'intérieur de ce périmètre, sont interdits tout dépôt, toute installation ou activité autres que ceux strictement nécessaires à l'exploitation des points d'eau (GIGG, 1983).

➤ **Zone** d'influence sanitaire (zone II)

Elle est destinée à préserver le captage de toute contamination d'ordre bactériologique (contamination d'origine fécale essentiellement) et des pollutions chimiques massives et rapides ne permettant aucun délai d'intervention.

Cette zone doit être interdite de construction et par là, à l'abri d'une pollution par les eaux usées et déchets. Elle s'étend jusqu'à 300-400 m vers l'amont et vers l'aval de la file des forages (GIGG, 1983). De préférence, cette zone doit être limitée par des chemins ou sentiers et marquée par des poteaux de signalisation tous les 100 à 200 m.

➤ **Périmètre de protection éloignée** (zone III et zone IV)

En principe, ces zones devraient couvrir toute la surface du bassin versant d'alimentation de la nappe souterraine, mais ceci n'est pas possible pour le plateau d'Allada qui est très vaste. D'une manière générale, toute activité ou tout fait susceptible de porter atteinte directement ou indirectement à la qualité de l'eau est interdit à l'intérieur de ce périmètre.

Zone III : les limites s'étendent au Sud jusqu'aux lagunes, au Nord de la route Est-Ouest. Au Nord, elles s'étendent sur 1000-2000 m. Dans cette zone III, les interdictions et règlements sont appliqués d'une manière rigoureuse.

Zone IV : les interdictions et règles peuvent être appliquées moins rigoureusement. Cette zone s'étend sur 3 Km au Nord de la zone précédente.

Le rapport de recommandation de l'étude de faisabilité de l'amélioration du système d'alimentation en eau potable de la ville de Cotonou (Africa Projects, 2005) a révélé que la dernière décennie a vu une croissance significative du nombre de logements sur le champ de Captage de Godomey. Il est estimé qu'environ 80% de la surface des champs de captage sont construits et on peut observer un influx continu de personnes. Ceci aura un impact à long terme sur le développement de forages supplémentaires ainsi que sur la qualité de l'eau souterraine qui sera de plus en plus contaminée par les eaux usées et les déchets solides et autres.

En réalité, ces expériences n'ont pas abouti, car les mesures d'application n'ont pas suivi le contenu du rapport. La conséquence est la prise d'assaut du champ par les populations qui s'y sont installées sans un minimum de mesures de précaution pour le respect des servitudes. La forte urbanisation du champ de captage de Godomey fait que de nos jours, il est quasi impossible de déplacer la population pour libérer les périmètres de protection rapprochée.

En conclusion, on note que plusieurs études (Pallas, 1988 ; SOGREAH, 1997 ; Boukari, 1998 ; NSAP, 2005) ont été réalisées sur le champ de captage de Godomey en vue, notamment, de comprendre le fonctionnement du système aquifère exploité pour l'alimentation en eau potable de la ville de Cotonou et ses agglomérations, y compris les différents efforts de modélisation. Ces derniers ont abouti grâce au logiciel Modflow, à la mise au point de modèles d'écoulement des eaux souterraines qui ont permis de simuler le cône de rabattement.

Chapitre V : Diagnostic environnemental et qualitatif du champ de captage de Godomey et mesures de protection de la ressource

5.1 - Diagnostic environnemental et qualitatif du champ de captage de Godomey

5.1.1 - Sources potentielles de pollution et polluants identifiés

Les populations de la commune d'Abomey-Calavi s'adonnent à un certain nombre d'activités qui sont susceptibles de polluer les sols et les eaux à court, moyen et long termes sur le champ de captage de Godomey. Ces activités sont notamment :

- l'installation des maraîchers qui utilisent d'importantes quantités d'intrants agricoles le long des cours d'eau situés à l'Ouest du champ de captage notamment ;
- l'installation d'ateliers de teinturerie qui se sont installés sur le champ ;
- le déversement des déchets solides et liquides dans les puits abandonnés après les travaux de lotissement ;
- le déchargement sauvage d'ordures un peu partout sur le terrain ;
- l'installation des aires de lavage des engins ;
- l'ouverture de multiples laboratoires de photographie et de salons de coiffure qui produisent des eaux usées ;
- l'installation anarchique de garages de moto et d'automobile ;
- l'installation anarchique de postes de vente informelle de produits pétroliers ;
- l'installation d'un grand nombre de centres de santé sans incinérateur.

5.1.1.1- Pollution par les intrants agricoles

Les maraîchers sont installés dans toutes les zones humides du champ de captage (photo 1). Au total, deux cents maraîchers ont été dénombrés le long des plans d'eau de la commune lors de nos enquêtes de terrain en décembre 2010. Ils se sont organisés en une association dénommée AMACAC (Association des Maraîchers de la Commune d'Abomey-Calavi).

Ils utilisent des engrais chimiques tels que l'urée et le NPK (Azote, Phosphore, Potassium). Les pesticides qu'ils utilisent (photo 2) constituent une grave menace pour les eaux souterraines du champ de captage de Godomey car une bonne partie de ces produits s'infiltré dans le champ avec les eaux de pluie, étant donné que les niveaux dynamiques dans les forages restent quasi permanemment bas (Boukari, 1998).



Photo 1: Jardin de laitue le long de la rivière Bakamè à Togba (Abomey-Calavi). Cliché DOVONOU F. 2010



Photo 2: Pesticides utilisés par les maraîchers sur le champ de captage. Cliché DOVONOU F. 2010

La carte de localisation de ces maraichers (figure 10) montre que les zones humides sont entièrement occupées par ces maraichers qui ceignent pratiquement le champ de captage.

5.1.1.2 - Pollution liée à la teinture artisanale des textiles

Nos enquêtes sur le terrain ont révélé que le volume d'eau usée rejetée par jour dans chaque atelier est d'environ 300 litres. Pour les cinq ateliers recensés sur le champ, le volume total d'eau usée rejetée par jour est d'environ 1500 litres contenant

du sulfate et de la soude. Le développement de l'activité de teinturerie sur le champ de captage, qui se fait de façon artisanale est une menace sérieuse pour les eaux souterraines car dans les localités de Tankpè, de Mariaglèta et de Womey, les eaux usées issues de cette activité sont déversées en profondeur de la terre par le biais des fosses non étanches sans aucun traitement préalable.

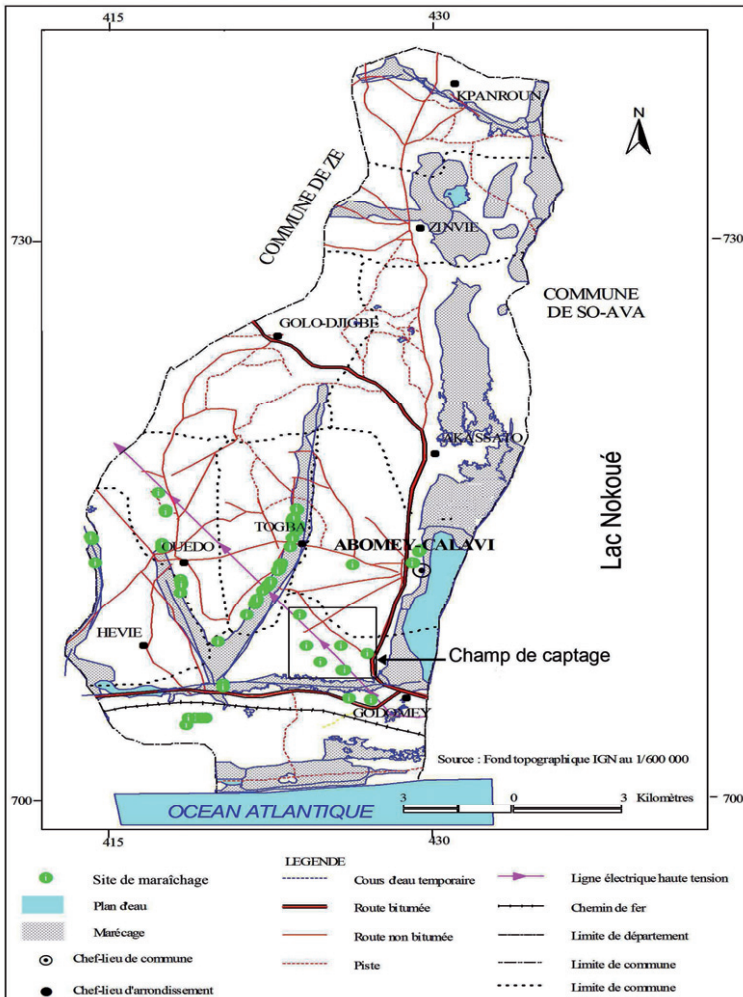


Figure 10 : Localisation des sites de maraîchage dans la commune d'Abomey-Calavi

D'après nos investigations, il ressort que les teintures sont le plus souvent importées d'Allemagne. Ces produits permettent une tenue durable des couleurs sur les tissus. Mais des colorants d'origine chinoise, moins coûteux et de qualité inférieure aux produits allemands sont de plus en plus répandus sur les marchés béninois. Des teintures importées du Nigeria sont également présentes, mais elles déteignent très facilement. La France, la Belgique, la Mauritanie, ainsi que la Sierra Léone ont été quelque fois désignés comme pays de provenance au cours de nos rencontres ; mais l'Allemagne, la Chine et le Nigeria en représentent les pays exportateurs vers le Bénin. Ce commerce permet aux industries de se débarrasser des substances qui ne sont plus aux normes européennes.

Il est à noter que ces substances transportées dans des barriques, sont conditionnées sur place dans des sachets plastiques, (photo3), avant d'être vendus aux teinturiers.



Photo 3 : Sachets de colorants utilisés pour la teinture. Cliché DOVONOU F. 2010

Les noms commerciaux, industriels ou scientifiques des colorants n'ont pas pu être obtenus. En effet, les teintures sont simplement désignées par leurs couleurs, par les teinturiers. De plus, aucune étiquette n'est présente sur les différentes formes d'emballage, et des factures pouvant indiquer des détails sur le contenu des matières importées n'existent pas.

La nature des effluents peut cependant être estimée de manière générale grâce aux méthodes utilisées pour réaliser la coloration des tissus. L'analyse physico-chimique de ces effluents dans la localité d'Abomey-Calavi a donné les résultats

suyvants : pH 10,72 alors que la norme OMS recommande un pH compris entre 6 et 6 ; Nitrate 250 mg/L alors que la concentration maximale admise par l'OMS est de 20 mg/L ; phosphate 27,50 mg/L alors que la norme est de 10 mg/L ; sulfate 2336,26 mg/L alors que la limite tolérée par l'OMS est de 250 mg/L.

Les teintures sont des produits chimiques non biodégradables, ce qui explique que la Demande Chimique en Oxygène (DCO) des eaux usées soit très élevée. L'emploi de soude dans le processus de teinture explique la forte basicité des rejets. La teneur en matière en suspension est importante contrairement aux matières biodégradables comme l'amidon qui ne sont plus présentes. En effet, ces dernières ont été totalement digérées par les bactéries. Mais dans tous les cas, la qualité des effluents peut légèrement varier d'un atelier de teinturerie à un autre. Cette composition dépend essentiellement des produits employés et de la méthode de teinte utilisée. Les eaux usées sont évacuées dans le sol (photo 4) ou dans des trous (photo 5) et constituent des sources de pollution ponctuelles sur le champ de captage de Godomey.



Photo 4 : Tissu en cours de teinture dans le colorant. Cliché DOVONOU F. 2010



Photo 5 : Fosse non étanche recueillant les eaux usées de l'atelier de teinturerie à Tankpè. Cliché DOVONOU F. 2010

5.1.1.3 -Pollution à partir des puits transformés en dépotoirs d'ordures ménagères

Dans beaucoup de localités de la commune d'Abomey-Calavi, les puits individuels qui se retrouvent sur les voies publiques sont soit systématiquement transformés en dépotoirs sauvages d'ordures, soit mis à contribution pour évacuer les

eaux de ruissellement qui stagnent sur les voies publiques. Ces puits dépotoirs (photos 6 et 7) ont attiré notre attention car ils sont pour la plupart dans les agglomérations et quelquefois sont entourés d'autres puits servant à alimenter les ménages en eau de boisson.



Photo 6 : Puits rempli de déchets solides à Zogbadjé. Cliché DOVONOU F. 2010



Photo 7 : Puits rempli de déchets solides à Tankpé. Cliché DOVONOU F. 2010

5.1.1.4 - Pollution liée aux décharges sauvages d'ordures

Le champ de captage de Godomey regorge d'une vingtaine de décharges sauvages d'ordures de superficie chacune supérieure à 50 m² (photo 8) qui ont été répertoriées.



Photo 8 : Dépotoir sauvage d'ordure sis derrière la station de la SONEB au Carrefour IITA.

Ces décharges sauvages d'ordures sont des sources potentielles de pollution des eaux souterraines, car exposées aux intempéries et à la pluie.

5.1.1.5 - Pollution liée aux à ciel ouvert non étanches

La plupart des habitants du champ de captage disposent de fosses non étanches comme puisard d'eaux usées (photo 9). Ils représentent 18% de la population. Cette pratique qui a cours dans la zone, est la conséquence de l'absence de réseau d'assainissement dans la commune.



Photo 9 : Latrine non étanche servant à recueillir les eaux usées d'une concession à Zogbadjè (Abomey-Calavi). Cliché DOVONOU F. 2010

Notons que le diagnostic environnemental du champ de captage intensif de Godomey révèle que les sources potentielles de pollution de l'aquifère superficiel sont multiples et multiformes et sont pour la plupart anthropiques. Il s'agit surtout des nombreuses décharges sauvages d'ordures, des puits transformés en dépotoirs d'ordures, des latrines non étanches, des activités agricoles qui se font avec l'usage de produits chimiques (engrais et pesticides) et des activités de teinturerie qui produisent une grande quantité d'eaux usées.

5.1.2 - Etat qualitatif actuel des eaux souterraines du champ captant

5.1.2.1 - Qualité physico-chimique des eaux des puits individuels

Les résultats des mesures de la température, de la salinité, des solides totaux dissous et de la conductivité sont dans les tableaux III et IV. Ces résultats présentent des valeurs variables d'un puits à un autre et d'une période à une autre. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées en janvier 2011.

Tableau III : Température, salinité, TDS et conductivité des eaux des puits individuels en juillet 2010

Puits	Température en °C	Salinité en mg/L	TDS en mg/L	Conductivité en µS/cm
Puits Tokan	28	0,10	71	195,60
Puits Togba	27	0,08	144	342
	27,5	0,06	110	263
Puits Ouèdo				
Puits Hèvié	30	0,10	39	93
Puits Tankpè	30	0,12	226	540

Tableau IV : Température, salinité, TDS et conductivité des eaux des puits individuels en janvier 2011

Puits	Température en °C	Salinité en mg/L	TDS en mg/L	Conductivité en µS/cm
Puits Tokan	27,8	50,63	71	150,4
Puits Togba	27,5	110,73	119	243
Puits Ouèdo	28,1	8,90	11	226
Puits Hèvié	28,7	15,48	34	69,8
Puits Tankpè	28,7	183,58	319	651

- Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH des eaux analysées varie de 5,5 à 7 et fluctue très peu au cours de l'année (figure 11). Ces eaux sont naturellement agressives. Les valeurs du pH sont en harmonie avec celles de la norme béninoise qui recommande que les pH des eaux de boisson soient compris entre 6,5 et 8,5.

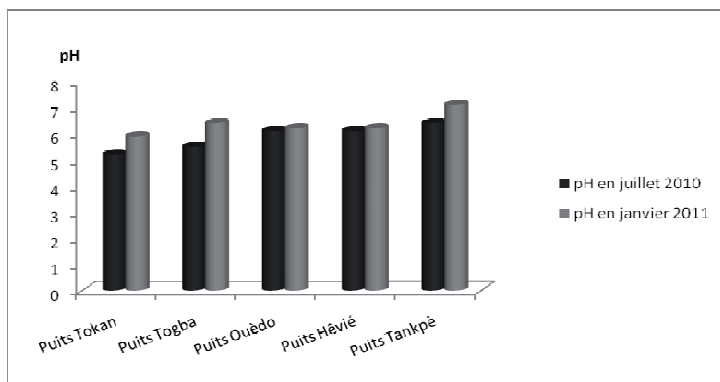


Figure 11 : Variation spatio-temporelle du pH des eaux des puits individuels

- Oxygène dissous

La teneur en oxygène dissous varie d'une saison à l'autre et d'un puits à un autre. La plus faible valeur est de 2 mg/L à Togba et la plus forte valeur est de 6 mg/L et est enregistrée dans un puits à Tankpè (Figure 12).

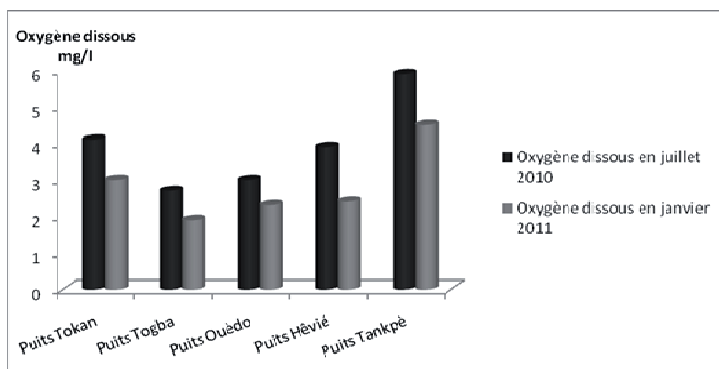


Figure 12 : Variation spatio-temporelle de la teneur en oxygène dissous des eaux des puits individuels

- Nitrate

La teneur en nitrates des eaux de puits individuels varient considérablement d'une localité à une autre sur le champ (Figure 13). Au moment où le taux de nitrate est très faible dans les eaux de puits de Togba (0,5 mg/L), on constate le contraire dans les eaux de puits de la localité de Tankpè où ce taux est de 140 mg/L dans les puits situés proche des sites de teinturerie alors que la valeur maximale admise au Bénin est de 45 mg/L.

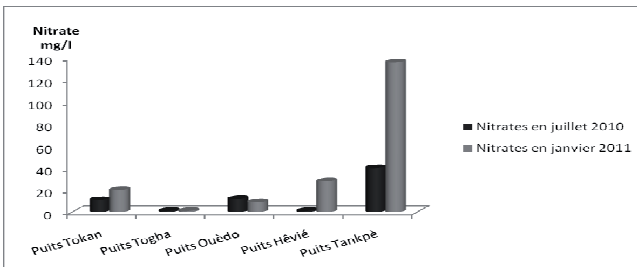


Figure 13 : Variation spatio-temporelle de la teneur en nitrate des eaux des puits individuels

- Nitrite

Les nitrites proviennent de la réduction des nitrates. Ils ont été détectés dans les eaux de puits de la localité de Togba à des concentrations de 0,7 mg/L (Figure 14). La norme béninoise étant de 3,2 mg/L, les nitrites de ces eaux ne sont pas une source de pollution des eaux de l'arrondissement de Togba.

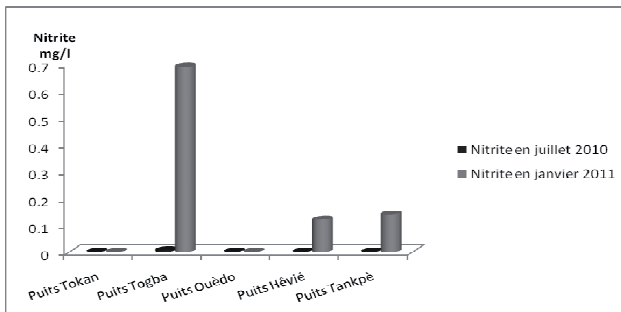


Figure 14 : Variation spatio-temporelle de la teneur en nitrite des eaux des puits

- Phosphate

Le taux de phosphate très faible en juillet a atteint son pic dans l'eau du puits de Tankpè. La valeur de 35 mg/L (figure 15) enregistrée est très élevée, car la norme béninoise est de 5 mg/L.

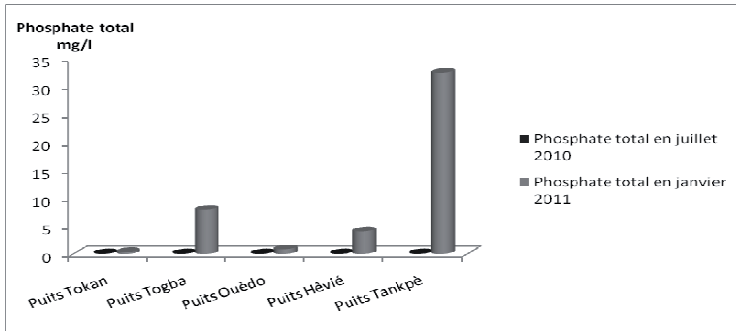


Figure 15 : Variation spatio-temporelle de la teneur en phosphate des eaux des puits individuels

- Azote total

La concentration en azote dans les eaux de puits du secteur d'étude varie également d'un puits à un autre et ceci en fonction des périodes de l'année (Figure 16). Cette concentration très basse en juillet augmente en janvier. La concentration la plus élevée est de 35 mg/L et a été décelée dans l'eau de puits de Tankpè. La norme béninoise étant de 1 mg/L, elle est largement dépassée dans l'eau de puits de Tankpè.

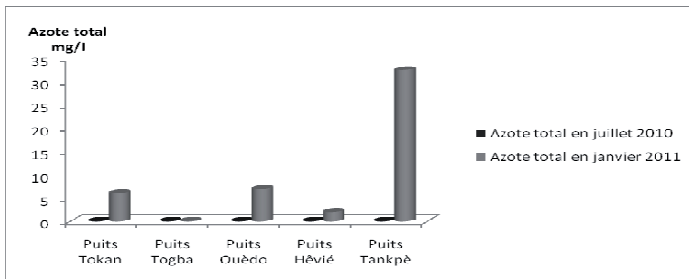


Figure 16 : Variation spatio-temporelle de la teneur en azote total des eaux des puits individuels

- Ammonium

La teneur en ammonium est relativement très faible dans les eaux de puits en juillet (Figure 17). Par contre, en saison sèche (Janvier), cette concentration augmente sur tous les sites, variant entre 1 et 9 mg/L alors que la concentration maximale recommandée par la norme béninoise est de 0,5 mg/L dans les eaux de boisson.

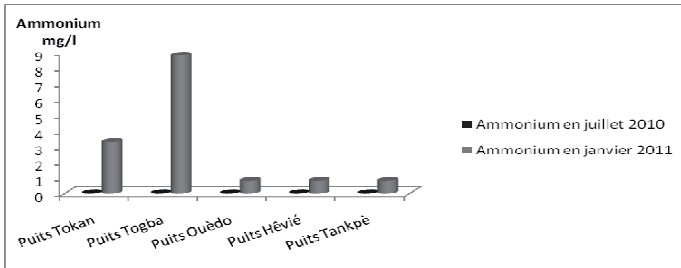


Figure 17 : Variation spatio-temporelle de la teneur en ammonium des eaux des puits individuels

- Fer total

Le fer est présent sous forme dissoute dans toutes les eaux de puits individuels (Figure 18). Sa concentration varie d'un puits à un autre entre 0,05 mg/L (Token) et 0,5mg/L (Togba). La norme béninoise étant de 0,3 mg/L, la concentration en fer est au-dessus de la norme dans l'eau de puits de Togba.

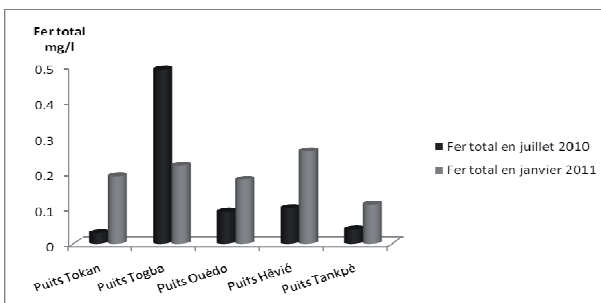


Figure 18 : Variation spatio-temporelle de la teneur en fer total des eaux des puits

- Manganèse

La norme de concentration en manganèse dans les eaux de boisson est de 0,1 mg/L. Cette norme est dépassée dans les localités de Tokan, Ouèdo, Hèvié et Tankpè. La plus forte concentration a été obtenue dans l'eau du puits de Ouèdo où elle est de 0,3mg/L (Figure 19).

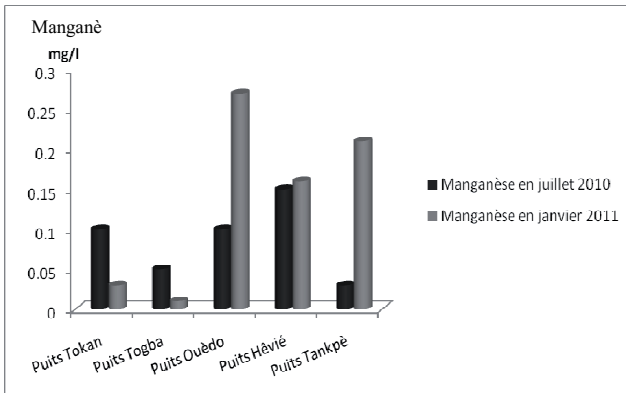


Figure 19 : Variation spatio-temporelle de la teneur en manganèse des eaux des puits

- Mercure

Le mercure est un métal lourd très toxique à l'organisme humain. Il a été décelé dans toutes les eaux de puits individuels du secteur d'étude (Figure 20). La plus faible concentration a été obtenue à Tokan et est de 0,1µg/L tandis que la plus grande concentration a été obtenue dans la localité de Hèvié (0,6 µg/L). La norme béninoise étant de 1 µg/L.

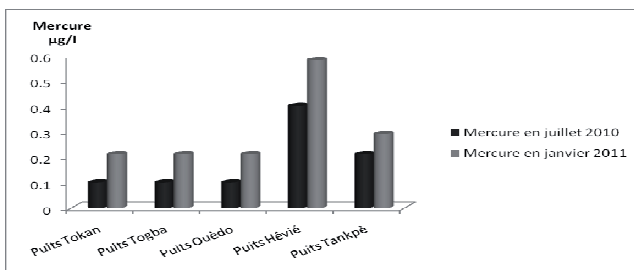


Figure 20 : Variation spatio-temporelle de la teneur en mercure des eaux des puits

- Cadmium

Dans toutes les eaux de puits du secteur d'étude, on retrouve du cadmium mais en concentration très faible (teneurs comprises entre 0,002mg/L et 0,006mg/L) (Figure 21). La norme de concentration limite étant de 0,005 mg/L, ces eaux ne sont pas polluées par du cadmium. Toutefois, il faut faire remarquer que la plus grande concentration obtenue dans l'eau de puits de Tankpè (0,006 mg/L) excède légèrement cette norme de 0,005 mg/L.

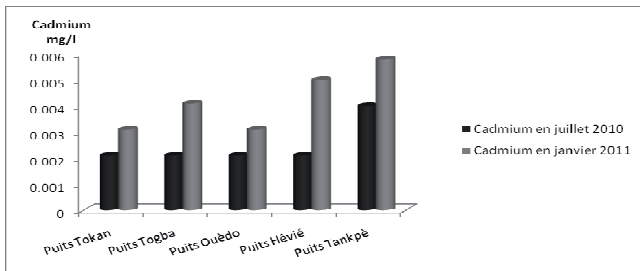


Figure 21 : Variation spatio-temporelle de la teneur en cadmium des eaux des puits

- Plomb

Le plomb a été détecté dans tous les échantillons d'eau de puits. La norme étant de 0,05 mg/L, elle est largement dépassée dans le puits de Hèvié dont la teneur est de 0,18 mg/L (Figure 22).

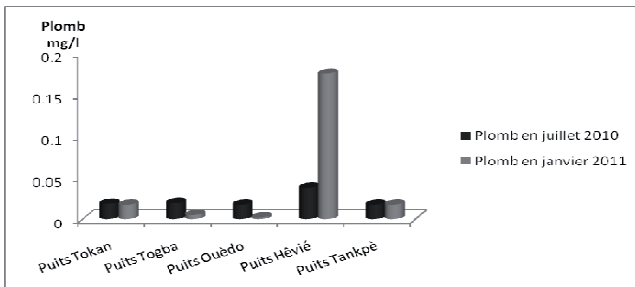


Figure 22 : Variation spatio-temporelle de la teneur en plomb des eaux des puits individuels

- Zinc

Le zinc a été retrouvé dans toutes les eaux de puits (Figure 23). Sa concentration varie d'un puits à un autre. La valeur la plus élevée a été obtenue dans l'eau du puits de Hèvié (0,04 mg/L). Cette valeur est en dessous de la norme béninoise qui est de 3 mg/L.

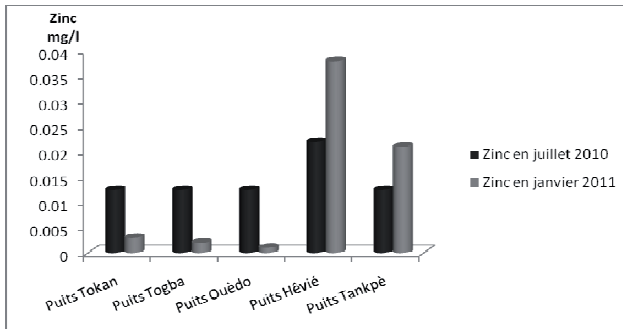


Figure 23 : Variation spatio-temporelle de la concentration en zinc des eaux des puits

- DCO

La DCO est faible en juillet et varie entre 2 mg/L et 8 mg/L (Figure 24). Par contre, en janvier, sa valeur a atteint 14 mg/L alors que la norme béninoise relative aux eaux d'alimentation est de 10 mg/L (concentration maximale admise).

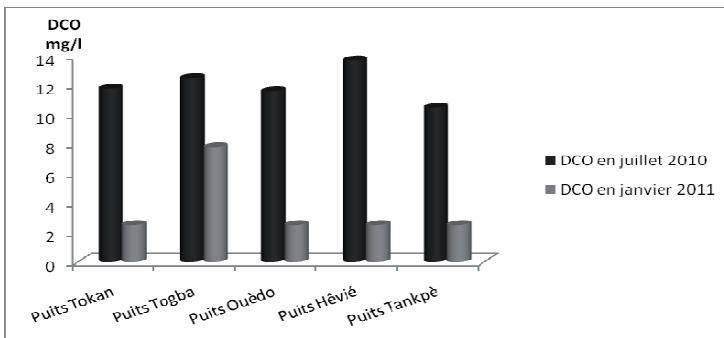


Figure 24 : Variation spatio-temporelle de la DCO des eaux des puits individuels

- DBO5

Les valeurs de la DBO5 sont comprises entre 2 et 6 mg/L. Pour la plupart des sites, elles sont faibles en janvier (2 mg/L) et élevées en juillet (6 mg/L). La valeur maximale est de 6 mg/L et a été obtenue dans l'eau du puits de Togba (Figure 25).

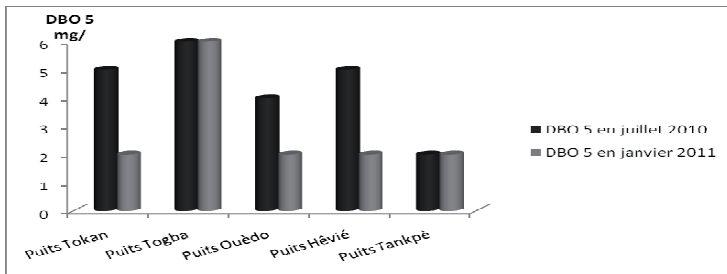


Figure 25 : Variation spatio-temporelle de la DBO₅ des eaux des puits individuels

Le diagnostic qualitatif et environnemental de l'aquifère superficiel de la zone de captage intensif de Godomey révèle la présence de potentielles sources de pollution que sont les activités agricoles, les ateliers de teinturerie, les décharges sauvages d'ordures, les puits transformés en dépotoirs d'ordures et les nombreuses latrines non étanches. Cette situation a des impacts sur la qualité physico-chimique des eaux des puits individuels situés sur le champ de captage. Ainsi, des teneurs hors normes en nitrate, phosphate, azote total, ammonium, fer total, manganèse, mercure, cadmium et plomb ont été détectées dans les eaux des puits individuels des localités de Tankpè, Togba et Hèvié.

5.1.2.2 - Qualité microbiologique des eaux des puits individuels du champ captant

La recherche présomptive des coliformes en milieu liquide (Mac-coke) de l'eau du puits situé près du forage F11 a donné un résultat négatif, mais pour cette même eau, en milieu solide (Endos), elle a révélé la présence de coliformes. L'eau de ce puits ne dispose par conséquent pas d'assez de coliformes pour faire virer le Mac-

coke. Les résultats de la recherche présomptive de coliforme sont donc liés à la quantité de coliformes dans l'eau.

Toutes les eaux des puits individuels analysées sur le champ captant sont contaminées par des germes indicateurs de pollution bactériologique (tableau IV). La présence d'Escherichia coli et des streptocoques fécaux révèle une contamination fécale des puits car la plupart des latrines ne respectent pas les normes sur le champ de captage.

5.1.2.3- Qualité physico-chimique des eaux des forages du champ captant

- Température et conductivité

Les températures obtenues pour les eaux de la plupart des forages sont acceptables et varient entre 29,7 °C et 30,8 °C. Toutes les eaux des forages ont une conductivité relativement faible, excepté les forages F7, F9, et F11 dont les conductivités sont respectivement de 500µS/Cm, 697µS/cm et 595µS/cm (tableau V).

Tableau IV : Caractéristiques bactériologiques des eaux des puits situés à côté des forages.

Paramètres	Unité	Puits voisins des forages A					Puits voisins des forages F				
		PA1	PA9	PA11	PA12	PA13	PF7	PF9	PF11	PF12	PF13
Germes banals en 24h à 37°	Nbre/ml	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB
Germes banals en 48h à 37°	Nbre/ml	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB
Recherche présomptive des coliformes	Positive ou négative	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Streptocoques fécaux après 48h à 44°C	Nbre/ml	44	04	32	32	120	68	36	12	12	56
Coliformes fécaux après 48h à 44°C	Nbre/ 100 ml	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB	IB
Escherichia coli après 48h à 44°C	Nbre/ 100 ml	48	76	08	108	12	80	76	308	IB	IB
Clostridium perfringens après 48 h à 44°C	Nbre / 20 ml	5	17	18	68	32	50	35	12	23	20

IB : Innombrable, + : Positif, - : Négatif

Tableau V : Températures et conductivités de l'eau des forages

Forages	Température en °C	Conductivité en $\mu\text{S/cm}$
A1	30,8	99
A9	30	98
A11	29,7	97,5
A12	31	98,5
A13	30,5	96
F7	30	500
F9	30	697
F11	31	595
F12	30	98
F13	30,5	80

- Potentiel d'Hydrogène

Le pH des eaux analysées varie de 4,69 à 5,82 (Figure 26) alors que la norme béninoise recommande que le pH des eaux d'alimentation soit compris entre 6,5 et 8,5.

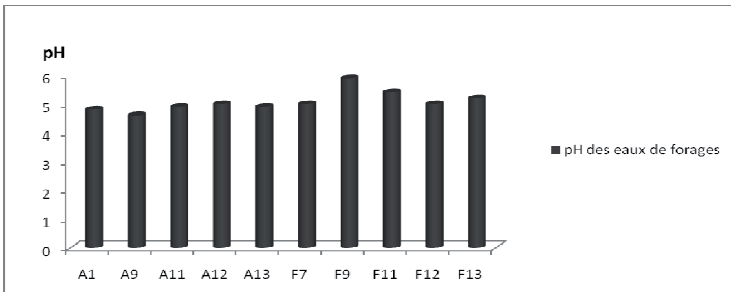


Figure 26 : Variation spatio-temporelle du pH des eaux des forages en juillet 2010

- Turbidité

La plus grande valeur de turbidité de l'eau des forages est de 1,6 Unité Néphélométrique de Turbidité (UNT) et est enregistrée au niveau du forage F9 (Figure 27). Comparée à la valeur maximale admissible par la norme béninoise qui est de 5 UNT, les eaux des forages respectent les normes en matière de turbidité.

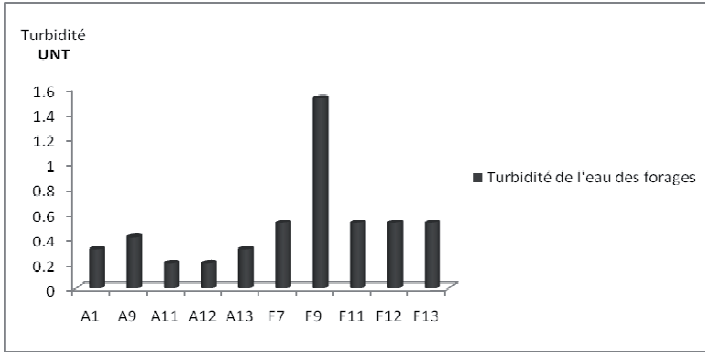


Figure 27 : Variation spatio-temporelle de la turbidité de l'eau des forages en juillet 2010

-Oxydabilité

L'oxydabilité renseigne sur la quantité de matières organiques et minérales présentes dans l'eau. L'oxydabilité de l'eau des forages présente des valeurs relativement élevées allant jusqu'à 1,2 mg/L pour l'eau du forage A13 (Figure 28).

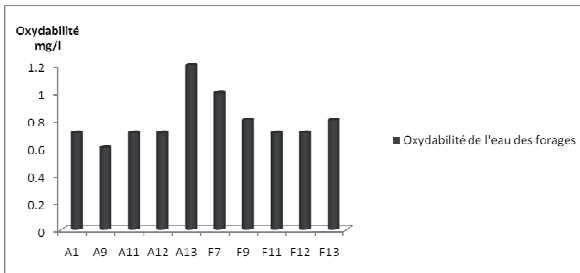


Figure 28 : Variation spatio-temporelle de l'oxydabilité de l'eau des forages en juillet 2010

- Chlorures

La figure 29 montre que les teneurs en chlorure dans les eaux des forages F7, F9 et F11 sont élevées et atteignent 250 mg/L dans le forage F9 alors que la concentration limite recommandée par l'OMS est de 350 mg/L.

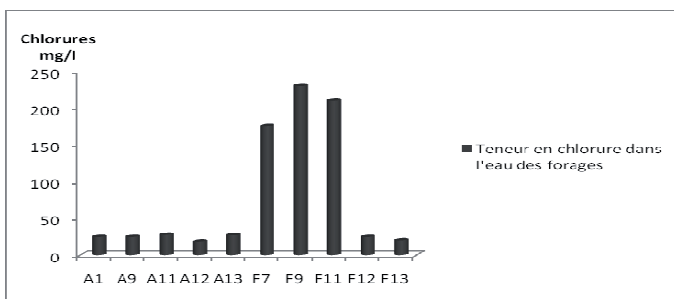


Figure 29 : Variation spatio-temporelle de la teneur en chlorure des eaux des forages

Le phénomène d'intrusion saline a été suivi sur plusieurs forages de 2002 à 2009 et a donné les résultats suivants (Figure 30).

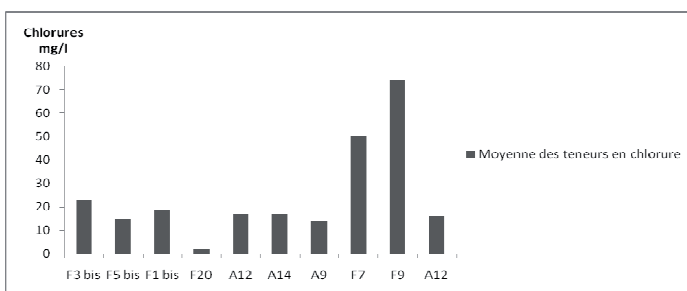


Figure 30 : Moyenne des concentrations en chlorure de l'eau des forages de 2002 à 2009

- Nitrate

La figure 31 illustre la variation de la teneur moyenne en nitrate dans les eaux des forages de 2002 à 2009.

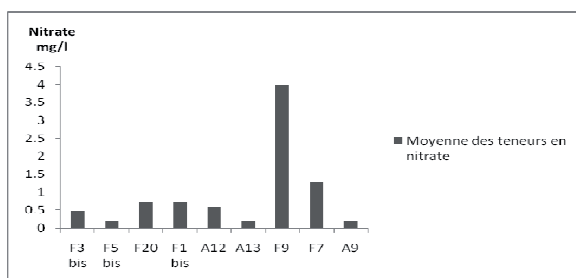


Figure 31 : Moyenne des concentrations en nitrate de l'eau des forages de 2002 à 2009

Les teneurs en nitrate dans les eaux des forages ont des valeurs relativement faibles entre 2002 et 2005. Mais à partir de 2006 jusqu'en 2009, la plupart des eaux des forages ont des teneurs relativement élevées en nitrate.

- Nitrite

Les nitrites proviennent de la réduction des nitrates sous l'influence des bactéries. Leur présence indique un état de pollution critique de l'eau.

Parmi tous les dix forages suivis, seul le forage F9 a une concentration élevée en nitrite (0,01mg/l) (Figure 32).

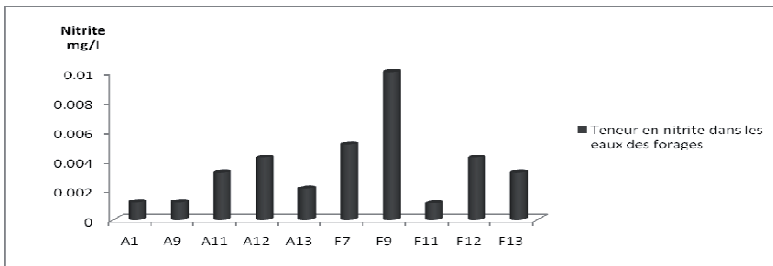


Figure 32 : Variation spatio-temporelle de la teneur en nitrite des eaux des forages

5.1.2.4 - Qualité microbiologique des eaux des forages du champ captant

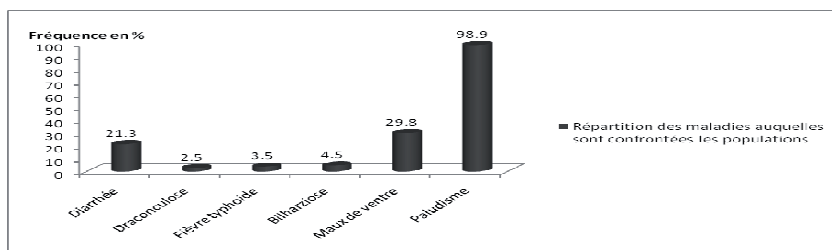
Les données du tableau VI montrent que les eaux des forages ne sont pas contaminées par des germes microbiens. Ceci s'explique par la profondeur à laquelle l'eau se situe. Néanmoins, les résultats du forage F11 nécessitent d'être vérifiés car la présence de germes banals dans cette eau, si elle se confirmait, pourrait être la conséquence d'une pollution bactériologique provenant probablement des activités anthropiques.

Tableau VI : Caractéristiques bactériologiques des eaux des forages du champ de captage de Godomey.

Forages	A1	A9	A11	A12	A13	F7	F9	F11	F12	F13
Dénombrement de germes banals en 24 h à 37°C	00	00	00	02	00	01	01	06	01	00
Forages	A1	A9	A11	A12	A13	F7	F9	F11	F12	F13
Dénombrement de germes banals en 48 h à 37°C	02	00	00	02	01	01	01	15	01	00

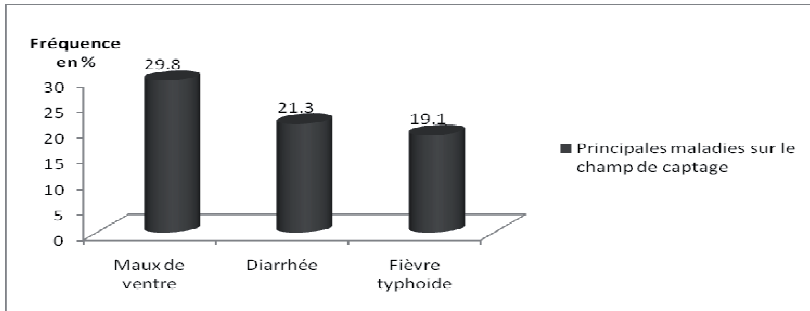
5.1.3 - Impacts sanitaires possibles de la qualité des eaux du périmètre de captage

Les figures 33 et 34 révèlent que les populations qui s'alimentent à partir des eaux de puits individuels sont confrontées aux maladies que sont la diarrhée, les maux de ventre et la fièvre typhoïde. C'est le cas des populations riveraines du cours d'eau de Bakamè dans l'arrondissement de Togba. Cela dénote que la source d'approvisionnement en eau reste la principale cause des maladies auxquelles sont confrontées les populations, puisque cette eau est polluée. En effet, dans les autres localités, comme Tankpè, Godomey-Togoudo, Alègléta, Zogbadjè et Womey, ces maladies sont beaucoup répandues d'autant plus que les populations enfouissent les déchets solides ménagers et biomédicaux dans le sol, dans les puits et rejettent les eaux usées dans les fosses non étanches.



Source : Enquêtes de terrain

Figure 33 : Répartition des maladies auxquelles sont confrontées les populations des zones humides du champ de captage



Source : Enquêtes de terrain

Figure 34 : Principales maladies sur le champ de captage

5.1.4- Avis des populations par rapport à leur déguerpissement des périmètres

Afin de recueillir l’avis des occupants des périmètres sur la libération ou non des périmètres habités, nous avons effectué un sondage dont les résultats sont sur la figure 35.

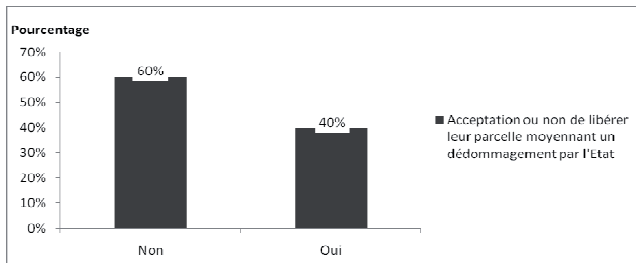


Figure 35 : Résultat de sondage d’opinion auprès des populations du périmètre rapproché du champ de captage de Godomey quant à leur disposition ou non à libérer leur parcelle de terrain moyennant un dédommagement par l’Etat

Il ressort des résultats de ce sondage que la majeure partie des occupants des périmètres (60%) sont opposés au déguerpissement du site, même contre

dédommagement par l'Etat. Actuellement, il n'est pas possible de déplacer les populations pour libérer les périmètres de protection. Mais ce qui est faisable, c'est de faire appliquer les servitudes sur les périmètres du champ de captage. Ceci passera nécessairement par la mise en application de la réglementation en matière de gestion de l'eau au Bénin. Les innombrables décharges sauvages d'ordures doivent être détruites et une interdiction formelle de déverser des déchets dans les puits individuels doit se faire. La proposition du nouveau découpage des périmètres de protection doit conduire, si elle est mise en œuvre, à minimiser les impacts de la pollution anthropique sur la ressource en eau. Sa mise en application doit bénéficier de l'appui juridique des autorités étatiques et des élus locaux de la commune d'Abomey-Calavi.

Contrairement aux eaux des forages qui ne sont pas sujettes à la pollution chimique et bactériologique, les eaux des puits individuels ont des concentrations en éléments chimiques qui dépassent parfois les normes béninoises et celles de l'OMS. Cette pollution est la conséquence directe du manque d'hygiène et d'assainissement aux voisinages du périmètre du champ de captage de Godomey. Pour une gestion durable de la ressource, des servitudes doivent être prescrites et mises en application sur des périmètres de protections requis.

5.2 - Eléments pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan d'actions stratégiques de protection du champ de captage intensif de Godomey

5.2.1- Délimitation des zones de protection

5.2.1.1 - Identification de la zone d'appel du champ captant

Les résultats du travail de délimitation des zones de protection du champ captant de Godomey sont présentés sur la figure 36.

➤ *Zone d'influence*

La zone d'influence du champ de captage de Godomey, telle que calculée par le modèle de la DG Eau et al., a la forme d'une mangue tournée vers le lac Nokoué avec la bordure occidentale avec laquelle elle fait corps. Elle s'étend vers le Sud pour englober les localités de Godomey-Atrokpocodji, vers le Nord jusqu'à la hauteur d'Arconville-Hopital de zone (Abomey-Calavi) et vers l'Ouest jusqu'aux voisinages du bras droit de Bakamè

(Bakamè ouest). Elle est excentrée par rapport au champ de captage qui se situe alors dans sa demi-portion méridionale. La présence de la lagune Djonou, qui fonctionnerait comme une limite d'alimentation expliquerait cette position excentrique, la conductivité hydraulique appliquée à l'aquifère superficiel dans le modèle étant unique. Sa superficie est d'environ 49 km².

➤ *Zone de contribution*

La zone de contribution du champ de captage de Godomey a la forme d'un têtard, dont la queue est orientée Nord-Sud, le tronc et la tête sont orientés NNO-SSE. La queue est allongée vers le Nord jusqu'à la hauteur de la parallèle 722500 UTM environ. Le tronc couvre le secteur de Togba, Tokan, Alansankomè, Houèto et Somè. La tête est centrée sur le champ de captage et s'étend (i) vers le Sud-Est jusqu'au quartier de Ylomahoutondji et au CEG le Nokoué (partie orientale des 9^{ème} et 13^{ème} Arrondissement de Cotonou), (ii) vers le Sud jusqu'à la limite Nord de Dèkoungré (au Sud de la RNIE1), entre Godomey à l'Est et Cocotomey à l'Ouest, (iii) vers le Nord jusqu'à la hauteur de Calavi centre. Sa superficie est estimée à environ 120 Km²

➤ *Zone d'appel*

La zone d'appel du champ de captage de Godomey correspond au secteur où la zone d'influence et la zone de contribution se recourent. Elle englobe autour du champ, la localité de Godomey au Sud, l'Université et Calavi centre au Nord, la

RNIE 1 et une petite portion Ouest du lac Nokoué à l'Est, avec une excroissance vers le Nord-Ouest jusqu'à la localité de Togba. Sa superficie est d'environ 25 Km².

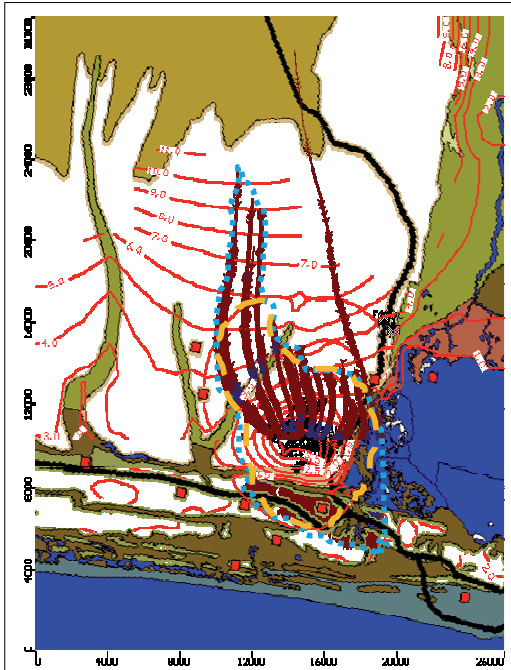


Figure 36 : Délimitation de la zone d'appel du champ de captage de la SONEB de Godomey (tirt jaune doré) par superposition de la zone d'influence (courbes fermées en rouge) et de la zone de contribution (contour en pointillés bleu) calculées par le modèle en régime permanent (DG Eau et al., 2009).

5.2.2 - Délimitation des aires de protection

Trois aires classiques de protection ont été retenues et délimitées :

❖ Aire de protection immédiate

Elles sont déjà mises en place pour chaque forage par la SONEB à l'exception du forage A14. Ce sont des aires carrées de 25 m de côté autour de chaque forage. Elles sont donc individuelles pour ces forages, ceux - ci étant en effet séparés les uns des autres par des distances supérieures à 200 m en général. Il est d'ailleurs irréaliste de

vouloir augmenter ces dimensions au vu de l'état d'occupation du site actuellement. Elles seront donc gardées telles quelles. Le périmètre de protection immédiat ou zone I est un espace restreint destiné à la protection de l'ouvrage lui-même, dans lequel toute activité est interdite, à l'exception de celles liées à l'exploitation de l'eau. La parcelle est acquise en pleine propriété et clôturée, munie d'une porte fermée à clé. Seul un acte de déclaration d'utilité publique peut autoriser les activités qui ne seraient pas incompatibles avec la préservation de la qualité de l'eau. Il doit être d'au moins 10 m tout autour du captage ou en amont de la source, le cas échéant.

Le périmètre immédiat et ses abords doivent être déboisés pour les puits maçonnés, les racines des arbres détériorant la maçonnerie, les cuvelages et permettant ainsi l'apport d'eaux superficielles parasites (BCMELP, 2000). Sur le champ de captage de Godomey, les grillages de clôture du périmètre immédiat sont partiellement ou totalement détériorés (1/3 des forages) et les populations accèdent facilement aux équipements avec tous les risques de contamination que cela comporte. Cependant, un effort de clôture en maçonnerie des périmètres immédiats par la SONEB a commencé en 2011. L'absence de portes d'accès aux ouvrages fait toutefois que les ouvrages sont exposés à toute forme de sabotage.

❖ Aire de protection rapprochée

En toute rigueur, sa délimitation devrait comme cela a été souligné précédemment, être basée sur l'analyse des temps de résidence (de transfert) calculés. Ces derniers ne sont pas disponibles étant donné que, dans notre cas, l'objet de modèle construit n'était pas la protection du champ en tant que tel. Toutefois, dans le cas d'espèce (aquifère de sable et de grès), ces temps de résidence sont de l'ordre des centaines et de milliers d'années. Délimiter une zone II n'est par conséquent pas très important.

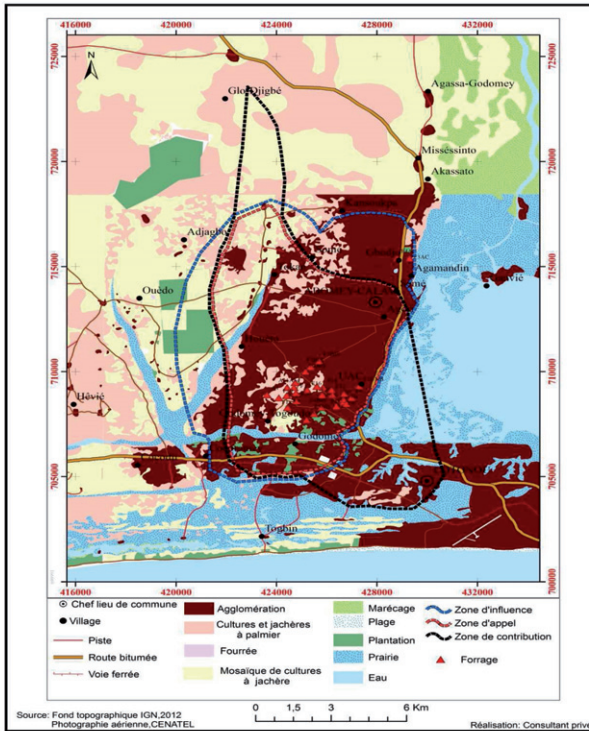


Figure 37 : Zone d'influence, zone de contribution et zone d'appel du champ captant de la SONEB à Godomey issues du modèle en régime permanent

Cependant, nous y avons procédé en nous basant sur les courbes de rabattement et l'hydrologie de surface. Cette limite se présente donc comme suit : (Figure 37).

- au Nord, à l'Ouest comme à l'Est du champ, la limite est constituée par la courbe de rabattement 2 m de la surface piézométrique de la nappe superficielle induit par les forages, c'est-à-dire 1 km de distance environ autour du champ captant. Elle rejoint au Sud-Ouest la rive nord de la lagune Djonou qui devient alors son prolongement vers l'Ouest. Ce cours d'eau superficiel constitue en effet une zone très sensible du point de vue environnemental. A l'extrême est, la limite se confond avec la rive ouest du lac Nokoué, plan d'eau également très sensible à la pollution. Cette rive gauche devient à partir de ce point de jonction, le

prolongement de la limite est de la zone II vers le Nord, prenant ainsi en compte tout au moins la portion ouest du lac Nokoué.

- à l'extrême sud du champ, la limite de la zone II se confond avec la rive sud de la lagune Djonou depuis le lac Nokoué à l'Est jusqu'au bras est de Bakamè à l'Ouest.

❖ Aire de protection éloignée

Elle devrait couvrir toute l'aire de contribution du champ. Mais étant donné que l'aquifère est de nature à avoir de temps de résidence très longs (de l'ordre des centaines ou des milliers d'années), nous l'avons limitée à la zone d'appel comme l'illustre la figure 38. Bien entendu, elle prend en compte également les zones sensibles constituées par le lac Nokoué et la lagune Djonou. C'est une zone de protection pour le long terme. Le périmètre de protection éloigné ou zone III est destiné à permettre une gestion de l'espace dans laquelle coexistent aménagement du territoire et protection de l'eau. Cette zone doit être protégée contre la pollution engendrée par les produits chimiques ou radioactifs.

5.3 - Menaces de contaminations prioritaires et mesures de gestion

5.3.1- Menaces de contaminations prioritaires

Il existe sur le champ de captage de Godomey, un certain nombre d'éléments qui présentent de sérieuses menaces pour la qualité physico-chimique et bactériologique des ressources en eau exploitées par la SONEB. Nous pouvons citer : Les puits transformés en dépotoirs d'ordures ; les latrines non étanches ; les décharges sauvages d'ordures ; les ateliers de teinturerie ; les périmètres maraichers ; la Route Nationale Inter Etat N° 1 ; la centrale thermique de Mariagléta ; la lagune Djonou ; les garages auto et moto et enfin le lac Nokoué.

5.3.2 - Mesures de gestion

Pour prévenir tout risque de pollution de la ressource, les mesures de gestions suivantes sont envisagées :

- identifier et fermer les puits et forages abandonnés;
- acquérir de parcelles de terres dans les zones immédiates de recharges;
- évaluer l'occupation du sol;
- réaliser un répertoire pour le suivi des infrastructures sources potentielles de pollutions ;
- assurer une bonne gestion des déchets solides sur le champ de captage;
- suivre les systèmes d'évacuation des eaux pluviales et de déchets liquides et solides ;
- faire le suivi analytique des eaux des piézomètres;
- faire participer le public et tous les acteurs à l'élaboration et la mise en œuvre du plan d'actions stratégiques. L'éducation publique se fera à travers des renforcements de capacité aux apprenants sur la qualité de l'eau, la protection des aquifères, la protection des captages, le respect des servitudes sur un champ de captage. Les cibles sont les groupes d'écoles, les associations de développement, les organisations non gouvernementales (ONG), les élus locaux, les sages et notables.

5.3.3 - Mesures de mitigation

La forte urbanisation du champ de captage de Godomey n'est pas de nature à garantir à l'aquifère superficiel une qualité irréprochable. Cependant, à défaut de libérer les périmètres de protection de ses occupants, des mesures de mitigation peuvent être prises à savoir :

- construire un système d'évacuation des eaux usées sur le champ de captage ;
- installer dans la commune d'Abomey-Calavi et hors du périmètre de protection rapprochée, une station d'épuration des eaux usées domestiques ;

- former les artisans de teinturerie sur les risques de pollution des eaux souterraines liés aux rejets de leurs effluents en profondeur de la terre ;
- former les maraichers sur les risques de pollution des eaux de surface liés à l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides ;
- encourager l'utilisation des bio pesticides par les maraîchers ;
- assurer une gestion efficace des déchets solides ménagers et biomédicaux.
- veiller au respect des restrictions d'usage sur les périmètres du champ de captage ;
- lutter contre toutes formes de pollution chimique et bactériologique des eaux de surface situées dans l'aire du périmètre de protection rapprochée.

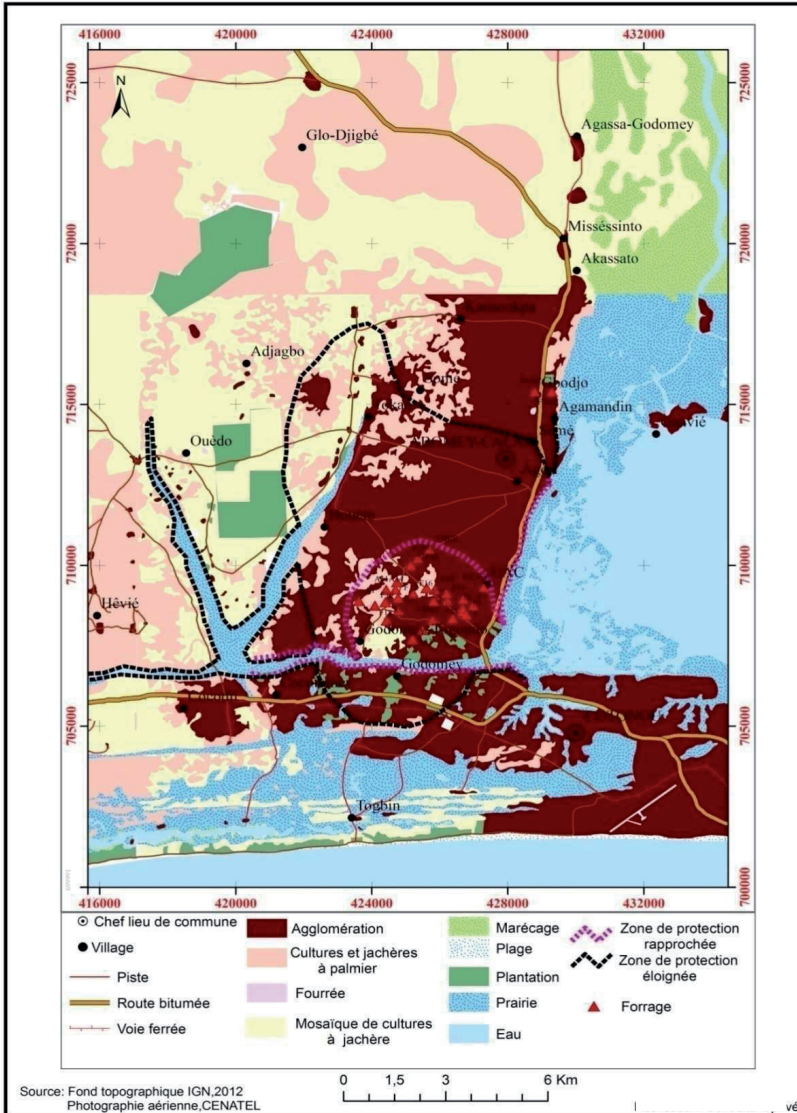


Figure 38 : Limites délimitées respectivement par la zone de protection rapprochée et la zone de protection éloignée du champ captant de la SONEB à Godomey

5.4 -Dispositif de surveillance et d’alerte sur la qualité des eaux du champ de captage de Godomey

Il s’agit d’un système moderne, informatisé, qui utilisera les progrès dans le domaine des Technologies de l’Information et de la Communication pour surveiller la qualité des ressources en eau souterraine du Sud du plateau d’Allada. Le dispositif aura un double intérêt. Il permettra d’une part de suivre en temps réel l’évolution du phénomène d’intrusion saline qui menace les forages situés au Sud-Est du champ de captage et d’autre part servira d’outil d’aide à la décision aux acteurs ayant à charge la gestion des ressources en eau au Bénin. Il s’agira d’un important outil pour la constitution des bases de données sur la qualité physico-chimique des eaux du champ de captage de Godomey en particulier et des eaux du Bénin en général. Si l’expérience est concluante, il sera procédé à sa généralisation car ce dispositif offrira des avantages en coût et en temps pour les acteurs du secteur de l’eau. A l’instar de beaucoup d’autres pays, le Bénin pourra disposer d’une banque de données sur la qualité chimique de ses eaux.

5.5 - Plan de gestion des imprévus ou catastrophes (contingency planning)

Si le champ de captage de Godomey était pour une raison ou une autre, hors d’usage, nous avons suggéré trois alternatives. La première consisterait à faire appel aux champs de captage voisins à savoir ceux d’Abomey-Calavi, de Ouidah et de Porto-Novo. La deuxième alternative consistera à capter l’eau du fleuve Ouémé en amont de la zone de remontée de l’eau salée (Hêtin-sota, Dangbo, Adjohoun). La troisième alternative consistera à augmenter le débit de pompage dans les forages de Ouèdo en attendant d’ouvrir un autre champ. Seule une étude écotoxicologique et économique approfondie nous permettra de retenir une des solutions ci-dessus envisagées.

En conclusion, après avoir identifié la zone d'appel du champ de captage de Godomey, nous avons procédé à la délimitation des aires de protection. En dehors des périmètres de protection immédiats qui déjà, sont en général mis en place par la SONEB, nous avons proposé pour une première fois, les limites du périmètre de protection rapprochée et du périmètre de protection éloignée sur la base des conditions hydrogéologiques du système aquifère exploité. Un dispositif a été également proposé, pour la surveillance de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau à l'intérieur des zones de protection, avec un système d'alerte en cas d'accident de pollution. L'objectif recherché est d'assurer une exploitation et une gestion durables des ressources en eau. Il reste à élaborer et mettre en œuvre un plan d'actions à cet effet par les structures compétentes de notre pays, la SONEB notamment.

Conclusion

Plusieurs études ont été réalisées sur le champ de captage de Godomey en vue, notamment, de comprendre le fonctionnement du système aquifère exploité pour l'alimentation en eau potable de la ville de Cotonou et ses agglomérations, y compris les différents efforts de modélisation à savoir la modélisation entreprise par Pallas en 1988 qui avait pour but de simuler la réaction de la nappe du Continental Terminal ; la modélisation réalisée par le groupement TurkPak International/SCET-Tunisie en vue de simuler le système aquifère de la plaine littorale du Bénin ; l'évaluation dans le temps et dans l'espace du risque d'intrusion saline dans la nappe du Continental Terminal du Plateau d'Allada par une équipe de SOGREAH/SCET et enfin la mise au point d'un modèle d'écoulement et d'intrusion saline dans les eaux souterraines du champ de captage de Godomey. Tous Ces efforts ont abouti à la mise au point de modèles d'écoulement des eaux souterraines qui ont permis de simuler entre autres le cône de rabattement en régime permanent. Ce cône de rabattement calculé du champ captant ainsi que la zone de contribution de celui-ci, nous ont servi de base pour la réalisation de cet ouvrage.

Le diagnostic environnemental du champ de captage intensif de Godomey révèle que les sources potentielles de pollution de l'aquifère superficiel sont multiples et multiformes et sont pour la plupart d'origine anthropiques. Il s'agit surtout des nombreuses décharges sauvages d'ordures, des puits transformés en dépotoirs d'ordures, des latrines non étanches, des périmètres agricoles avec usage de produits chimiques (engrais et pesticides), des ateliers de dépannage moto et auto, des sites de teinturerie, source de grande quantité d'eau usée et des points de vente informels de produits pétroliers.

Contrairement aux eaux des forages qui ne sont pas encore sensiblement sujettes à la pollution chimique et bactériologique car protégées par les couches géologiques, les eaux des puits individuels ont des concentrations d'éléments chimiques qui dépassent parfois les normes OMS comme celles béninoises. Cette

situation est la conséquence directe du manque d'hygiène et d'assainissement à l'intérieur et aux voisinages du périmètre du champ de captage de Godomey.

Plusieurs facteurs conditionnent la progression de cette pollution. Il s'agit des concentrations des polluants des eaux usées, la nature des déchets solides et des sols, la lithologie et la perméabilité de l'aquifère exploité, l'épaisseur de la zone non saturée.

Après avoir identifié la zone d'appel du champ de captage de Godomey, nous avons procédé à la délimitation des aires de protection. En dehors des périmètres de protection immédiats qui, en général sont déjà mis en place par la SONEB, nous avons, pour une première fois, proposé les limites du périmètre de protection rapprochée et du périmètre de protection éloignée sur la base des conditions hydrogéologiques du système aquifère exploité. Un dispositif a été également proposé, pour la surveillance de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau à l'intérieur des zones de protection, avec un système d'alerte en cas d'accident de pollution. L'objectif recherché est d'assurer une exploitation et une gestion durable des ressources en eau exploitées. Il reste à élaborer et à mettre en œuvre un plan d'actions à cet effet, par les structures compétentes du pays, la SONEB notamment.

Références bibliographiques

Affouda., 1990 : L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat, Univ. Paris IV (Sorbonne), Institut de Géographie, 428 p.

Albinet, M., 1970 : Carte de vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine de la France à 1/1000.000. Publ. DATAR-BRGM, Orléans, France. Specialty Conferences. Niagara Falls, Ontario, October 20-23: 707-712.

André G., 1995 : Ecolo-chimie. Edition Cachan. Paris, 351p.

Azokpota V., 2005 : Impact de l'utilisation des colorants sur la qualité du milieu aquatique à Cotonou : cas de la teinture artisanale des textiles. Mém. DESS-MEQUE. UAC .68 p.

Azontondé A.,1991 : Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin. Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February, 1991). IAHS. Publ. n° 199, 1991.

Banton O. et Lumony M., 1997 : Hydrogéologie. Multi science environnementale des eaux souterraines. AUPELF- Québec. 435 p.

BCMELP, 2000: Well Protection Toolkit. British Columbia, Ministry of Environment, Lands and Parks.

Bhatt, K., 1993: Uncertainty in wellhead protection area delineation due to uncertainty in aquifer parameter values. Journal of Hydrology, 149 : 1-8.

Bize J., 1981 : Le pouvoir épurateur du complexe alluvial en bordure de rivière. TSM. L'eau, les eaux souterraines. 76^{ème} année. N°7.

Boko M., (2005): Méthodes et techniques des sciences environnementales, UAC/CIFRED, Cotonou, 303 p.

Boukari M., 1998 : Fonctionnement du système aquifère exploité pour l’approvisionnement en eaux de la ville de Cotonou sur le littoral béninois : Impacts du développement urbain sur la qualité des ressources. Thèse de Doctorat d’Etat, UCAD, Dakar-Sénégal, 256 p.

Bradbury, K.R., M.A. Muldoon, A. Zaporozec et J. Levy., 1991: Delineation of Wellhead Protection Areas in Fractured Rocks. EPA 570/9-91-009.

Carter, A.D., R.C. Palmer et R.A. Monkhouse, 1987: Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice, particularly with respect to nitrate. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, TNO committee on hydrological research, The Hague, Proceedings and Information, 38: 333-342.

Champagne, L. et R. Chapuis., 1993 : Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des formations aquifères de la MRC de Montcalm selon la méthode DRASTIC. Sciences et techniques de l’eau, 26 (3) : 169-176.

Chapuis, R.P., 1999 : Guide des essais de pompage et leurs interprétations. Les Publications du Québec, 156 p.

Chevallier H., 2007 : L’eau, un enjeu pour demain. Edition sang de la terre. France. 351 p.

Chevalier, S., M.A. Buès, J. Tournebize et O. Banton, 2001: Stochastic delineation of wellhead protection area in fractured aquifers and parametric sensitivity study. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 15 (3): 205-227.

Dalton, M.G., B.E. Huntsman et K. Bradbury, 1991: Acquisition and Interpretation of Water-Level data. Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. D.M Nielsen, éditeur. Lewis Publishers, USA : 367-395.

DGEau-UAC-DANIDA, 2009 : Mise au point d'un modèle de gestion des eaux souterraines de la zone de captage de Godomey Sud-Bénin. Rapport final. DG Eau. Cotonou. 65 p.

DGEau-UAC-DANIDA, 2009 : Phase 2 : Amélioration et finalisation du modèle de première phase. Rapport final. DG Eau. Cotonou. 54 p. et 7 annexes.

DGH, 2004 : Modélisation des eaux souterraines : objectifs, description et résultats. Cas étudiés : Système aquifère du champ de captage de Godomey. Rapport final Phase I. DG Eau, Cotonou. 50 p.

De Marsily G., 1981 : Hydrogéologie quantitative- Masson Collection Sciences de la Terre.

Degbe C., 2004 : La qualité de l'eau de puits dans la commune d'Abomey-Calavi et les facteurs exogènes de la pollution. Mém. DEA, UAC/FLASH, 112 p.

Dossa B., 2002 : Analyse et esquisse cartographique de la contamination bactériologique de la nappe phréatique alimentant les puits traditionnels d la ville de Cotonou et sa banlieue. Mém. DESS - MEQUE. UAC. 81 p.

Dovonou F., 2005 : Pollution physico-chimique et bactériologique d'un écosystème aquatique et ses risques écotoxicologiques : Cas du lac Nokoué au Sud-Bénin. Mém. DEA. UAC.86p.

Dupuits, J., 1863 : Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables. 2e édition, Paris, Dunod, 30 p.

El Magnouni, S., 1996 : Méthodologie d'aide à la décision pour l'évaluation et la gestion multicritère des ressources en eau souterraine. Editions BRGM, document 254, 126 p.

EPA, 2000. Working with WhAEM 2000: US Environmental Protection Agency

Everett, A.G., 1991: Significant aspect of groundwater aquifers related to well head protection considerations. Water Resources Publications, 56 p.

Festger, A.D. et G.R. Walter.,2002 : The capture efficiency map: the capture zone under time-varying flow. Ground Water, 40 (6) : 619-628.

Foster S., R. Hirata, D. Gomes, M. D'Elia et M. Paris., 2002 : Groundwater Quality Protection: A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. The World Bank, Washington, D.C., USA, 103 p.

Frind, E.O. et J.W. Molson., 2002 : Well vulnerability mapping: a new approach to wellhead protection. Ground and Water: theory to practice. Proceedings of the 55th Canadian geotechnical and 3rd Joint IAH-CNC and CGS Groundwater

Frind, E.O., D.S. Muhammad et J.W. Molson. , 2002: Delineation of three-dimensional well capture zones for complex multi-aquifer systems. Ground Water, 40 (6) : 586-598.

Galy-Lacaux, 2008: Long term precipitation chemistry and wet deposition in a remote dry savanna site in Africa (Niger) . Published by Copernicus Publication on behalf of the European Geosciences Union. Atmospheric Chemistry and Physic.18 p.

Gerba C. P. et Haas C. S., 1988 : Assessments of risk associated with enteric viruses in contaminated drinking water. HSTMSTP. 976 489 494.

GIGG ou IGIP-GKW-GRAS, 1983 : Plan directeur alimentation en eau potable vile de Cotonou. Les ressources en eau. Ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Energie. Vol 2.

GIGG, 1983 : Plan directeur et étude d'ingénierie pour l'alimentation en eau potable et l'évacuation des eaux pluviales, des eaux usées et des déchets solides. Tome 1. 90 p.

Gilli E., Mangan C., Mudry J., 2008 : Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications. 2ème édition. Dunod.339 p.

Goosens, M. et M. Van Damme., 1987. : Vulnerability mappings in Flander, Belgium, Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, TNO committee on hydrogeological research, The Hague, Proceedings and information, 38 : 355-360.

Grubb, S., 1993.: Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers. Ground Water, 31 (1) :27-32.

Guilcher A., 1959 : La région cotière du Bas-Dahomey occidental. Bull. IFAN, t. XXI, N° 3 et 4, 357 - 424.

Healy, R.W. et P.G. Cook., 2002 : Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal, 10 (1) : 91-109.

Hoffman W., Lillich w., 1973: Probmematik der Bemessug der engeren Schuzzon fur lockergestein saquifère.

Houndénu C., 1999 : Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de Doctorat de Géographie. UMR 5080, CNRS, Université de Bourgogne, Centre de recherche de climatologie, Dijon, 341 p.

INSAE., 2003 : Troisième Recensement général de la population et de l'habitat 2002 (RGPH3).INSAE. Cotonou.

IWPP, 1995: Indiana Wellhead Protection Programme. Département of Environmental Management Indiana. Seal of the state of Indiana

Jacobson, E., R. Andricevic et J. Morrice., 2002 : Probabilistic capture zone delineation based on an analytic solution. Ground Water, 40 (1): 85-95.

Jacobson, E., R. Andricevic et T. Hultin. ,1994. : Wellhead protection area delineation under uncertainty. University of Nevada, Las Vegas publication no. 45118, 63 p.

Krause H., Lamrhary A., 1995 : Manuel relatif à la délimitation des zones de protection des captages d'eaux de surface. Office national de l'eau potable, Rabat, Rapport scientifique, 40 p.

Lallemand-Barrès A., Roux J.C., 1989 : Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. BRGM manuels et Méthode n° 19.

Lerner, D.N., A.S. Issar et I. Simmers., 1990 : Groundwater Recharge – A guide to understanding and estimating natural recharge. International Association of Hydrogeologists. International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise, 345 p.

Le Barbé L., Alé G., Millet B., Borel., Guald R., 1993 : Les ressources en eau superficielle de la République du Bénin, ORSTOM Edition, Paris.

Maliki R., 1993 : Etude hydrogéologique du littoral Béninois dans la région de Cotonou (AO). Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Version provisoire UCAD, Dakar Sénégal. 162 p. + annexes.

Mama D., 2010 : Méthodologie et résultats du diagnostic de l'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin). Thèse de doctorat de l'Université de Limoges. 157 p.

Martel R., Paradis D., Murat V., Michaud Y., Therrien R., Lefebvre R., Fagnan N., Boiverte., 1999 : Protection des aquifères : vulnérabilité et périmètres de protection autour des puits. 3ème conférence biennale, Americana 1999, 24-26 mars 1999, Montréal. 375-376.

MEFQ, 1995 : Guide pour la détermination de périmètres de protection autour de captage d'eau souterraine. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 54 p.

MEFQ, 1995 : Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : cahier 5, échantillonnage des sols, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Sainte-Foy, 72 p.

MEFQ, 1994 : Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales– Cahier 3: Échantillonnage des eaux souterraines. Ministère de l'Environnement et de la Faune et Les éditions le Griffon d'argile, Québec, 101 p.

MENV. 2002 : Guide de conception des installations de production d'eau potable. Réalisé par RÉSEAU environnement, pour le Ministère des Affaires municipales et de la Métropole et le Ministère de l'Environnement. Québec, 150 p.

Miall, A.D. 1984 : Principles of Sedimentary Basin Analysis. Springer-Verlag, New York, 490 p.

Moreau R., 1980 : Ecologie microbienne et hygiène du milieu souterrain. Actes du 1er colloque national sur la protection des eaux souterraines karstiques. Besançon.

Murat V., Michaud Y., Therrien R., 2000 : Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution : application aux aquifères

granulaires du piémont laurentien, Québec. 53^{ème} conférence canadienne de géotechnique, 15-18 Octobre 2000, Montréal. 411-418.

Neven Kresic., 2007 : Hydrogeology and groundwater modeling. Second edition. 450p.

NSAP, 2005 : Rapports de recommandations de l'amélioration du système d'alimentation en eau potable de la ville de Cotonou. SONEB.

Ostry, R.C., R.E.J. Leech, A.J. Cooper et E.H. Rannie., 1987: Assessing the susceptibility of ground water supplies to non-point-source agricultural contamination in southern Ontario. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, TNO committee on hydrological research, The Hague, Proceedings and Information No. 38 : 437-445.

Paillet, F.L. et W.H. Pedler. , 1996: Integrated borehole logging methods for wellhead protection applications. Engineering Geology, 42 : 155-165.

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 de maîtrise, Université du Québec, INRS-Géoressources, Québec, Canada, 240 p.

Pettyjohn W. A., 1987 : Protection of public water supply groundwater contamination. New Jersey USA.

Rasmussen H., Rouleau A., Chevalier. S, 2006 : Outils de détermination d'aires d'alimentation et de protection de captages d'eau souterraine. Seconde édition. Québec ; 203 p.

Rasmussen, H., A. Rouleau, M. Verreault, D.W. Roy et M.-L. Tremblay. 2003 : La détermination de l'aire d'alimentation de point de captage d'eau souterraine : une

étape essentielle à la protection de la ressource. Vecteur environnement, 36 (1) : 41-46.

Rasmussen, H., M. Verreault et A. Rouleau. 2001 : Détermination pratique d'aire d'alimentation et de zone de protection de captage en aquifère anisotrope et hétérogène, rapport d'étape no 1, Les données disponibles : leur évaluation et leur utilisation. Centre d'étude sur les ressources minérales, UQAC, 63 p.

Reading, H.G., 1986: Sedimentary environments and facies, second edition. Sedimentary Environments and Facies. H.G. Reading, éditeur. Blackwell Scientific Publications : 4-19.

Roy, B., 1985 : Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Economica, Paris, 423 p.

Rehse W., 1977 : Elimination und Abbau von organishe Fremdstoffen, Pathogenen Keimen und viten . Office de l'Environnement à Berne.250 p.

Rodier J., 1975 : L'analyse de l'eau : eaux naturelles ; eaux résiduaires, eau de mer. Dunod, Paris ; 7ème édition.1365 p.

Sanford, W., 2002: Recharge and groundwater models: an overview. Hydrogeology Journal, 10 (1) : 110-120.

Sara, M.N., 1991: Ground-Water Monitoring System Design. Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. D.M. Nielsen, éditeur. Lewis Publishers, USA : 17- 68.

Sauty J. P., 1987 : Utilisation des traceurs pour définir les périmètres de protection. Rapport BRGM 87 SGN 369 SE.

Scanlon, B.R., R.W. Healy et P.G. Cook, 2002 : Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal, 10 (1) : 18-39.

Seguin J., 1988 : Modélisation globale des transferts de nitrate dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Rapport BRGM 88 SGN 683.

Sigha-Nkamdjou et al., 2003 : Rainwater chemistry and wet deposition over the Equatorial Forested Ecosystem of Zoétélé (Cameroon) . Journal of Atmospheric Chemistry.1-26,2003.

Slansky M., 1968 : Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo. Thèse Univ. Niamey, série 59, n° 165 et 1962, Mém. BRGM n°11, 170 p.

SOGREAH/SCET-Tunisie, 1997: Etude de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin. Rapports R1 à R7. Cotonou, Bénin.

Tandia A. A., Gaye C. B. et Faye A., 1997 : Origine des teneurs élevées en nitrate dans la nappe phréatique des sables quaternaires (région de Dakar, Sénégal), Sécheresse, 8.138p.

TurkPak International - SCET-Tunisie., 1991 : Inventaire des ressources en eaux souterraines au Bénin. Rapport final. V.1284 p. + annexes.

USEPA, 1987: Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Area. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Ground-Water Protection.40p.

Vassolo, S., W. Kinzelbach et W. Schäfer. 1998: Determination of a well head protection zone by stochastic inverse modelling. Journal of Hydrology, 206 (3/4) : 268-280.

Vernon, J.H., Paillet, F.L., Pedler, W.H. et Griswold, W.J., 1993: Application of borehole geophysics in defining the wellhead protection area for a fractured crystalline bedrock aquifer. The Log Analyst, Jan-Fev., 41-57.

Verreault, M. 2003 : Étude méthodologique pour l'estimation de l'aire d'alimentation de captage d'eau souterraine en milieu complexe. Mémoire de maîtrise de l'Université du Québec à Chicoutimi, 131 p.

Verreault, M., A. Rouleau et H. Rasmussen., 2002 : Estimating the area of contribution to a pumping well: applications of seismic refraction and tracer testing. Ground and Water: Theory to practice. Proceedings 55th Can. Geotechnical & 3rd Joint IAH-CNC and CGS Conference, Niagara Falls, Ontario. D. Stolle, AR. Piggot et J.J. Crowder, éditeurs. 197-203.

Vrba, J. et A. Zoporozec., 1994 : Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International contributions to hydrogeology, 16, 119 p.

White R. E., Dayson J. S., Haigh R. A., Jury W. A. et Sposito G., 1986 : « A transfer Function Model of Solute Transport Through Soil » , 2 Illustrative Applications Water Resources Research, 22 (2) 248-254.

World Water Council., 2005 : Les objectifs du Millénaire pour le Développement.

Wuol, R.W., D.J. Dahlstrom et M.D. Fairbrother. 1995: Wellhead protection area delineation using the analytic element method of ground-water modeling. Groundwater, 33 (1) : 71-83.

Yoboué et al., 2005: Rainwater chemistry and wet deposition over the wet Savanna Ecosystem of Lamto (Côte d'Ivoire), 2005. Journal of atmospheric chemistry 52 :117-120

**More
Books!** 



yes
I want morebooks!

Oui, je veux morebooks!

Buy your books fast and straightforward online - at one of the world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at

www.get-morebooks.com

Achetez vos livres en ligne, vite et bien, sur l'une des librairies en ligne les plus performantes au monde!

En protégeant nos ressources et notre environnement grâce à l'impression à la demande.

La librairie en ligne pour acheter plus vite

www.morebooks.fr

VDM Verlagsservicegesellschaft mbH

Heinrich-Böcking-Str. 6-8

D - 66121 Saarbrücken

Telefax: +49 681 93 81 567-9

info@vdm-vsg.de

www.vdm-vsg.de

