



## **SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DU RABATTEMENT DE LA NAPPE DE BONOUA (SUD-EST, CÔTE D'IVOIRE) PAR MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE**

### **DRAWDOWN EVOLUTION SIMULATION OF BONOUA AQUIFER (SOUTH-EAST, CÔTE D'IVOIRE) BY HYDROGEOLOGICAL MODELING**

*KOUAME K. J.<sup>1</sup>, AKE G. E.<sup>1</sup>, KOBLAN A. K.<sup>1</sup>,  
DJE KOUAKOU B.<sup>2</sup>, JOURDA J. P.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE),  
UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët-  
Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

<sup>2</sup> Département de la Climatologie et des Applications Météorologiques, Direction de la  
Météorologie Nationale, 15 BP 990 Abidjan 15, Côte d'Ivoire

*jeankkan@yahoo.fr*

### **RESUME**

L'approvisionnement en eau potable de la population Abidjanaise est tributaire des eaux souterraines. Cependant, la croissance rapide de cette population et la forte demande en eau ont occasionné un déficit en matière d'approvisionnement en eau potable. Face à ce déficit, l'Etat s'est orienté vers l'exploitation de la nappe de Bonoua, par l'implantation de deux nouveaux champs captants, Tchintchébé et Ono. Cette étude a donc été entreprise dans l'optique de réaliser un modèle hydrogéologique capable de simuler le niveau de cette nappe à l'horizon 2020 et de cartographier le cône de rabattement induit par l'exploitation des nouveaux forages. Le modèle, réalisé sous l'interface Visual Modflow, a été conçu en régime permanent et calibré manuellement à partir de la piézométrie de l'année 2000. La valeur de la racine carrée de la moyenne des écarts normalisée, de 4,86% (<10%) permet de dire que le calage obtenu est jugé satisfaisant. Les débits d'exploitation de la nappe de Bonoua sont passés de 11 362 m<sup>3</sup>/j en 2000 à 105 731 m<sup>3</sup>/j en 2020, soit une forte augmentation de

830% sur les 20 ans. Cette augmentation a occasionné des rabattements qui varient entre 1,5 et 112,5 cm avec une moyenne de 31,54 cm.

**Mots-Clefs :** Forages, rabattement, modélisation hydrogéologique, Visual Modflow, nappe de Bonoua

## **ABSTRACT**

Groundwater is the main source of drinking water supply to Abidjan population. However, the rapid growth of this population and the highest demand in water caused a deficit in the drinking water supply. Faced with this deficit, the State turned to the Bonoua aquifer exploitation, by the establishment of two new catchments, Tchintchébé and Ono. Therefore, this study was undertaken to carry out a hydrogeological model able to simulate Bonoua aquifer level on the horizon 2020 and to cartography drawdown cone induced by the exploitation of the new boreholes. The model has been carried out under the Visual Modflow interface in steady-state mode and it has been calibrated manually from the piezometry of 2000. The Normalized Root Mean Squared residual obtained is 4.86% (<10%) and makes it possible to say that the calibration obtained is judged to be satisfactory. Pumping rate of Bonoua aquifer increased from 11 362 m<sup>3</sup>/d in 2000 to 105 731 m<sup>3</sup>/d in 2020 after 20 years. This increasing resulted in drawdowns ranging from 1.5 to 112.5 cm with a mean of 31.54 cm.

**Keywords:** Boreholes, drawdown, Hydrogeological modeling, Visual Modflow, Bonoua aquifer

## **INTRODUCTION**

L’approvisionnement en eau potable des populations Abidjanaises est assuré par la nappe du Continental Terminal. Au cours de ces dernières décennies, cette ressource est confrontée à des menaces dues à l’expansion accélérée du District d’Abidjan et à la croissance de la population qui contribuent à la dégradation quantitative et qualitative des eaux souterraines (Kouadio et al., 1998 ; Oga, 1998 ; Jourda et al., 2006). Cet état de fait a entraîné la mise hors service de certains forages dont la teneur en nitrate était supérieure à 50 mg/L (Jourda et al., 2006) engendrant ainsi un déficit en matière d’approvisionnement en eau potable. Dans l’optique de renforcer l’approvisionnement en eau à Abidjan, l’Etat de Côte d’Ivoire s’est orienté vers l’exploitation de la nappe de Bonoua (Djaa et al., 2014). Cette nappe va contribuer à résorber le déficit en eau potable

du District d'Abidjan (Aké, 2010). Cette nappe est exploitée pour renforcer l'approvisionnement en eau potable à Abidjan (Communes de Treichville, de Marcory, de Koumassi, et de Port-Bouët). Elle sera aussi sollicitée pour l'approvisionnement en eau des aménagements futurs de la zone industrielle de Bonoua. Ainsi, pour contribuer à une gestion durable de cette ressource en eau et surtout à une durabilité des nouveaux champs captants de Tchintchébé et d'Ono, que cette étude a été initiée. Elle a bénéficié d'un financement du Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique (PASRES). L'objectif général visé par cette étude est de concevoir un modèle hydrogéologique capable de prévoir l'influence des nouveaux champs captants sur le niveau de la nappe de Bonoua en vue d'une gestion efficace des nouveaux ouvrages de captage.

## **PRESENTATION GENERALE DE LA REGION DE BONOUA**

La région de Bonoua, située au Sud-Est de la Côte d'Ivoire dans le degré carré de Grand-Bassam, est composée de trois départements: Grand-Bassam, Adiaké et Aboisso. La zone d'étude est comprise entre les latitudes 5°08'N et 5°33'N et les longitudes 3°13'O et 3°51'O (Figure 1). Elle couvre une superficie d'environ 2 209 km<sup>2</sup>. Sur le plan climatique, quatre saisons qui caractérisent le Sud forestier de la Côte d'Ivoire, se manifestent. Il s'agit essentiellement de deux saisons des pluies avec un pic dans le mois de juin et deux saisons sèches.

Au niveau géologique et hydrogéologique, deux domaines géologiques sont à différencier dans la région de Bonoua: au Sud le bassin sédimentaire et au Nord le socle cristallin (Aké 2001). La zone concernée par l'étude est située uniquement dans le bassin sédimentaire (Figure 2). Trois principaux aquifères se distinguent dans la région de Bonoua : les aquifères du socle, du Mio-pliocène (Continental Terminal) et du Quaternaire. L'aquifère du Continental Terminal représente l'aquifère principal du bassin sédimentaire ivoirien et est largement présent dans la zone de Bonoua. C'est l'aquifère qui est capté pour assurer l'alimentation en eau potable des populations du District d'Abidjan, dans sa partie sud et celles de Bonoua et de Grand-Bassam (Aké 2001).

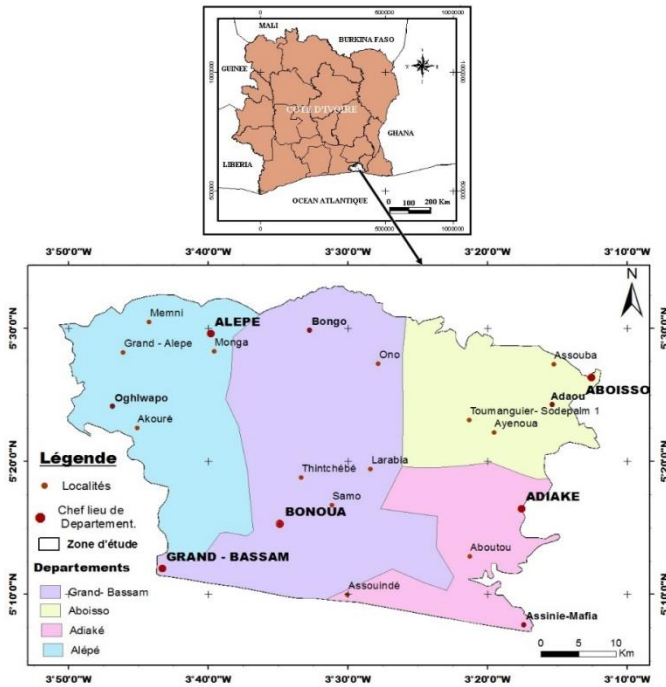


Figure 1 : Localisation de la région de Bonoua

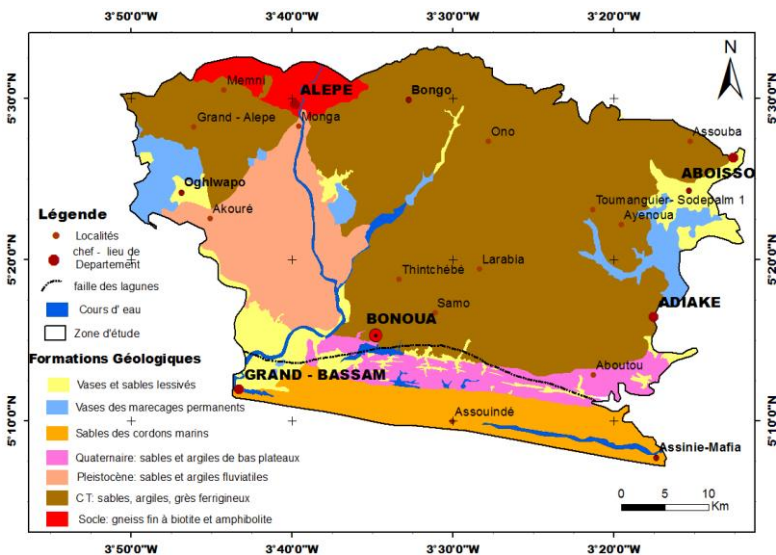


Figure 2 : Carte géologique de la région de Bonoua extraite de la carte géologique du degré carré de Grand-Bassam (Delor et al., 1992)

## **MATERIEL ET METHODE**

Les sections suivantes décrivent le matériel et la méthodologie adoptée dans le cadre de cette étude.

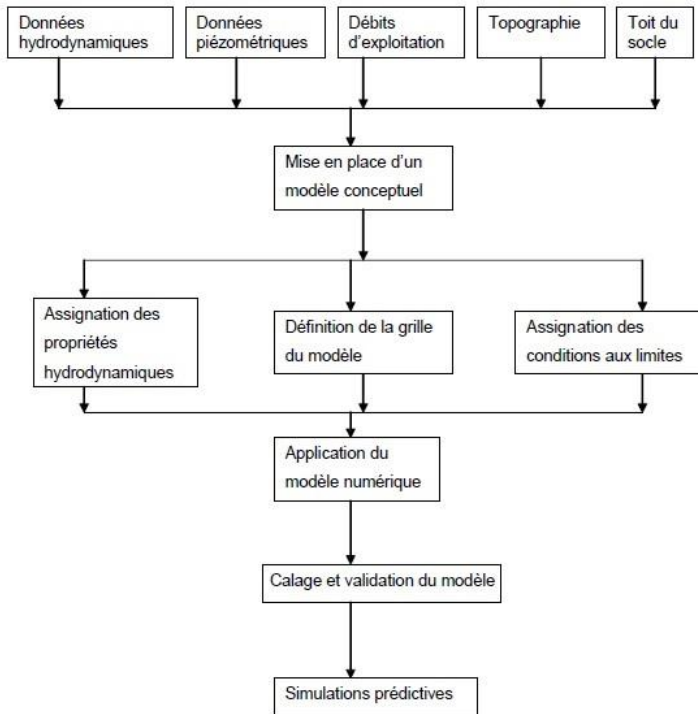
### **Matériel et données**

La mise en place du modèle hydrogéologique de la nappe de Bonoua a nécessité la collecte de données. Les données utilisées sont issues des travaux géologiques et hydrogéologiques de la nappe de Bonoua de plusieurs auteurs (Tastet, 1979 ; Delor et al., 1992 ; HYDROEXPERT, 2000 ; Aké, 2001). A partir de la synthèse de ces travaux, les paramètres hydrodynamiques tels que la conductivité hydraulique (perméabilité), le coefficient d'emmagasinement et la porosité des couches de sables grossiers ont été obtenus. Les données des campagnes piézométriques de 2000 ont été utilisées pour la mise en place du modèle hydrogéologique de la nappe de Bonoua. Aussi, les débits d'exploitation des anciens forages ont été recueillis des travaux précédents et ceux des nouveaux forages auprès de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) et de la Société de Distribution d'Eau en Côte d'Ivoire (SODECI). Elles portent sur les 16 forages de la nappe de Bonoua répartis en deux champs captants : 11 forages à Tchintchébé et 5 forages à Ono. Enfin, les coupes techniques d'anciens forages ont été collectées dans les travaux de (Aké, 2001) et des nouveaux, fournies par la SODECI en vue de la détermination de la couche géologique captée par ces ouvrages. La modélisation de l'écoulement souterrain de la nappe de Bonoua et la détermination de l'influence des nouveaux champs sur le niveau de la nappe de Bonoua se sont effectuées à partir du code Visual ModFlow développé en Fortran par l'USGS (Mac Donald and Harbaugh 1988, Waterloo Hydrogeologic 1999).

### **Approche méthodologique**

Le modèle est une schématisation numérique du système hydrogéologique. Il permet de passer d'un système naturel complexe, le terrain, à un ensemble numérique, le modèle. Il s'agit par conséquent de deux réalités très différentes (Leduc 2005). La réalisation d'un modèle numérique nécessite plusieurs étapes telles que la détermination des objectifs à atteindre, le choix du logiciel utilisé, la conception des modèles conceptuel et numérique, le calage et la validation du modèle numérique, la réalisation de simulations prédictives et enfin l'analyse critique des résultats obtenus. Cependant, l'exécution de toutes ces étapes est

conditionnée par l'obtention de données. Les sections qui suivent décrivent la méthodologie utilisée dans cette étude pour atteindre nos objectifs (Figure 3).



**Figure 3 : Organigramme pour la conception du modèle hydrogéologique de la nappe de Bonoua**

### **Objectifs de cette modélisation**

L'exploitation de la nappe de Bonoua par de nouveaux forages nécessite une gestion efficace de ses eaux souterraines. Or pour gérer les ressources en eau souterraine, il faut comprendre le fonctionnement de l'aquifère dans les conditions naturelles et prévoir l'influence de l'intervention humaine (exploitation) sur la quantité de l'eau souterraine. Ainsi, la modélisation de la nappe de Bonoua permettra de simuler le niveau de la nappe de Bonoua à différents horizons (2000, 2007, 2015 et 2020) et de déterminer les valeurs de rabattements induits par les nouveaux ouvrages des champs captants d'Ono et de Tchintchébé (deux villages de Bonoua) en prenant l'année 2000 comme le niveau de référence de cette nappe.

### **Modèle hydrogéologique**

La nappe de Bonoua est un aquifère non confiné et a un comportement hydrogéologique similaire à celle d'Abidjan (Aké 2001). Le mur de l'aquifère de Bonoua est constitué par le socle granitique dont les côtes sont comprises entre +20 et -220 m (HYDROEXPERT 2000). Le toit de la nappe de Bonoua est constitué par la surface libre de l'aquifère dont la côte est comprise entre 0 et 100 m (HYDROEXPERT 2000). L'épaisseur moyenne est de 115 m (Aké 2001). Elle varie de 25 m au N-O à 230 m au S-E. L'importante épaisseur au Sud est due à l'affaissement du socle qui pourrait être lié à la faille des lagunes (Aké 2001). Au Nord de la zone d'étude, la faible épaisseur est due probablement à la remontée du socle avec des affleurements granitique en particulier.

### **Description des unités hydrostratigraphiques du modèle**

Le modèle hydrogéologique conceptuel de la nappe de Bonoua a été défini à partir des coupes de forages collectées à la SODECI et est constitué principalement de deux unités hydrogéologiques :

- l'aquifère constitué de sables grossiers qui recouvre l'ensemble de la zone à modéliser. C'est l'unité exploitée pour l'approvisionnement en eau potable des populations ;
- l'aquitard formé par le socle et qui constitue la base imperméable de l'aquifère.

La zone à modéliser dans le cadre de cette étude s'étend sur 50 km de long et 40 km de large en moyenne. Ses limites sont constituées (Figure 5) :

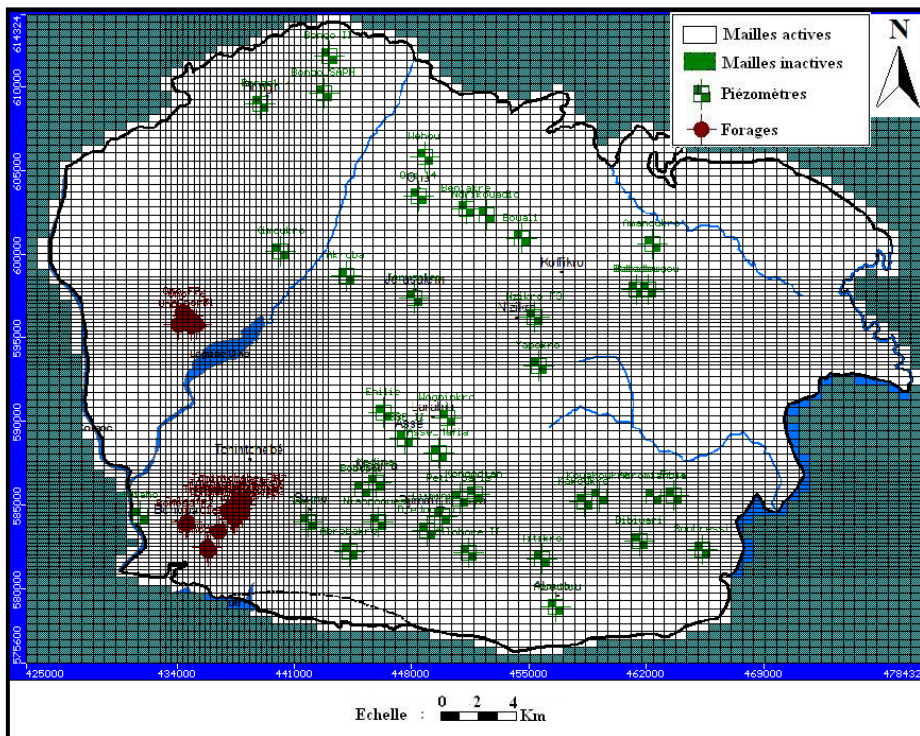
- au Nord, par les affleurements du socle granitique ;
- au Sud, par les sables Tertiaires ;
- à l'Ouest, par le fleuve Comoé ;
- à l'Est, par la lagune Aby.

Ces limites sont identiques à celles adoptées par (HYDROEXPERT 2000). Le modèle hydrogéologique de cette étude est monocouche représentée par les sables grossiers captés par tous les nouveaux forages d'Ono et de Tchintchébé pour l'approvisionnement en eau potable des populations. Les paramètres hydrodynamiques de la nappe assignés au modèle sont issus de la synthèse des différents travaux réalisés par différents auteurs (HYDROEXPERT 2000, Aké 2001, Aké 2010) dans la région et sont consignés dans le tableau 1.

Pour la discrétisation spatiale du domaine modélisé, des mailles carrées (irrégulières) de 500 m de côté ont été utilisées. La forme et la dimension des mailles ont été choisies en fonction de l'étendue de la nappe. Le maillage a été affiné autour des nouveaux forages en exploitation dans la région de Bonoua. Il est passé à 250 m de côté (Figure 4). Afin de mieux représenter les limites du domaine modélisé, les mailles qui n'appartiennent pas à l'aquifère, ont été rendues inactives. Ainsi, la grille englobant le domaine modélisé comprend 84 lignes et 80 colonnes, soit 6 720 cellules ou mailles.

**Tableau 1 : Paramètres hydrodynamiques de la nappe de Bonoua (Aké, 2010)**

Paramètres hydrodynamiques	Valeurs initiales
Conductivité hydraulique des sables grossiers	$10^{-6}$ à $2.10^{-3}$ m/s
Porosité efficace	13%
Coefficient d'emmagasinement	9%



**Figure 4 : Maillage du modèle hydrogéologique de la nappe de Bonoua**



### Conditions aux limites du modèle

La résolution de l'équation générale de l'écoulement par le code Modflow impose l'assignation des conditions aux limites au modèle. Ainsi, en considérant les travaux de (Aké 2001), les conditions aux limites suivantes ont été assignées au modèle (Figure 5):

- à la limite nord, l'affleurement du socle est considéré comme une limite à charge constante ( $h = 65$  m);
- dans la partie sud, la grande faille des lagunes est matérialisée en surface par le front des sables tertiaires. C'est une limite à charge constante ( $h = 3$  m) ;
- A l'Ouest, le fleuve Comoé draine la nappe : une condition à flux imposé a été assignée ;
- A l'Est, la lagune Aby draine la nappe : une condition à flux imposé a été aussi assignée.

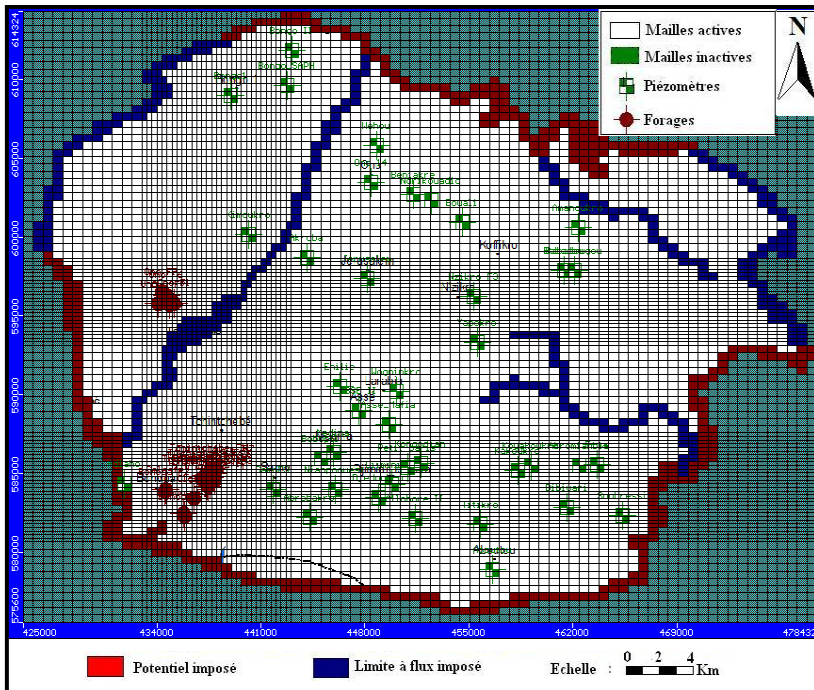


Figure 5 : Conditions aux limites du modèle hydrogéologique de la nappe de Bonoua

Les conditions aux limites de type recharge sont assignées uniformément sur l'ensemble du domaine modélisé. La quantité d'eau qui contribue à recharger la nappe correspond à une valeur de 111 mm/an. Cette valeur de recharge a été calculée par la méthode de Thornthwaite à partir des données de précipitation et de température de la période 2000-2015 de la station météorologique d'Adiaké.

### ***Calage du modèle en régime permanent***

Le calage du modèle vise à reproduire au mieux le fonctionnement hydrodynamique de l'ensemble de la nappe de Bonoua, en ajustant les différents paramètres que l'on estime pouvoir varier tout en restant dans la gamme des valeurs réalistes (Leduc 2005). Les paramètres à ajuster sont de deux types :

- les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, porosité, coefficient d'emmagasinement) ;
- les conditions aux limites (charges initiales, conductance).

Les ajustements des différents paramètres doivent être toujours proches des mesures de terrain. Dans cette étude, le calage s'est effectué de manière "manuelle" ou par "tâtonnement" du fait de l'insuffisance des données piézométriques disponibles. Ce type de calage se déroule comme suit :

- ajustement des paramètres hydrodynamiques ;
- simulation du modèle ;
- comparaison des valeurs de charge calculée aux charges mesurées (si les écarts sont grands alors on reprend ces opérations).

Ces opérations sont exécutées jusqu'à ce qu'on obtienne de faibles valeurs d'écart de calage traduisant ainsi un bon calage entre les charges "observées" sur le terrain et celles "calculées" par le modèle (Anderson and Woessner, 1992, Gurwin and Lubezynski, 2004). D'autres paramètres fournis par le logiciel permettent aussi d'apprécier la qualité de la calibration du modèle. La racine carrée de la moyenne des écarts normalisée ou NRMS, exprimée en pourcentage, est le paramètre le plus représentatif de l'ajustement du modèle et sa valeur doit être inférieure à 10% pour qu'un calage soit déclaré adéquat (Leblanc, 1999). En plus de ce paramètre fourni par le logiciel, une comparaison entre les valeurs piézométriques de 2000 simulées par le modèle et celles observées en 2000 sur le terrain a été effectuée. Lorsque le modèle en régime permanent est considéré comme suffisamment bien calé, il est utilisé comme outil de simulation. Il permettra de simuler le niveau piézométrique de la nappe de Bonoua et surtout de déterminer les périmètres de protection des nouveaux ouvrages de captage des champs captants de Tchintchébé et Ono.

### ***Simulation de la piézométrie de l'année 2000***

La reconstitution de la piézométrie de l'année 2000 de la nappe de Bonoua s'est effectuée à partir de 39 données piézométriques de 2000 recueillies dans les travaux de Aké (2001). Elle a été réalisée en régime permanent en condition d'exploitation. En condition d'exploitation à l'an 2000, seuls trois forages de la SODECI étaient en exploitation et ont été pris en compte, en assignant au modèle les différents débits d'exploitation de 2000 (Tableau 2).

**Tableau 2 : Débits de pompage des forages de 2000**

<b>Station de pompage</b>	<b>Débit (m<sup>3</sup>/j)</b>
Bonoua F2	3322
Bonoua F3	4042
Bonoua F4	3888

En effet, l'année 2000 a été considérée comme année où il n'y avait que quelques forages en exploitation. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle les prélèvements débutés en 2000 sont en équilibre avec la recharge de la nappe de Bonoua, a été émise. Cette hypothèse permettra de reconstituer la piézométrie initiale de la nappe de Bonoua. Les données piézométriques de 2000 sont donc considérées comme n'étant pas influencées par les prélèvements effectués.

### ***Prédiction de l'évolution de la piézométrie***

Les simulations de la piézométrie permettent de déterminer l'influence des nouveaux ouvrages de captage sur le niveau de la nappe de Bonoua. Ainsi, à partir de la piézométrie de l'année 2000 (piézométrie de référence), des simulations de l'évolution de la piézométrie de 2000 à 2020 de la nappe de Bonoua ont été effectuées. Les débits de pompage utilisés dans le modèle pour la période modélisée ont été divisés en 3 périodes de débit constant. Ces débits sont consignés dans le tableau 3 et concernent les forages de la SODECI, les nouveaux forages de Tchintchébé et d'Ono et les forages industriels. La différence entre la piézométrie de référence et les piézométries prédictives aux droits des différents piézomètres du modèle permet de déterminer le cône de rabattement occasionné par l'exploitation de la nappe de Bonoua par les nouveaux champs captants de Tchintchébé et d'Ono.

**Tableau 3 : Débits de pompage des forages de 2000 à 2020.**

<b>Année</b>	<b>Forages</b>	<b>Débit (m<sup>3</sup>/j)</b>
2000 – 2007	Bonoua F2	3432
	Bonoua F3	4042
	Bonoua F4	3888
2007 – 2015	Olgane	45
	Céleste	100
2015 – 2020	Tchintchébé F1	6240
	Tchintchébé F2	5280
	Tchintchébé F3	4800
	Tchintchébé F4	6240
	Tchintchébé F5	5280
	Tchintchébé F6	6000
	Tchintchébé F7	5280
	Tchintchébé F8	4800
	Tchintchébé F9	3600
	Tchintchébé F10	6000
	Tchintchébé F11	6240
	Ono F1	7320
	Ono F2	6984
	Ono F4	6888
Ono F6	6600	
Ono F7	6672	

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

### **Résultats du calage du modèle numérique**

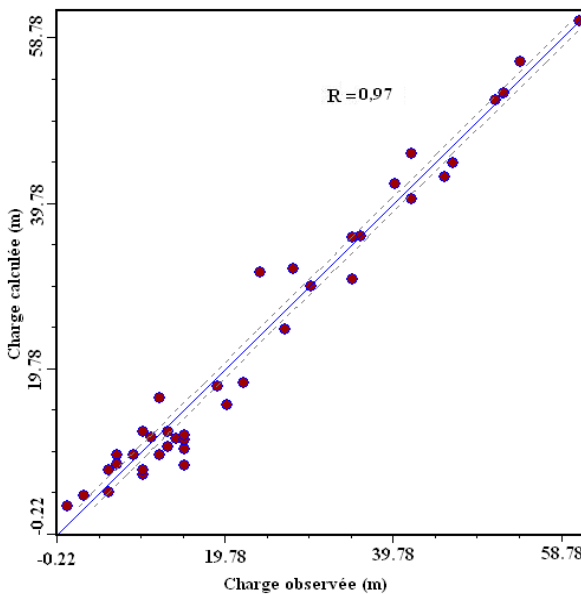
Les valeurs des paramètres hydrodynamiques de la nappe de Bonoua, sont consignées dans le tableau 4. Durant le processus du calage, la valeur de la conductivité hydraulique initiale a été ajustée tandis que les valeurs de la porosité et du coefficient d’emménagement sont restées identiques aux données tirées des études antérieures. C’est avec de telles valeurs que les paramètres de calage fournis par le logiciel ont été jugés satisfaisants.

**Tableau 4 : Paramètres hydrodynamiques de calage de la nappe de Bonoua**

<b>Paramètres hydrodynamiques</b>	<b>Valeurs initiales</b>	<b>Valeurs calées</b>
Conductivité hydraulique du sable grossier	$10^{-6}$ à $2.10^{-3}$ m/s	$10^{-3}$ à $10^{-4}$ m/s
Porosité efficace	13%	13%
Coefficient d’emménagement	9%	9%

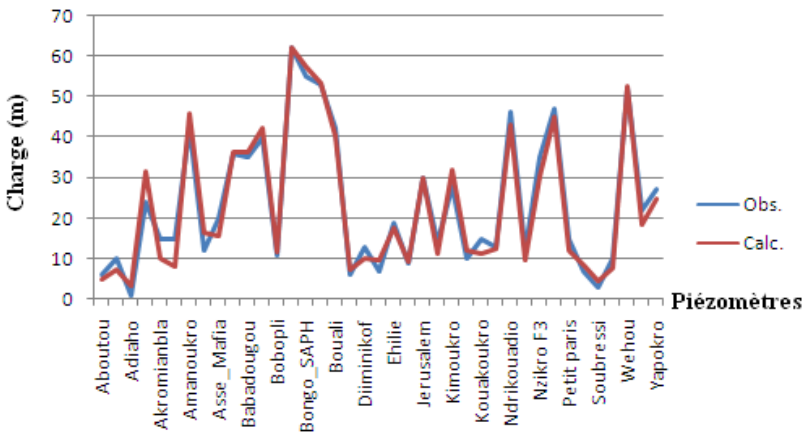
### **Graphique des charges observées versus les charges calculées**

Le calage effectué manuellement a permis d'obtenir une bonne correspondance entre les charges observées et calculées (simulées). Le graphique de la figure 6 illustre cette bonne correspondance. En effet, les points sont tous proches de la droite de la première bissectrice, excepté quelques-uns qui sont peu éloignés. Le calcul du coefficient de corrélation (R) a donné **0,97**. Cette valeur montre que les charges observée et calculée par le modèle sont très bien corrélées. Le modèle mis en place permet donc de simuler des charges proches de celles observées en réalité.



**Figure 6 : Diagramme des charges observées versus celles calculées en 2000 en régime permanent de la nappe de Bonoua**

La figure 7 indique une comparaison des charges observées et calculées du modèle en régime permanent pour certains piézomètres. Elle illustre également le degré de concordance entre les charges observées et calculées, bien que des différences soient observées en certains points tels qu'Aboutou, Adiaho, Akromianbla, Kouakoukro et Yapokro. Le modèle de la nappe de Bonoua étant considéré comme bien calé en régime permanent, des simulations du niveau de l'eau de la nappe ont été et a servi de base pour la détermination des rabattements de la nappe de Bonoua.



**Figure 7 : Comparaison des charges observée et calculée du modèle en régime permanent en 2000 de la nappe de Bonoua**

### Statistiques liées aux écarts

Les valeurs d’erreurs associées au graphe de la figure 7 sont consignées dans le tableau 5. Le calcul de la RMS normalisée dépend des autres paramètres, car il représente le paramètre indicatif de la précision d’un calage et sa valeur doit être inférieure à 10%. Le calage en régime permanent indique une valeur de la RMS normalisée égale à **4,86%** (< 10%) indiquant ainsi que le modèle est bien calé.

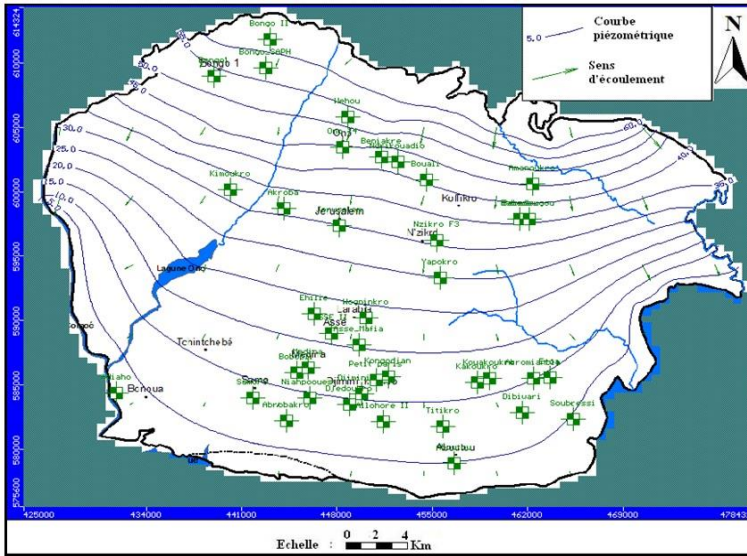
**Tableau 5 : Performance du calage du modèle en régime permanent en 2000**

Erreurs	Symbole	Valeurs
Moyenne des écarts (m)	R	-0,42
Moyenne de la valeur absolue des écarts (m)	R	2,41
Ecart type des erreurs (m)	SEE	0,48
Racine carrée de la moyenne des écarts (m)	RMS	2,97
Racine carrée de la moyenne des écarts normalisée (%)	NRMS	<b>4,86</b>

### Piézométrie de l’an 2000 de la nappe de Bonoua

La piézométrie de l’an 2000 de la nappe de Bonoua a été reconstituée, à partir des données du modèle en régime permanent en vue de connaître le niveau piézométrique de cette nappe (Figure 8). La carte piézométrique de la nappe de Bonoua indique une direction générale d’écoulement des eaux souterraines du Nord vers le Sud. Les niveaux piézométriques oscillent entre 65 m au Nord et 5 m au Sud. Des lignes de courant sont orientées vers le fleuve Comoé et la

lagune Aby, du fait que les flux imposés en ces frontières du modèle sont faibles (entre 0 et 0,2 m).



**Figure 8 : Piézométrie de la nappe de Bonoua en régime permanent (année 2000)**

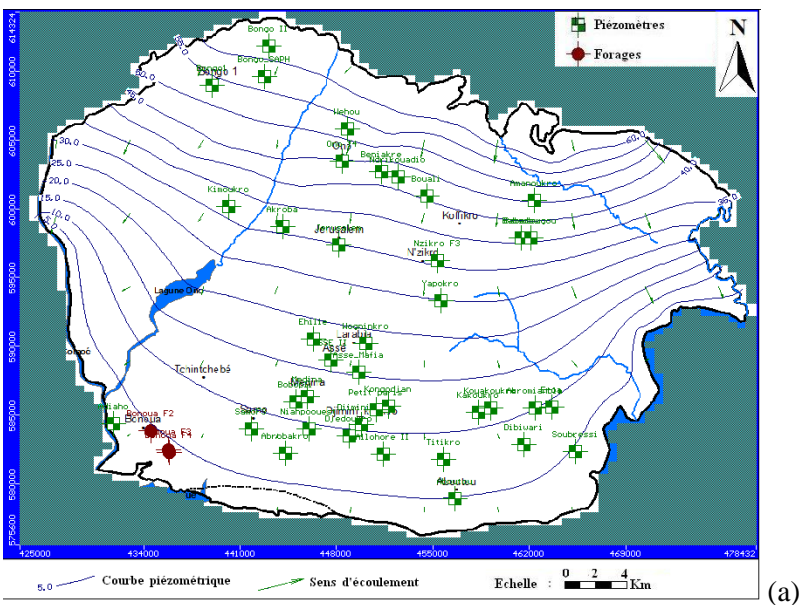
### **Prédiction de la piézométrie et du rabattement de la nappe de Bonoua de 2000 à 2020**

Les simulations prédictives de la piézométrie de la nappe de Bonoua ont été effectuées en régime permanent à partir de 2000 avec des débits d'exploitation actualisés des forages de 2000 à 2020. Les cartes piézométriques de la nappe de Bonoua pour différentes périodes (2007, 2015 et 2020) ont été produites et sont illustrées à la figure 9. Il ressort de ces cartes que les pompages effectués à partir des ouvrages de captage ont influencé le niveau de la nappe de Bonoua. Ces influences se manifestent par la modification des isopièzes 5, 10 et 15 m par rapport à la piézométrie de 2000 à 2015 (Figures 9b et 9c). Cette modification est principalement liée à l'exploitation de la nappe par les nouveaux forages des champs captants d'Ono et de Tchintchébé à partir de 2016. Hormis les secteurs où sont implantés les nouveaux champs captants, aucun autre secteur du modèle n'a connu de modification durant toute la simulation de 2000 à 2020. En effet, il n'y a pas de forages de la SODECI dans les secteurs non concernés par la modification. Aussi, la modification de ces isopièzes se signale aux droits des piézomètres du modèle par des rabattements

du niveau de l'eau (Tableau 6). L'analyse du tableau révèle que le niveau de l'eau dans la majorité des piézomètres a connu une baisse. Les baisses enregistrées lors des simulations oscillent entre:

- 0,047 et 3,97 cm pour la période 2000-2007, avec une moyenne de 0,988 cm;
- 0,048 à 4,04 cm de 2007 à 2015 avec une moyenne de 1,003 cm;
- 1,509 et 112,5 cm pour la période 2015 à 2020 avec une moyenne de 31,544 cm.

Les fortes valeurs de rabattements ont été enregistrées au droit des piézomètres de Kimoukro (112,5 cm) ; Samo (85,44 cm) ; Akroaba (80,09 cm) tandis que la plus faible a été observée au droit du piézomètre de Soubressi (1,508 cm) sur toute la période de la simulation.







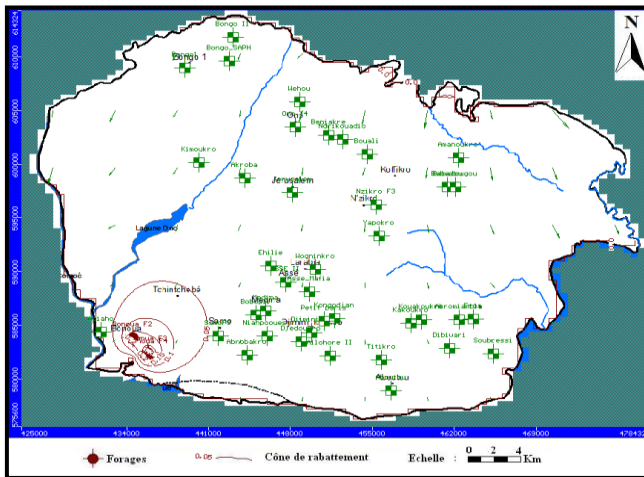
**Tableau 6 : Rabattement calculé au droit des piézomètres par rapport à 2000**

Piézomètres	Rabattement (cm)		
	2000-2007	2000-2015	2000-2020
Aboutou	0,134	0,136	3,9497
Abrobakro	2,022	2,055	43,402
Adiaho	1,647	1,683	11,752
Akroaba	1,554	1,583	80,090
Akromianbla	0,216	0,220	6,9010
Allohore II	0,651	0,662	17,844
Amanoukro	0,197	0,201	6,3120
Asse II	1,921	1,954	58,829
Asse_Mafia	1,491	1,517	44,999
Babadou	0,302	0,308	9,8170
Babadougou	0,275	0,280	8,8560
Beniakre	0,719	0,732	29,132
Bobopli	2,379	2,420	61,839
Bongo II	0,134	0,136	7,9590
Bongo_SAPH	0,336	0,342	20,171
BongoI	0,419	0,427	28,916
Bouali	0,584	0,594	20,894
Dibiwari	0,174	0,177	5,4667
Diiminikof	1,063	1,081	29,245
Djedoukro	1,182	1,202	31,081
Ehilie	2,186	2,225	70,649
Eroa	0,170	0,173	5,4770
Jerusalem	1,352	1,377	55,696
Kakoukro	0,397	0,404	12,284
Kimoukro	1,557	1,586	112,50
Kongodjan	0,924	0,940	27,014
Kouakoukro	0,335	0,341	10,475
Medina	2,194	2,232	58,921
Ndrikouadio	0,623	0,634	24,050
Nianpoouest	1,877	1,909	46,380
Nzikro F3	0,711	0,723	25,413
Ono 14	0,757	0,771	34,365
Petit paris	1,082	1,101	30,889
Samof3	3,975	4,040	85,441
Soubressi	0,047	0,048	1,508
Titikro	0,322	0,328	9,519
Wehou	0,483	0,491	20,923
Wogninkro	1,410	1,435	45,201
Yapokro	0,761	0,774	26,068
Minimum (cm)	<b>0,047</b>	<b>0,048</b>	<b>1,509</b>
Moyenne (cm)	<b>0,988</b>	<b>1,003</b>	<b>31,544</b>
Maximum (cm)	<b>3,975</b>	<b>4,04</b>	<b>112,50</b>

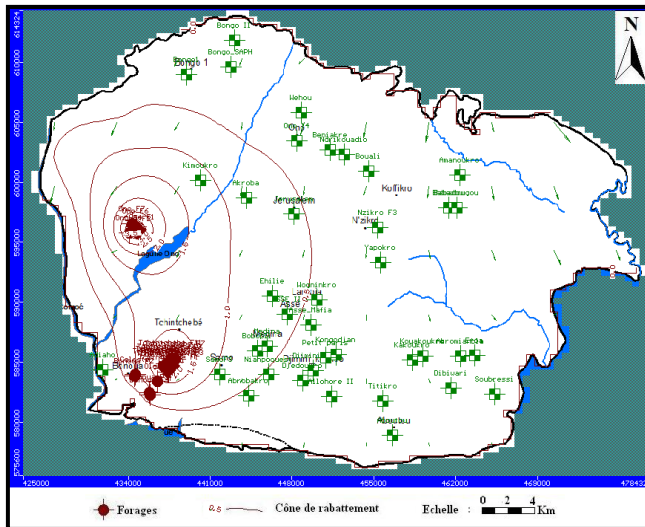
## **Cône de rabattement de la nappe de Bonoua aux droits des forages**

Le cône de rabattement observé durant toute la simulation a été cartographié (Figure 10). Il ressort de cette cartographie que :

- de 2000 à 2007, le cône de rabattement observé autour des forages F2, F3, F4 en exploitation est compris entre 0,05 et 0,35 m (Figure 10a). Cette même observation est faite pour la période allant de 2007 à 2015 ;
- de 2015 à 2020, avec la présence des nouveaux champs captants à Bonoua, une nouvelle cartographie du cône de rabattement a été observée. Le cône de rabattement observé autour des champs captants communique et est compris entre 0,5 et 3,5 m (Figure 10b). Le cône de rabattement s'est étendu vers la partie nord du modèle. Autour du champ captant d'Ono (localisé au nord-ouest), le cône de rabattement observé est compris entre 0,5 et 3,5 m (Figure 10b). Avec la progression du cône de rabattement vers la lagune Ono, il y a un risque d'appel des eaux de cette lagune. Autour du champ captant de Tchintchébé (localisé au sud-ouest) le cône de rabattement est compris entre 0,5 et 2,5 m (Figure 10b).



**Figure 10a : Rabattement observé après 7 ans d'exploitation de la nappe de Bonoua**



**Figure 10b : Rabattement observé après 20 ans d’exploitation de la nappe de Bonoua**

Les débits d’exploitation des nouveaux champs captants de la SODECI auront un impact sur le niveau de l’eau de la nappe de Bonoua. Pour faire face à la forte demande de la population abidjanaise, les zones à exploiter pour l’implantation d’autres forages ou champs captants devraient être localisées au Sud-est ou à l’Est des champs captants de Tchinchébé et d’Ono. Dans ces secteurs, le cône de rabattement est resté très faible durant toute la simulation.

## Discussion

Le modèle hydrogéologique avait pour objectif de déterminer le rabattement induit par l’implantation des nouveaux champs captants de Bonoua. Pour atteindre cet objectif un modèle hydrogéologique de la nappe de Bonoua a été réalisé à partir des données d’archives (géologique, hydrogéologique, piézométriques, etc.) et des données de débit de forages. La nappe de Bonoua est libre et a un comportement hydrogéologique semblable à celle d’Abidjan. Comme à Abidjan, le principal aquifère capté à Bonoua est celui des sables Tertiaires (Aké, 2001). Le modèle mathématique réalisé sur la nappe de Bonoua est similaire à celui réalisé sur la nappe d’Abidjan. Le calage en régime permanent du modèle de la nappe de Bonoua a donné un RMS normalisé égal à 4,86% (< 10%), indiquant ainsi le bon calage du modèle numérique (Leblanc, 1999). L’ajustement principal lors du calage manuel adopté a consisté en une augmentation de la valeur de la recharge en se référant aux conditions

climatiques de la zone d'étude. La valeur calculée à partir des données climatiques de la station d'Adiaké sur la période 2000-2015 est de 111 mm/an mais le meilleur calage a été obtenu avec la valeur de 140 mm/an comme recharge. Le calage manuel a été aussi employé par Kouamé et al. (2009) au niveau de la nappe d'Abidjan et a obtenu un RMS normalisé égal à 4,63% et les simulations réalisées à partir ont donné de bons résultats. La recharge calculée par Aké (2001) sur la période 1980-1999 était de 186 mm/an. Cette valeur de 140 mm/an utilisée est supposée être représentative de la zone d'étude dans un contexte de changement climatique. A partir de cette valeur de la recharge, une bonne corrélation entre les charges calculées et celles observées a été constaté. Toutefois, l'hypothèse sur la constance et l'uniformité de la recharge sur la période de la simulation (2000-2020) appliquée sur tout le modèle semble être une condition optimiste. Une telle hypothèse ne traduit pas en tout lieu la réalité du terrain. En effet, le mode d'occupation du sol de la zone d'étude peut rendre le sol imperméable de même que la forte puissance des argiles qui varient de 24 à 40 m (Aké, 2001 ; Aké, 2010) peut entraîner une diminution de la recharge en certains secteurs du modèle. Mais ceci ne remet pas en cause les résultats obtenus. Les écarts observés au niveau de certaines charges peuvent être dus en partie, à l'influence causée par l'exploitation des forages en question car il faut noter qu'aucun piézomètre n'a été utilisé dans cette étude. Par ailleurs, l'exploitation des forages lors des campagnes piézométriques pourrait perturber le niveau de l'eau dans les forages. La carte piézométrique modélisée montre que les eaux souterraines s'écoulent dans la direction du nord vers le sud. Ce sens d'écoulement est imposé par le gradient de charge dans les piézomètres du Nord 65 m et celle du Sud 5 m. Les études analogues réalisées par HYDROEXPERT (2000) et Aké (2001) sur la nappe de Bonoua ont montré d'une manière générale que les eaux de la nappe s'écoulent du Nord vers le Sud. La simulation de la piézométrie à l'horizon 2020 a mis en évidence l'influence des prélèvements de la SODECI sur le niveau de la nappe. L'influence d'un champ captant est matérialisée par le rabattement de la nappe, provoqué par l'extraction d'eau par pompage au niveau de l'ensemble des forages. Lorsque le nombre des forages des champs captants augmente, les rabattements induisent des cônes de plus en plus grands qui peuvent communiquer ou non. De 2015 à 2020 l'étendue du cône a augmenté à cause des nouveaux forages de Tchintchébé et d'Ono dont la quantité des prélèvements est estimée à 94 224 m<sup>3</sup>/j. Les valeurs de rabattement obtenues reflètent le comportement réel de la nappe. Ainsi, le plus fort rabattement enregistré en 2020 en prenant l'année 2000 comme année de référence, a été observé au droit du piézomètre de Kimoukro et est de 112,5 cm. Le comportement de ce piézomètre est due au fait qu'il est proche du champ

captant d'Ono. Par contre le piézomètre de Soubressi qui enregistre le plus faible rabattement (1,508 cm) est éloigné des champs captants donc pas influencé par les prélèvements. Le cône de rabattement qui se forme autour d'un ouvrage de captage est déterminé par le débit prélevé et sa progression est fonction du débit prévisionnel. Il est donc nécessaire d'avoir une idée sur l'augmentation des débits d'exploitation des forages des champs captants concernés. Par ailleurs, durant les simulations prédictives, les débits d'exploitation sont restés constants. Ces valeurs de rabattement calculées doivent donc être considérées comme étant celles qui seront obtenues lorsque les débits ne changeront pas. Les rabattements seront supérieurs dans un souci d'augmentation de la production pour satisfaire la demande en eau. Une bonne répartition des futurs forages dans un souci d'augmentation de la production pourrait diminuer les rabattements ainsi que les probabilités d'une contamination des eaux souterraines par la lagune Ono et le fleuve Comoé. Le cône de rabattement de la nappe de Bonoua obtenu en 2020 progresse vers ces cours d'eau.

## **CONCLUSION**

La modélisation des écoulements souterrains de la nappe de Bonoua a été réalisée à une échelle régionale dans le but de déterminer l'ordre de grandeur du rabattement du niveau de la nappe, induit par l'exploitation des nouveaux forages de Tchintchébé et d'Ono. L'analyse du comportement hydrodynamique de la nappe de Bonoua a clairement révélé que les prélèvements effectués depuis 2000 au niveau des forages ont influencé le niveau de la nappe de Bonoua. Les simulations sur la période de 2000 à 2020 indiquent que la grandeur du rabattement de la nappe sera en moyenne de 31,544 cm en 2020 en considérant les débits constants de 2015 à 2020. Par ailleurs, le fort rabattement a été enregistré au droit du forage de Kimoukro (112,5 cm). Aussi, la simulation des cônes de rabattement autour des nouveaux forages montre que ceux-ci s'interfèrent et les valeurs sont comprises entre 0,5 et 3,5 m sur la période de 2005 à 2020. Vu ces fortes valeurs de rabattement, les zones à exploiter pour l'implantation d'autres forages sont le Sud-est ou l'Est des champs captants de Tchintchébé et d'Ono.

## **REMERCIEMENTS**

Nous remercions l'Office National de l'Eau Potable (ONEP), la Société de Distribution de l'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI) pour avoir mis des données à notre disposition et le PASRES pour le financement de cette étude.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- AKE G. E. (2001). Evaluation des ressources en eau souterraine de la région de Bonoua, Mémoire de DEA, Université de Cocody, 72 p.
- AKE G. E. (2010). Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, 207 p.
- ANDERSON M., WOESSNER W. (1992). Applied groundwater modeling and advective transport, Academic Press, Inc. London, pp. 234-350
- DELOR C., DIABY I., SIMEON Y., YAO B., TASTET J-P., VIDAL M., CHIRON J-C., DOMMANGET A. (1992). Notice explicative de la Carte Géologique de la Côte d'Ivoire au 1/200 000. Feuille de Grand-Bassam, Mémoire de la Géologie de Côte d'Ivoire, n°4, Abidjan, Côte d'Ivoire, 30 p
- DJAA K.A., TAPE Z. P., KARIM B. (2014). Le secteur de l'eau en République de Côte d'Ivoire, Swelia, le réseau des entreprises du cycle de l'eau, 15 p
- GURWIN J., LUBEZYNSKI (2004) Modeling of complex multi-aquifer systems for groundwater resources evaluation. Swidnica study case (Poland), Hydrogeology Journal, pp. 627-639
- HYDROEXPERT (2000). Réalisation d'un modèle hydrodynamique de la nappe Sud-Comoé, 51 p
- JOURDA J. P., KOUAME K. J., SALEY M. B., KOUADIO B. H., OGA Y. S., DEH S. (2006). Contamination of the Abidjan Aquifer by sewage: An assessment of extent and strategies for protection. Ground water pollution in Africa, Editors Yongxin Xu and Brent Usher, Taylor and Francis/Balkema, Great-Britain, pp. 291-300
- KOUADIO L., ABDOULAYE S., JOURDA P., LOBA M., RAMBAUD A. (1998). Conséquences de la pollution urbaine sur la distribution d'eau d'alimentation publique à Abidjan. Cahiers de l'Association Scientifique Européenne pour l'Eau et la Santé, vol.3, n°1, pp. 61-75.
- KOUAME K., JOURDA J. P., LEBLANC Y., DEH S., ANANI A., BIEMI J. (2009). Implication of Hydrogeologic Modeling in the Estimate of Pollutants Transfer Time towards Groundwater of Abidjan District: Case of Toxic Waste. European Journal of Scientific Research, vol.32, No.1, pp. 6-24.

- LEBLANC Y. (1999). Prédiction de l'effet du décapage d'une mine à ciel ouvert sur l'hydrogéologie locale à l'aide de la modélisation numérique. Systèmes Geost. International, Laval, Québec, 23 p.
- LEDUC C. (2005). Modélisation hydrogéologique Orsay 2004 – 2005. Notes de cours de modélisation numérique en hydrogéologie, 16 p
- MAC DONALD M. G., HARBAUGH A. W. (1988). A modular three dimensional finite-difference ground water flow model. USGS, book 6 modeling techniques, A1. Washington, USA,
- OGA Y. M. S. (1998). Ressources en eaux souterraines du Grand Abidjan : Approches Hydrochimiques et Isotopiques. Thèse de Doctorat Unique, Université de Paris XI Orsay, 240p.
- TASTET J-P. (1979). Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du Littoral du Golfe de Guinée. (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles. Université de Bordeaux I, n°621, 181p
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC (1999). Visual MODFLOW version 2.8.1. Waterloo, Ontario, Canada.