

Modélisation hydrodynamique de l'aquifère côtier du Saloum (Centre Ouest du Sénégal) par approche stochastique

[Hydrodynamic modelling of the Saloum coastal aquifer (central western Senegal) using stochastic approach]

Seyni Ndoye¹, Hamza Brahim Mahamat², Amadou Sarr¹, Mathieu Le Coz³, Arnaud Gauthier⁴, Cheikh Bécaye Gaye⁵, Philippe Le Coustumer⁶, and Moumtaz Razack³

¹Water-Energy-Environment-Industrial Processes Laboratory (LE3PI), Department of Civil Engineering, Polytechnic School, Cheikh Anta Diop University, BP 5085 Dakar Fann, Senegal

²Polytechnic University of Mongo, Faculty of Mines and Geology, BP 4377 Mongo, Chad

³University of Poitiers, CNRS, UMR 7285 IC2MP, 40 Avenue du Recteur Pineau, 86022 Poitiers Cedex, France

⁴Civil Engineering and Geo-Environment Laboratory, Faculty of Science and Technology, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France

⁵Cheikh Anta Diop University, Faculty of Science and Technology, Department of Geology, BP 5005 Dakar-Fann, Senegal

⁶Bordeaux Imaging Center, University of Bordeaux, Bordeaux, France

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Water supply in the Saloum area is provided by the groundwater in the sandy-clay formations of the Continental Terminal. The presence of hypersaline waters from the Saloum River in the north and the ocean in the west, climate change and population growth are threatening groundwater resources, hence the need for a better understanding of the aquifer system. The aim of this work is to establish a hydrodynamic model that can reproduce the behaviour of flows by identifying the main recharge and evaporation mechanisms and estimating the hydrodynamic properties. The heterogeneity of the geological formation is at the root of a very large variation in the hydraulic parameters. This heterogeneity and the very limited uncertainty in the data justify opting for a stochastic modelling approach. The modelling is carried out under steady state conditions with imposed loads in order to quantify the natural flows passing through the aquifer and to understand the distribution of hydrodynamic parameters in order to reconstruct the piezometry. The probability densities for the values of permeability and recharge obtained indicate a high sensitivity of the simulations to these two parameters. The hydraulic conductivity values oscillate between 10^{-2} and 10^{-5} m.s⁻¹ and are identical to those obtained by test pumping. The overall average balance shows a perfect balance between inflow and outflow. The average annual recharge of 13.98 mm is provided mainly by rainwater, and evapotranspiration is 13.65 mm. The model, which is deemed acceptable under steady-state conditions, will serve as the basis for modelling saline intrusion.

KEYWORDS: Modelling, Stochastic, Aquifer, Saloum, Senegal.

RESUME: L'alimentation en eau dans la zone du Saloum est assurée par la nappe sablo-argileuses du Continental Terminal. La présence des eaux hypersalées du fleuve Saloum au nord et l'océan l'Ouest, les changements climatiques, l'accroissement de la population constituent une menace accrue sur les ressources en eau souterraine d'où un besoin d'une meilleure

compréhension du système aquifère. Ce travail cherche à établir un modèle hydrodynamique permettant de reproduire le comportement des écoulements à travers l'identification des principaux mécanismes de recharge, d'évaporation et l'estimation des propriétés hydrodynamiques. L'hétérogénéité de la formation géologique est à l'origine d'une très forte variation des paramètres hydrauliques. Cette hétérogénéité et l'incertitude des données très réduites conduisent à opter pour une approche de modélisation stochastique. La modélisation est faite en régime permanent en charge imposée pour la quantification des débits naturels transitant dans l'aquifère et la connaissance de la distribution des paramètres hydrodynamiques permettant la reconstitution de la piézométrie. Les densités de probabilité pour les valeurs de perméabilité et de la recharge peu étalées obtenues indiquent une forte sensibilité des simulations à ces deux paramètres. Les valeurs de conductivité hydraulique oscillent entre 10^{-2} et 10^{-5} m.s⁻¹ et sont identiques à celles obtenus par pompage d'essai. Le bilan global moyen montre un équilibre parfait entre les débits d'entrée et de sortie. La recharge annuelle moyenne de 13,98 mm est assurée pour l'essentiel par les eaux de pluie et l'évapotranspiration est de 13,65 mm. Le modèle jugé acceptable en régime permanent va servir de base pour la modélisation de l'intrusion saline.

MOTS-CLEFS: Modélisation, Stochastique, Aquifère, Saloum, Sénégal.

1 INTRODUCTION

L'existence de nombreux logiciels de modélisation en hydrogéologie est une opportunité pour la communauté scientifique en lui permettant de générer des modèles prédictifs tant qualitatif que quantitatif [1]; [2]; [3]; [4]; [5]. Ceci permet aussi de pallier aux manques de données de terrains en générant des données aléatoires qui peuvent venir caler les modèles générés puis les affiner ([6]; [7]; [8]; [9]; [10]). Les raisons pour lesquelles les données sont difficiles à obtenir, collecter, compiler sont autant scientifiques que socio-politiques. D'un point de vue scientifique, les données peuvent être manquantes, pas assez nombreuses, hétérogènes et parfois peu fiables. Les problèmes liés aux campagnes de terrain sont multiples allant des zones de conflits rendant la collecte difficile voire impossible, à la difficulté d'organiser et financer de telles campagnes. Ce manque de moyens peut être à l'origine des zones « grises » en hydrogéologie qualitative et quantitative. Au Sénégal par exemple, les premières études hydrogéologiques ayant permis d'avoir des données nécessaires à la compréhension du fonctionnement hydrogéochimique des aquifères et à l'établissement de cartes piézométriques, datent des années 1950. Jusque dans les années 1970, des campagnes de terrains ont permis de mieux appréhender l'hydrogéologie de certaines zones du pays comme celle qui nous intéresse dans ce travail à savoir la région côtière du Saloum [11]; [12]. Dans les zones littorales, la pression anthropique sur les réserves en eaux douces et le changement climatique modifient les flux, menant entre autres à une salinisation de nombreux aquifères ([13]; [14]; [15]; [16]; [17]; [18]). La zone côtière centre du Sénégal (Delta du Saloum) culmine les problèmes: 1) prélèvements en augmentation constante liés au 1) a) développement de la population mais aussi à 1) b) des transferts de l'eau vers d'autres zones comme les îles du Saloum ([19] des pratiques agricoles et touristiques, 3) une salinisation par le développement d'intrusions marines ([20]; [21]; [22] les conditions climatiques perturbées ([23]).

La caractérisation hydrogéologique pour l'estimation des réserves (quantitativement et qualitativement) afin d'adapter la gestion et la surveillance devient un défi majeur. Il est donc aujourd'hui plus que jamais opportun d'améliorer la connaissance sur les aquifères. Pour ces raisons suite aux travaux effectués dans la zone [24]; [25]; [26], cette nouvelle étude de l'aquifère côtier du Saloum se propose de caractériser son fonctionnement hydrogéologique avec une autre approche de modélisation. Elle est axée sur la mise en place d'un modèle hydrodynamique afin de reproduire le comportement de l'écoulement à travers l'identification des mécanismes principaux de la recharge, de l'évaporation et de l'estimation des propriétés hydrodynamiques par une approche basée sur la méthode stochastique par simulation Monté Carlo pour faire face à la faible densité et aux incertitudes importantes des données disponibles. C'est ainsi qu'après une présentation de la région d'étude et des outils de travail, nous avons montré la méthode d'identification des paramètres du modèle puis terminé par la présentation des résultats et leur discussion.

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

La zone d'étude (Figure 1) est située dans le centre ouest du Sénégal et s'inscrit dans un quadrilatère (13°35 à 14°10 de latitude Nord et 15°40 à 16°30 de longitude Ouest) qui couvre une superficie d'environ 5000 km². Ses limites sont l'Océan Atlantique à l'Ouest, le fleuve Saloum au Nord, le réseau hydrographique du Nianiji Bolon (ou Bao Bolon) à l'Est et la Gambie

au Sud. Le modelé général de la région est un ensemble de vastes plateaux tabulaires pouvant passer de 30 à 40 mètres d'altitude, entaillé par un réseau de larges vallées aux versants peu pentés.

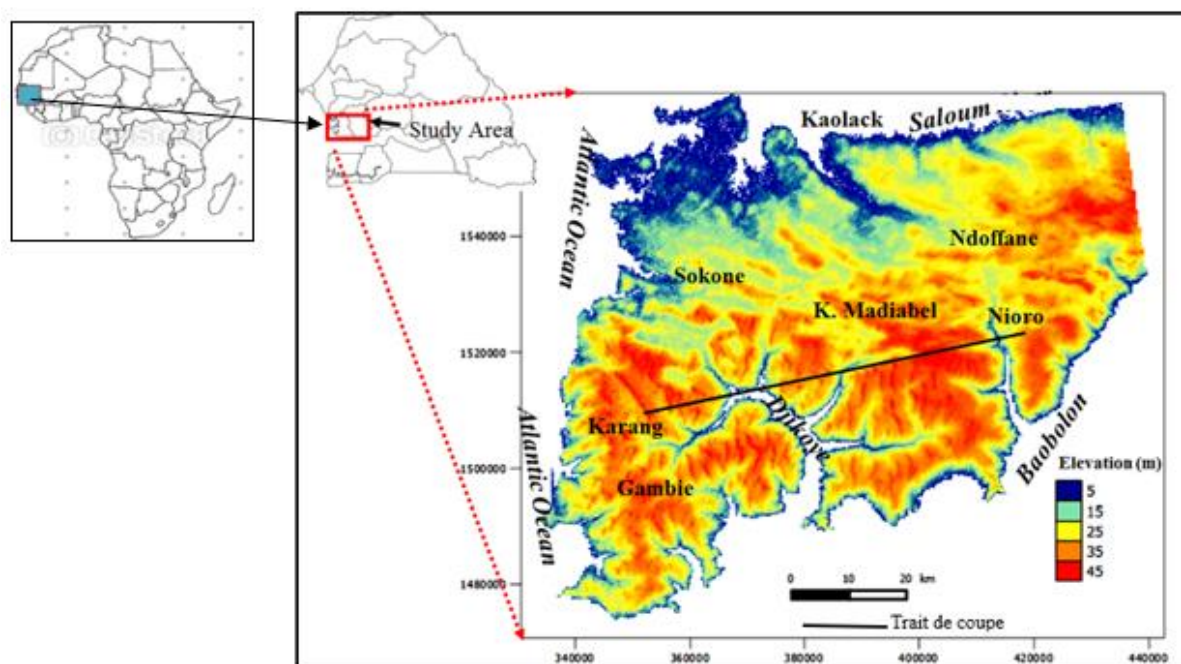


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

La zone du Saloum est caractérisée par l'alternance d'une longue saison sèche et d'une saison pluvieuse courte (4 à 5 mois). L'essentiel des pluies tombent entre juillet et septembre dans l'ensemble de la zone d'étude avec une diminution notée du Sud vers le Nord dans l'étendu du pays au cours du temps. Les apports météoriques représentant l'essentiel de la recharge; dans ces conditions, la diminution de la pluviosité aurait des répercussions néfastes sur les systèmes hydrogéologiques locaux. La zone d'étude est aujourd'hui encadrée par les isohyètes 400 et 800 mm [23], ce qui correspond à une zone climatique de type soudano-sahélien.

Le régime des vents est sous la dominance des alizés. En saison sèche, les vents secs continentaux viennent du Nord-Est, pendant la saison des pluies, les vents humides du Sud-Ouest amènent un régime de mousson. L'évapotranspiration moyenne annuelle tourne au tour de 1800mm. La moyenne des températures mensuelles varie de 25,6 °C (janvier) à 31,3 °C (mai). Les températures moyennes mensuelles les plus élevées s'observent en général pendant le mois de mai. Les valeurs d'humidité relative mensuelles moyennes varient entre 37,8 et 79,5 %. L'humidité relative varie beaucoup au cours de l'année et peut atteindre des valeurs maximales de 95 %.

2.2 GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

La région appartient à la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien qui est le plus occidental et l'un des plus vastes bassins du littoral ouest-africain représenté par des formations d'âge mésocénozoïque [27]. Au niveau de la région du Saloum, la formation géologique qui nous intéresse dans cette étude est celle du Continental Terminal (CT) essentiellement sablo-argileuse appelé formation du Saloum (Figure 2). C'est un dépôt marin détritique qui a été affecté par une altération continentale [28]. Ses variations latérales et verticales de faciès sont fréquentes, passant à des matériaux plus ou moins argileux ou plus ou moins latéritiques [11] à des grès hétérométriques, argileux et bariolés, parfois cimentés par de la calcite micritique ([28]. En revanche, les grès cuirassés sont constitués d'oxy-hydroxydes de fer, généralement de la goethite, plus rarement de l'hématite qui épigénisent les minéraux argileux ([29]; [30], essentiellement kaolinique.

L'épaisseur du CT est très variable avec une augmentation qui se fait du nord vers le sud et d'ouest vers l'est, allant d'une dizaine de mètres à 150 m ([19]. Les zones de plus forte épaisseur sont associées à d'anciennes vallées incisées dans le substratum marno-calcaire [12]. Le CT est surmonté par une formation cuirassée issue d'une altération latéritique en climat chaud et humide localement surmontée des dépôts quaternaires.

Les ressources en eau souterraine du bassin sédimentaire sénégalais sont contenues dans plusieurs aquifères associés à différentes formations d'âge Maastrichtien à Quaternaire ([31]). L'extension et la continuité verticale de ces aquifères sont très variables. Deux aquifères sont rencontrés au niveau de la zone d'étude; l'aquifère à nappe profonde du Maastrichtien qui est saumâtre et celui à nappe superficielle contenue dans les formations géologiques du Continental Terminal. La nappe du Continental Terminal a pour réservoir une épaisse succession de sables, de sables argileux et d'argiles montrant de fortes variations latérales de faciès. Les paramètres hydrodynamiques de cet aquifère [12] montrent une grande variabilité qui s'explique par l'hétérogénéité lithologique. Le coefficient de perméabilité (K) varie donc fortement entre $0,2 \cdot 10^{-4}$ et $3,2 \cdot 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ avec les plus fortes valeurs de K ($1,2 \cdot 10^{-4}$ et $3,2 \cdot 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$) mesurées dans le secteur centre où dominent les faciès sableux (sable grossier à moyen) à chenaux gréseux et passées argileuses. Les coefficients de perméabilité sont de l'ordre de $0,2 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ dans les secteurs Nord et Nord-Ouest à dominant sables fins à argileux et limons. Les valeurs de transmissivité oscillent entre $2,1 \cdot 10^{-4}$ et $6,9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ avec une moyenne de $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En plus de l'hétérogénéité des faciès, la variabilité des transmissivités peut également s'expliquer par la variation de l'épaisseur de la nappe qui n'est pas toujours totalement traversée. Les valeurs de coefficient d'emménagement (S) obtenues à partir des pompages d'essai [12] sont peu nombreuses et variables

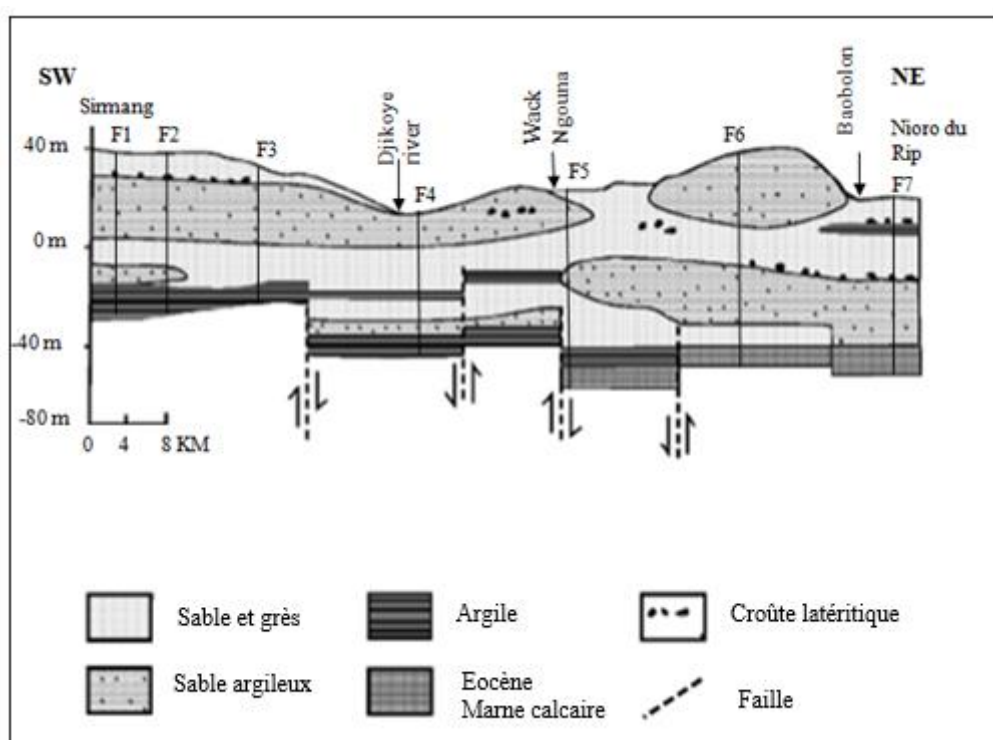


Fig. 2. Coupe géologique interprétative de la région du Saloum [21]; trait de coupe 1)

La surface piézométrique présente une morphologie à gradient hydraulique variable (Figure 3). L'écoulement est divergent dans le secteur Sud-Ouest, ce qui indique que les principaux exutoires sont constitués par l'Océan à l'Ouest, le Djikoye et le Bao Bolon au sud de la région. Le secteur Nord-Est de la région est caractérisé par une piézométrie négative et l'écoulement y est convergent. Les altitudes piézométriques dans ce secteur avoisinent les 10 m sous l'Océan.

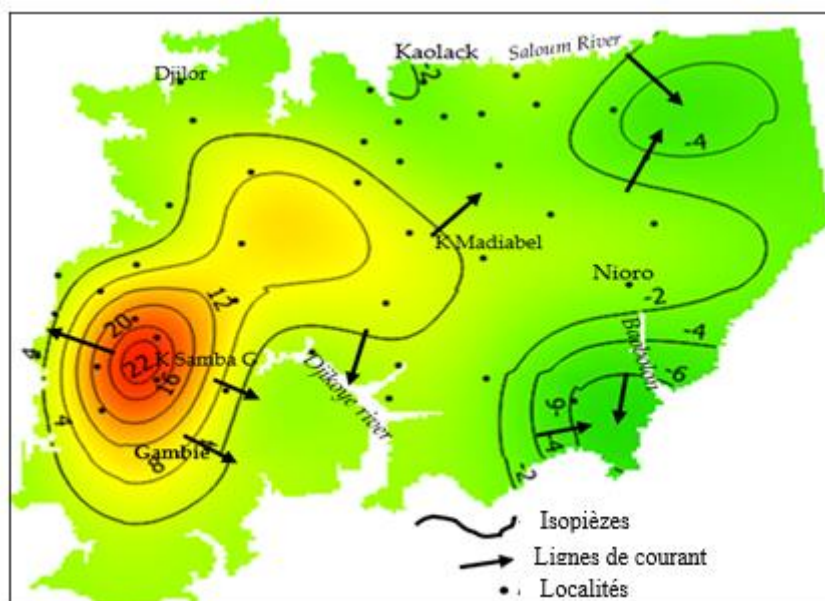


Fig. 3. Carte piézométrique de la nappe du Saloum en mai 2012

3 OUTILS ET METHODOLOGIE

3.1 OUTILS

L'outil de travail utilisé est le code de modélisation MODFLOW-2005 développé en Fortran 90 par l'United State Geological Survey ([32] disponible gratuitement). Le logiciel est conçu pour simuler le fonctionnement de systèmes aquifères par différence finie [33]. Il doit sa réputation à une utilisation mondiale massive et ayant pour qualités premières d'être simple et modulaire ([1]; [34]; [35]). Pour ce travail, le code source de MODFLOW-2005 est couplé avec le SIG (Système d'Information Géographique) GRASS (Geographic Resources Analysis Support System). GRASS a été mise au point pour la première fois en 1980 par l'U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories (USA-CERL) comme outil de gestion foncière et de planification de l'environnement pour l'armée. Cet outil connaît un essor important grâce à une équipe de l'université de Baylor à partir de 1995 qui le développe sous le système d'exploitation Linux. Ce Logiciel est amélioré notamment avec la création d'une interface graphique entièrement opérationnelle pour tous les systèmes d'exploitation au fil du temps. GRASS GIS contient un ensemble de modules conçu pour faciliter des analyses rapides et efficaces sur des rasters, vecteurs et données tabulaires (ASCII, TXT, etc.) et interagit avec MODFLOW grâce à un programme de communication écrit en langage Bash sous le système d'exploitation Linux. Ce couplage permet de profiter pleinement des capacités des SIG pour la création des entrées nécessaires à la modélisation des écoulements mais aussi de stocker, manipuler et visualiser celles obtenues en sortie du modèle ([36]).

3.2 METHODOLOGIE

L'hétérogénéité des formations géologiques est à l'origine d'une très forte variation des paramètres hydrauliques. La prise en compte de l'hétérogénéité et de l'incertitude sur les données nous amène à opter pour une approche stochastique de modélisation ([37]; [38]; [39]; [40]). L'approche stochastique repose sur une méthode numérique et une méthode statistique. La méthode numérique utilisée est celle des différences finies quant à la méthode statistique, c'est celle de la simulation Monte Carlo avec la loi de distribution normale. Plusieurs jeux de paramètres acceptables sont obtenus et classés en fonction de l'ajustement qui a abouti à des calibrations optimales. Elle n'accepte pas le principe du paramètre optimal unique ([41]; [42]; [43]; [44]; [45]).

L'erreur de discrétisation (ou erreur numérique) doit être largement inférieure à l'incertitude et pour cela le maillage doit être assez fin [46]. Le domaine d'étude est ainsi discrétisé par un maillage carré régulier de 500 m de côté. Le modèle comprend 63 648 mailles qui sont distribuées sur 204 lignes et 148 colonnes selon les directions est-ouest et nord-sud. La discrétisation verticale quant à elle, est réalisée en utilisant une monocouche limitée par le terrain naturel au sommet et la couche d'argiles imperméables ou parfois de calcaires compacts à la base. Les données relatives à la limite basale sont obtenues avec les

travaux de [12] et de [47]. La morphologie de cette surface est ensuite interpolée au moyen du logiciel GRASS afin d'obtenir une altitude pour chaque maille du modèle.

Les conditions aux limites latérales retenues sont des charges imposées et des flux nuls (Figure 4). Les charges imposées sont appliquées sur toutes les limites à eau (océan et rivière) pour mieux contraindre le domaine afin de bien restituer les paramètres hydrodynamiques. Dans la partie Est, un flux nul est défini grâce à l'analyse de la carte piézométrique qui montre sur cette frontière la présence de lignes de courant presque parallèles aux limites.

Les Paramètres internes nécessitant une calibration sont la conductivité hydraulique, la recharge et l'évapotranspiration. Avec une hétérogénéité des faciès [11] qui peut atteindre des degrés très élevés suivant les secteurs, il est difficile d'établir une carte objective de la lithologie. De plus, il faut noter le caractère localisé des estimations des paramètres hydrodynamiques (transmissivité, conductivité hydraulique, coefficient d'emménagement).



Fig. 4. Conditions aux limites

Le nombre de valeurs disponibles est très réduit et ne permet pas d'établir une carte spatialisée de la conductivité hydraulique. La seule carte spatialisée disponible est la carte des sols seul moyen a priori de catégorisation des unités hydrogéologiques et des zones de recharge nette. Cette carte révèle deux grandes zones délimitées selon la nature des faciès (Figure 5).

À défaut de carte homogénéisée pour la lithologie du réservoir, ces deux zones sont retenues comme zones de conductivité hydraulique homogène appliquée au modèle pour le paramètre K. Pour l'évapotranspiration et la recharge, l'utilisation de cette carte ne pose pas de problème sachant que ces deux paramètres s'appliquent directement sur le sol.

Les différentes conductivités hydrauliques ont été estimées à partir de l'interprétation des essais de pompages [12] dans les différents forages de la zone. La recharge (RCH) comme l'évapotranspiration (EVT) sont des données obtenues à partir des travaux antérieurs ([47]; [48]; [49]; [50]; [24]). Ces données d'entrée sont associées aux différentes unités géologiques selon une plage de valeurs pour chaque paramètre.

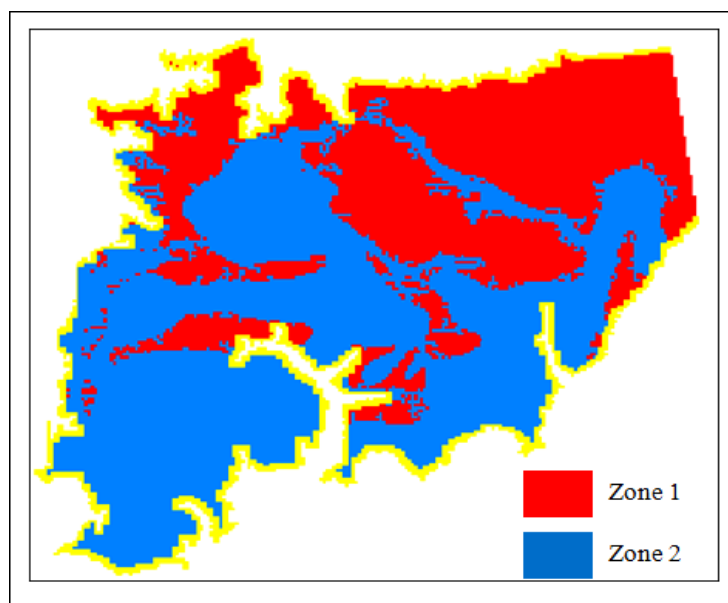


Fig. 5. Zonage des unités hydrogéologiques à partir de la carte des sols

La mise en œuvre de la méthode de simulation Monte Carlo suit quatre étapes:

- 1- *Définir les gammes de paramètres*: la conductivité hydraulique qui permet de restituer l'écoulement est contrainte dans une première étape. La plage probable de la conductivité hydraulique trouvée (Tableau 1) est ensuite associée à la plage probable des autres paramètres pour générer les jeux de paramètres.

Tableau 1. Plages probables des paramètres d'entrée au niveau des deux zones

Paramètres	K (m/s)	RCH (mm)	EVT (mm)
Minimum	10^{-7}	0	0
Maximum	10^{-1}	50	50

- 2- *Tirage aléatoirement* de 10 000 jeux de paramètres parmi les plages probables selon une loi de distribution normale avec le logiciel Scilab.
- 3- *Dix milles simulations* sont réalisées en régime permanent à partir des résultats aléatoires permettant une reconstitution de la piézométrie observée dans la région d'étude. Le modèle hydrodynamique qui a pour objectif d'identifier le système (champ de conductivité hydraulique recharge, etc.) n'a pas tenu compte des prélèvements.
- 4- *L'évaluation de la performance du modèle* est faite grâce à l'utilisation de la RMSE (Root Mean Square Error). Cette erreur quadratique [51] moyenne indicatrice de la différence (Δh) entre charges observées et charges simulées au niveau des points d'observation est obtenue suivant l'équation 1:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(h_i^{sim}) - h_i^{obs}]^2} \text{ (Equation 1)}$$

Avec RMSE: l'erreur quadratique moyenne, n le nombre d'ouvrages de contrôle, et h_i^{sim} et h_i^{obs} les charges piézométriques simulées et observées au niveau de l'ouvrage i .

Trois cas de figures sont implémentés dans le modèle pour contrôler cette différence entre les charges simulées et observées au niveau de 35 ouvrages de contrôle pour chaque simulation: $\Delta h \leq 3$ m; $\Delta h \leq 5$ m et $\Delta h \leq 10$ m

Toute simulation ayant une RMSE inférieure à l'erreur admissible (Equation 2) est considérée comme acceptable:

$$E_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^{o\max} - h_i^{o\min})^2} \text{ (Equation 2)}$$

Avec $h_i^{omax_i^{obs}}$ et $h_i^{omin_i^{obs}}$

E_a erreur admissible et σ_i l'écart-type de la droite d'étalonnage

Une densité de probabilité est obtenue pour chaque paramètre en se basant sur les 250 meilleures simulations pour lesquelles la RMSE est inférieure à l'erreur admissible fixée à 5 m.

4 RESULTATS

Les densités de probabilité associées aux conductivités hydrauliques et à la recharge sont examinées pour les deux zones considérées au niveau de la Figure 5. La densité de probabilité de la conductivité hydraulique présente une distribution unimodale (Figure 6A) peu étalée, centrée sur une valeur moyenne de $10^{-4,23}$ (m/s) avec une médiane de $10^{-4,20}$ pour le K de la zone 1 et une distribution plus ou moins peu étalée avec le K de la zone 2 (Figure 6B), centré sur $10^{-3,60}$ avec une médiane de $10^{-3,50}$. La densité de probabilité de la recharge moyenne présente une distribution unimodale peu étalée (Figure 7) et centrée sur une moyenne de 20 mm (médiane 22,6 mm) pour un écart type de 11,9.

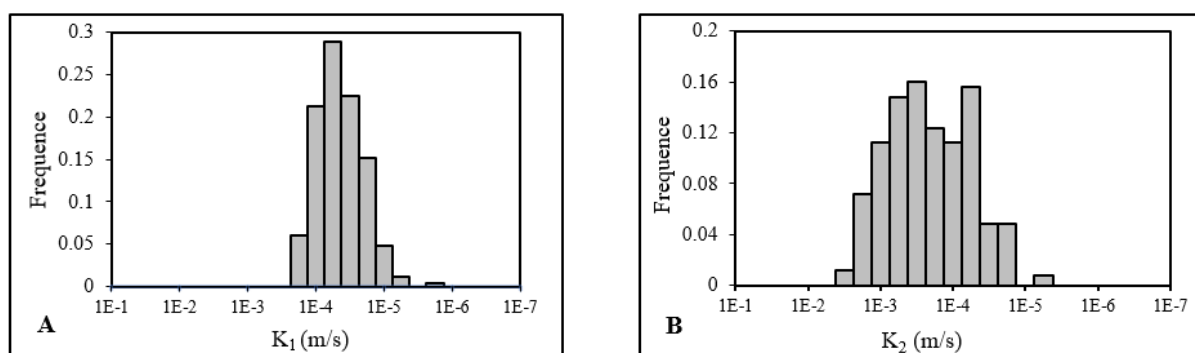


Fig. 6. Densité de probabilité de la conductivité hydraulique moyenne au niveau de chaque zone (A) zone 1 et (B) zone 2

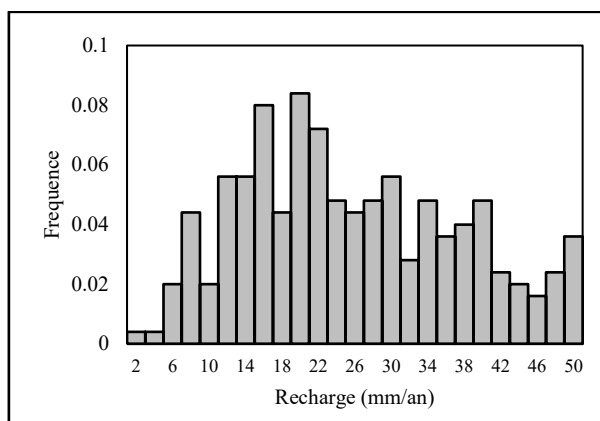


Fig. 7. Densité de probabilité de la recharge moyenne

La répartition spatiale de la piézométrie moyenne obtenue après simulations, est représentée à la figure 8. Dans l'ensemble, la morphologie du dôme piézométrique et de la dépression apparaît assez bien reconstituée. La comparaison entre la piézométrie moyenne calculée et celle observée au niveau des ouvrages d'observation révèle que sur l'ensemble des points d'observation, 46 % montre une différence ≤ 3 m, 34 % entre 3 et 5 m et 20 % égale à 5 m correspondant à l'erreur maximale.

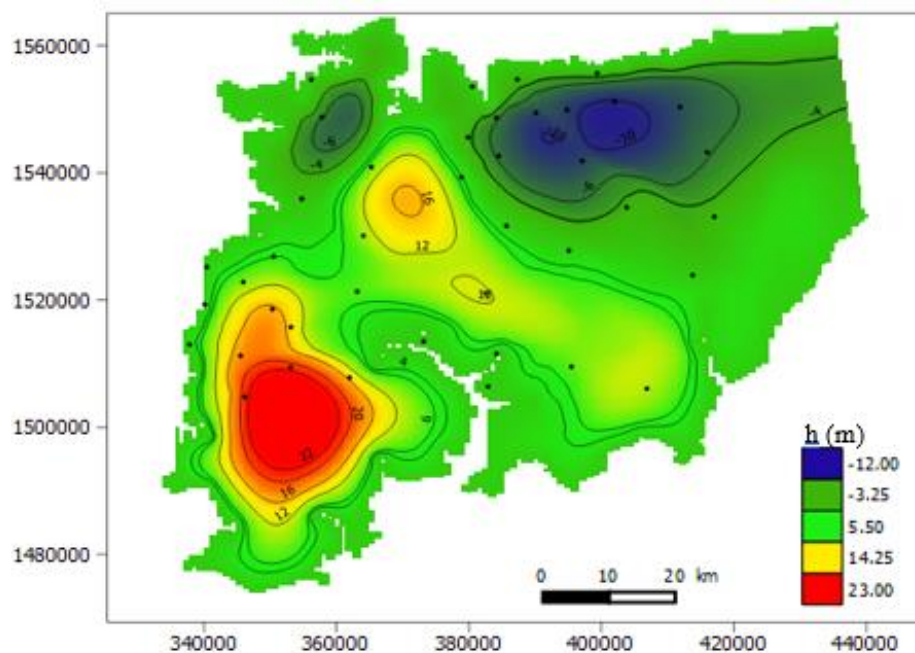


Fig. 8. Carte piézométrique moyenne simulée

Les niveaux piézométriques reconstitués sont assez proches de ceux mesurés dans les différentes localités (Figure 9). Les ouvrages où des problèmes de calibration sont rencontrés se trouvent au niveau du dôme piézométrique et vers le nord dans les environs du fleuve Saloum.

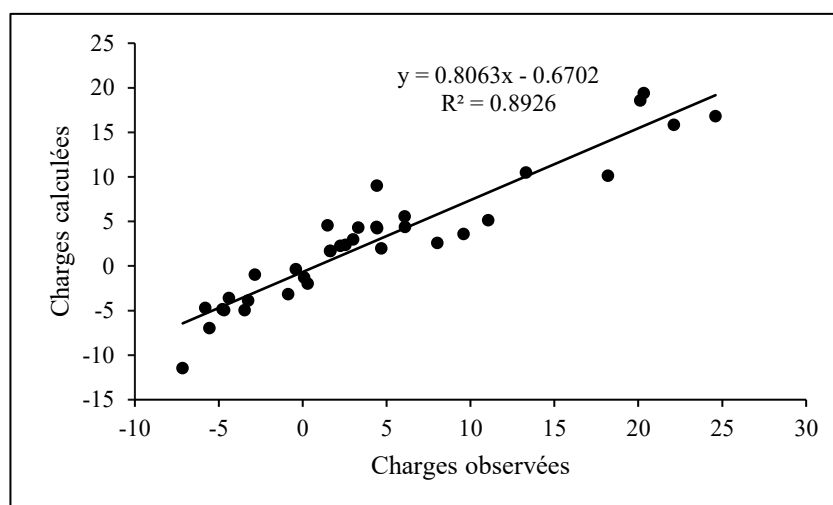


Fig. 9. Validation de la calibration (Charges mesurées vs calculées au niveau des ouvrages d'observation)

Le bilan des flux qui entrent dans le système est équilibré par celui qui sort (Tableau 2). Les apports aux limites représentent 7 % des entrées du système. Les pertes aux limites évaluées en moyenne par le modèle sur toutes les limites sont de l'ordre de 1,73 m³/s. Les pertes en mer évaluées sur toute la ligne côtière représentent 0,83 m³/s et celles évaluées au niveau des rivières, 0,68 m³/s. La quantité d'eau perdue par le système par évaporation est de 0,95 m³/s.

Tableau 2. Bilan global moyen des débits

ENTREE (m ³ /s)		SORTIE (m ³ /s)	
Emmagasinement	0	Emmagasinement	0
Apports aux limites	0,21	Sortie par les limites	1,73
Recharge	2,47	EVT	0,95
Total	2,68	Total	2,68
IN - OUT = 0.00			

5 DISCUSSIONS

Les densités de probabilité pour les valeurs de conductivité hydraulique et de la recharge peu étalées obtenues indiquent une forte sensibilité des simulations à ces deux paramètres. Cet effet sensibilité est plus accentué avec la conductivité hydraulique qui présente une densité de probabilité moins étalée. Les simulations en condition de potentiels imposés nous ont permis de bien contraindre le modèle afin d'avoir des valeurs correctes des paramètres hydrodynamiques de notre aquifère.

Les valeurs de conductivité hydraulique sont semblables aux valeurs obtenues par pompage d'essai dans la zone ([12]; [11]; [49]). Les valeurs oscillent entre 10^{-2} et 10^{-5} m.s⁻¹. Ces différentes valeurs de K sont en phase avec des faciès à dominante sableux et sablo-argileux des différents terrains. Dans l'ensemble, la morphologie du dôme piézométrique et de la dépression apparaît assez bien reconstituée.

La comparaison entre la piézométrie calculée et celle observée révèle une calibration jugée satisfaisante dans l'ensemble. Il faut noter cependant que des problèmes de calibration sont rencontrés sur quelques ouvrages au niveau du dôme avec des valeurs inférieures aux valeurs observées. Ceci peut être lié à une variation in situ de la conductivité hydraulique au niveau de ces différents points car ayant travaillé avec une conductivité hydraulique homogène. Les autres points où une meilleure calibration n'a pu être obtenue se situent au Nord dans les environs du fleuve Saloum et au Sud à proximité du BaoBolon. Le décalage entre les charges calculées et mesurées peut découler d'une mauvaise appréhension des charges piézométriques imposées au niveau de ces rivières.

Le bilan global moyen montre un équilibre parfait des débits d'entrée et de sortie. Le renouvellement de la réserve en eau souterraine est assuré pour l'essentiel par l'infiltration des eaux de pluie avec une recharge annuelle moyenne de 20,60 mm/an en potentiel imposé. Ces valeurs trouvées après les différentes simulations sont dans la gamme de valeurs obtenues avec les différents travaux antérieurs ([47]; [48]; [24]).

La valeur de l'évapotranspiration annuelle moyenne obtenue après simulation est de 13,65 mm/an. Ces valeurs très proches sont dans le même ordre de grandeur que celles obtenues avec les différents travaux antérieurs.

Les pertes d'eau aux limites sont importantes et se font vers l'océan. Les sorties en mer peuvent s'expliquer par la configuration piézométrique de l'aquifère. L'écoulement divergent au niveau du dôme piézométrique montre des pertes vers la mer à l'Ouest.

L'échantillonnage des densités de probabilité associées aux propriétés hydrodynamiques étant suffisante et vue que les différents résultats trouvés s'apparentent à ceux existants, le modèle peut être jugé acceptable.

6 CONCLUSION

Ce travail relate la modélisation hydrodynamique en régime permanent de l'aquifère côtier du Saloum (Sénégal) en tenant compte de l'hétérogénéité des formations géologiques. L'approche utilisée dans ce travail, basée sur une modélisation stochastique, s'est révélée assez efficace pour gérer la forte hétérogénéité de l'aquifère. Cette approche a conduit à une calibration très satisfaisante du modèle en potentiel imposé. Les conditions initiales ont été reproduites grâce au calage du modèle en régime permanent. Les conductivités hydrauliques sont respectivement comprises entre 10^{-2} et 10^{-5} m/s. Le bilan obtenu a permis de quantifier les entrées d'eau de mer et du fleuve Saloum; les pertes vers les effluents de la Gambie et celles évapotranspiratoires.

En perspective, cette modélisation va être approfondie en tenant compte des paramètres et des variables plus détaillées (climatique et pompage). Les modèles en régime permanent proposé pourraient servir de base pour une modélisation de

l'intrusion saline avec l'approche de l'interface abrupte en prenant en compte un paramètre supplémentaire incertain, la porosité.

REFERENCES

- [1] McDonald, M.C.; Harbaugh, A.W. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, p. 586, 1988.
- [2] Guo, W., Langevin, C. D. User's guide to SEAWAT: a computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow, U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A7, Tallahassee, Florida, USA, 2002.
- [3] Voss, C.I., Provost, A.M. SUTRA, a model for saturated-unsaturated variable density groundwater flow with energy or solute transport. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations, Open-File Report. 87-4369, 2008.
- [4] Diersch, H.-J.G. FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system reference manual. *Report No. WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research*, 2002.
- [5] Singh, A. Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review, *Sci Total Environ*, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.048, 2014.
- [6] Carrera, J.; Alcolea, A.; Medina, A.; Hidalgo, J.; Slooten, L.J. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeol. J.* 13, 206-222, 2005.
- [7] Cooley, R.L. A Theory for Modeling Ground-Water Flow in Heterogeneous Media; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2004.
- [8] Al-Bitar, A., Ababou, R. Random field approach to seawater intrusion in heterogeneous coastal aquifers: unconditional simulations and statistical analysis. In: Renard, P., Demougeot-Renard, H., Froidevaux, R. (Eds.), *Geostatistics for Environmental Applications*, Springer Verlag, 2005.
- [9] EL Mezouary, L.; Kabbaj, S.; ELMansouri, B.; Scozzari, A.; Doveri, M.; Menichini, M.; Kili, M. Stochastic modeling of flow in porous media by Monte Carlo simulation of permeability. *Math-Recherche et Application*, 16, pp. 1-24, 2016.
- [10] Zhou, H.; Jaime Gomez-Hernandez, J.; Li, L. Inverse methods in hydrogeology: Evolution and recent trends. *Adv. Water Resour.* 63, 22-37, 2014.
- [11] Noël, Y. Etude hydrogéologique du Continental Terminal de Sine Gambie première phase et rapport de synthèse, BRGM DKR 75 DK 05, p. 30, 1975.
- [12] Diluca, C. Hydrogeology of the Continental Terminal aquifer between the Sine and the Gambia. *Technical report, BRGM DKR 76 DKR 1976*, p.33, 1976.
- [13] Ranjan, P. S., Kazama, S., Sawamoto, M. Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers. *Journal of Environmental Management*, 80, 1, 25-35, 2006.
- [14] Mahesha, A.; Nagaraja, S.H. Effect of natural recharge on sea water intrusion in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 174, 211-220, 1996.
- [15] Oude Essink, G. H. P.; Van Baaren, E. S.; De Louwn, P. G. B. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands, *Water Resour. Res.* 46, W00F04, doi: 10.1029/2009WR008719., 2010.
- [16] Ferguson, G., and Gleeson, T. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, 2, 5, 342-345. doi: 10.1038/nclimate1413, 2012.
- [17] Shrestha, S., Bach, T. V., Pandey, V. P. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science and Policy*, 61, 1-13. doi: 10.1016/j.envsci.2016.03.010, 2016.
- [18] Pholkern, K., Saraphirom, P., & Srisuk, K. Potential impact of climate change on groundwater resources in the Central Huai Luang Basin, Northeast Thailand. *Science of The Total Environment*, 633, 1518-1535, 2018.
- [19] Faye, S. Etudes hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal dans la zone Sine-Gambie. *Rapport géophysique*. Projet PEPAM-BAD, 2017.
- [20] Faye, S.; Faye, S.C.; Ndoeye, S.; Faye, A. Hydrogeochemistry of the Saloum (Senegal) superficial coastal aquifer. *International journal of Geoscience environmental geology*, 44, 2, pp. 127-136, 2003.
- [21] Faye, S.; Maloszewski, P.; Stichler, W.; Trimborn, P.; Cisse Faye, S. and Gaye, C.B., Groundwater salinization in the Saloum (Senegal) delta aquifer: minor elements and isotopic indicators. *Sci. Total Environ*, 343, 243-259, 2005.
- [22] Ndoeye, S., Razack M., Faye S. et Gaye, C. B., Application des méthodes statistiques multivariées et de la classification de Stuyfzand pour la caractérisation des eaux souterraines de l'aquifère côtier du Saloum, Sénégal, *Afrique SCIENCE*, 13, 2 200-212, 2017.
- [23] Gaye, A.T.; Lo, H.M.; Djimbira, S. S.; Fall, M.S.; Ndiaye, I. Sénégal: Revue du contexte socio-économique, politique et environnemental. *Rapport d'études*, p. 85, 2015.

- [24] Ndoye, S. Comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe côtière du Continental Terminal du Saloum. Thèse 3^{ème} cycle Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 152 p, 2003.
- [25] Faye, S., Apports des outils géochimiques et isotopiques à l'identification des sources de salinité et à l'évaluation du régime d'écoulement de la nappe du Saloum. *Thèse es Sciences*. Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 153p, 2005.
- [26] Ndoye, S.; Faye S.; BA M. I. - Hydrodynamique de la nappe côtière du Saloum: étude par modèle numérique. *Revue du CAMES, Sciences appliquées et de l'Ingénieur*, Vol.1, N° 2, 2014.
- [27] Bellion, J.C. Histoire géodynamique post paléozoïque de l'Afrique de l'ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemeden, Tchad). Thèse d'état sciences Univ. d'Avignon et des pays du Vaucluse. 296p, 1987.
- [28] Lappartient, J.R. The Continental Terminal and the early Pleistocene of the Senegalo-mauritanian basin. Stratigraphy, sedimentology, diagenesis, alterations, paleoshore reconstitutions from the ferrallitic formations, PhD, University of Marseille 1985.
- [29] Flicoteaux, R.; Lappartient. J.R. Le passage de l'Eocène Inférieur à l'Eocène moyen sur la bordure orientale du dôme de Ndiass (Sénégal occidental). *Travx. Labo. Sc. Terre, Fac. Sci. Marseille Sr-Jérôme. Série A*, n°8, p. 28, 1972.
- [30] Conrad, G. and Lappartient, J. R. The Continental Terminal, its position within the Cenozoic geodynamic evolution of the Senegalo-mauritanian basin. *J African Earth Sciences*, 6 (1), 45-60, 1987.
- [31] Travi, Y. Hydrogéologie et Hydrochimie des Aquifères du Sénégal: Hydrochimie du fluor dans les eaux souterraines. Mem. N°95. Univ. Louis Pasteur et CNRS, p.148, 1993.
- [32] Harbaugh, A. W. Modflow-2005, The U S Geological Survey modular ground-water model - the Groundwater-Water Flow Process: U S Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, 2005.
- [33] Leake, S.A. *Modeling Groundwater Flow with MODFLOW and Related Programs*. US Department of the Interior, US Geological Survey, Fact sheet 121-97, doi: 10.3133/fs12197, 1997.
- [34] Harbaugh, A.W.; McDonald, M.G. *User's documentation for MODFLOW-96*, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey, Open-File Report 96 D 485, p. 56, 1996.
- [35] Kumar, C. P.; Singh, S. Concepts and Modeling of Groundwater System. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 2 Issue 2, February 2015.
- [36] Carrera-Hernandez, J.J. and Gaskin, S. J. The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): Open-source groundwater flow modeling. *Computers & Geosciences*, 32 pp. 339-351, 2006.
- [37] Dagan, G. Flow and transport in porous formations, Springer, Berlin 1989.
- [38] Gelhar, L. W. Stochastic Subsurface Hydrology, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [39] Zhang, D. Stochastic Methods for Flow in Porous Media Coping with Uncertainties. Academic Press, San Diego, CA. p. 350, 2002.
- [40] Al Bitar, A. Modélisation des écoulements en milieu poreux hétérogènes 2D / 3D, avec couplages surface / souterrain et densitaires. Thèse de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [41] Sorooshian, S.; Gupta, V. K. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resour. Res.*, 19, 260-268, 1983.
- [42] Duan, Q. S.; Sorooshian, S.; Gupta, V. K. Effective and efficient global optimisation for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res.* 28, 1015-1031, 1992.
- [43] Beven, K. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Adv. Water Resources*. 16, 41-51, 1993.
- [44] Freer, J.; Beven, K.; Ambrose, B. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach. *Water Resour. Res.* 32, 2161-2173, 1996.
- [45] Beven, K. On the future of distributed modelling in hydrology. *Hydrological processes*, 14, 3183-3184, 2000.
- [46] Bonnet, M. Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. *Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, p. 270, 1978.
- [47] Dieng, B. Paléohydrogéologie et hydrogéologie quantitative du bassin sédimentaire du Sénégal. Essai d'explication des anomalies piézométriques observées. *Thèse d'université*, Ecole Nationale Supérieure de mine Paris, p. 172, 1987.
- [48] Gaye, C. B. Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évapotranspiratoires des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal. Thèse es Sciences. Univ. De Dakar, p. 245, 1990.
- [49] Aranyossy, J. F. and Gaye, C. B. La recherche du pic de tritium thermonucléaire en zone non saturée profonde sous climat semi-aride pour la mesure de la recharge des nappes: première application au Sahel. *C. R. Acad. Sci. Paris II*, 315, pp. 637-643, 1992.
- [50] Aranyossy, J. F. and Ndiaye, B. Étude et modélisation de la formation des dépressions piézométriques en Afrique sahélienne. *Rev. Sci. Eau*, 6, pp. 81-96, 1993.
- [51] Chai, T.; Draxler, R.R. Root means square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) ? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geosci. Model Dev.* 7, 1247-1250, doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014.