



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI  
\*\*\*\*\*  
**INSTITUT NATIONAL DE L'EAU**  
**PROJET OMIDELTA-INE**

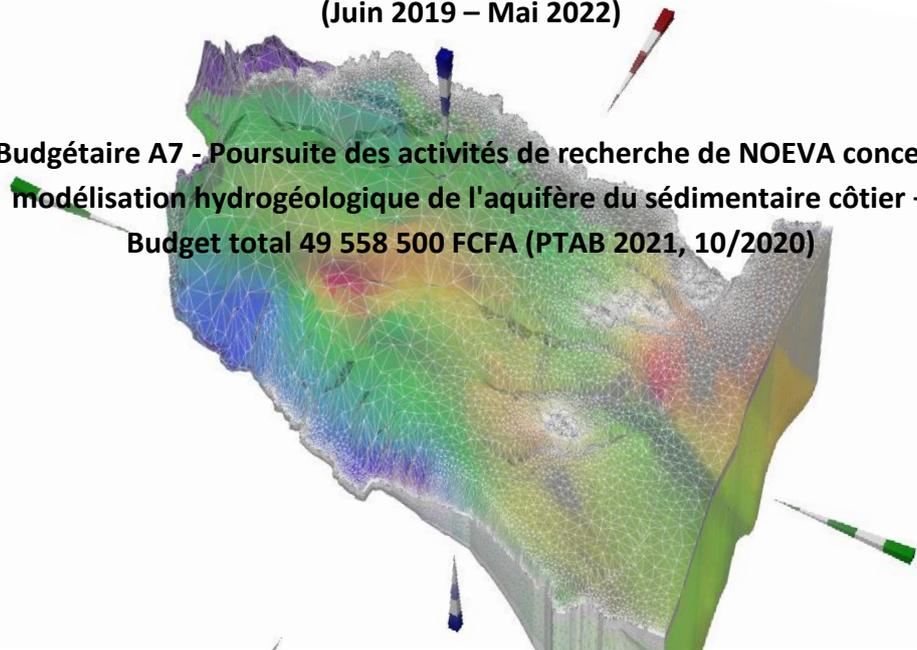


**ACTIONS POUR UNE GESTION INTEGREE  
DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE (AGIRES) :**

**Amélioration des connaissances et renforcement des capacités**

**(Juin 2019 – Mai 2022)**

**Ligne Budgétaire A7 - Poursuite des activités de recherche de NOEVA concernant la  
modélisation hydrogéologique de l'aquifère du sédimentaire côtier –  
Budget total 49 558 500 FCFA (PTAB 2021, 10/2020)**



**Rapport de la construction du modèle de  
gestion de l'aquifère du Mio-Pliocène du  
plateau d'Allada**

**Octobre 2022**

# Table des matières

Table des matières .....	1
Liste des figures .....	2
Résumé exécutif .....	4
1. Contexte et problématique .....	6
2. Principes et démarche de modélisation appliqués à ce projet .....	7
2.1. Rappel de la procédure de modélisation en hydrogéologie .....	7
2.2. Démarche de modélisation adoptée .....	8
3. Activités contributives du modèle .....	9
4. Construction du modèle de gestion .....	11
4.1. Intrants du modèle .....	11
4.2. Domaine d'étude .....	13
4.2.1. Délimitation du domaine d'étude .....	13
4.2.2. Discrétisation spatiale .....	14
4.2.3. Coupes géologiques .....	17
4.3. Conditions aux limites .....	19
4.3.1. Conditions à la limite Sud .....	20
4.3.2. Conditions à la limite Nord et à l'intérieur du modèle .....	20
4.3.3. Conditions aux limites des plan d'eau : relation nappe-rivière .....	21
4.4. Caractéristiques physiques .....	22
4.4.1. Champ de perméabilité .....	23
4.4.2. Champ de porosité de drainage .....	23
4.4.3. Champ de coefficient d'emmagasinement .....	24
5. Simulation .....	25
5.1. Régime permanent .....	26
5.2. Régime transitoire .....	29
5.3. Evolution du niveau de la nappe aux horizons 2030 et 2050 .....	30
6. Conclusion quant à l'élaboration du modèle .....	34

# Liste des figures

<b>Figure 1:</b> procédure de modélisation .....	8
<b>Figure 2:</b> Démarche de modélisation adopté dans la construction du modèle du plateau d'Allada .....	9
<b>Figure 3:</b> Prélèvements des eaux réalisées par Valerie KOTCHONI, Christian ALLE et des étudiants. De la droite vers la gauche : dans le lac Ahémé, au niveau de la source, à la station pluviométrique de Niaouli. ....	12
<b>Figure 4:</b> Esquisse du modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada. Les flèches vertes indiquent les interactions entre les eaux souterraines et de surface ; la croix rouge montre une déconnexion entre les eaux souterraines et de surface. Les interrogations indiquent les résultats à approfondir .....	12
<b>Figure 5:</b> Situation et morphologie du plateau d'Alla au sein du bassin sédimentaire côtier.....	13
<b>Figure 6:</b> Découpage administratif du plateau d'Allada avec les cours et plans d'eau environnants ..	13
<b>Figure 7:</b> Emprunte spatial du domaine d'étude.....	14
<b>Figure 8:</b> Discrétisation en plan du domaine d'étude montrant un raffinement fin au niveau des champs de Godomey, Ouèdo et Kpinsa (droite vers la gauche) .....	15
<b>Figure 9:</b> Coupe hydrogéologique NW-SE du plateau d'Allada montrant l'aquifère du Mio-Pliocène et sa lithologie. (Extraite de Alassane 2016). ....	15
<b>Figure 10:</b> Subdivision des trois principales couches du modèles (en bleu) en onze couches .....	16
<b>Figure 11:</b> Modèle 3D montrant les trois principales couches (du haut vers le bas : terre de barre, Mio-Pliocène supérieure et Mio-Pliocène inférieure).....	17
<b>Figure 12:</b> Localisation des coupes.....	17
<b>Figure 13:</b> Coupes Nord-Sud (chiffres) et Est-Ouest (lettres) issues de la géométrie 3D construite .....	19
<b>Figure 14 :</b> Condition aux limites de type 1 (Dirichlet) imposée au Sud du domaine .....	20
<b>Figure 15 :</b> Condition aux limites de type 1 : flux nul (line rouge) et flux imposé (les points rouges sont les champs captant et les points bleus sont les prélèvements privés). ....	21
<b>Figure 16 :</b> Chronique de recharge correspondant à 5% de la pluie imposée comme condition de type Neuman. (a) recharge au Nord du domaine ; (b) recharge au Sud du domaine.....	21
<b>Figure 17 :</b> Condition aux limites de type 3 .....	22
<b>Figure 18 :</b> Perméabilité dans le domaine d'étude.....	23
<b>Figure 19 :</b> porosité de drainage dans le domaine d'étude.....	24
<b>Figure 20 :</b> Emmagasinement spécifique dans le domaine d'étude.....	24
<b>Figure 21 :</b> Elaboration du modèle de gestion avec le logiciel Feflow : Fabrice LAWSON de l'équipe AGIRES soutenu par le modélisateur suisse Yvan ROSSIER.....	25
<b>Figure 22 :</b> Système d'écoulement et carte piézométrique simulées en régime permanent de l'aquifère du Mio-Pliocène. En rouge la zone de capture du champ de Godomey .....	26
<b>Figure 23 :</b> Calibration du modèle en régime permanent sur la carte piézométrique de Achidi et al. 2012.....	27
<b>Figure 24 :</b> Calibration du modèle en régime permanent .....	27
<b>Figure 25 :</b> Billant de masse .....	28
<b>Figure 26 :</b> Evolution spatiale du rabattement de la nappe suite au pompage sur le champ de Godomey .....	28
<b>Figure 27 :</b> Calibration en régime transitoire .....	29
<b>Figure 28 :</b> Zone de capture des trois champs captant simulée en régime transitoire .....	30
<b>Figure 29 :</b> Evolution spatiale du rabattement de la nappe suite aux prélèvements prévus en 2030 ....	31

**Figure 30** : zone de capture des champs captant suite aux prélèvements prévus en 2030 ..... 32  
**Figure 31** : Evolution spatial du rabattement de la nappe suite aux prélèvements prévus en 2050 .... 33  
**Figure 32** : zone de capture des champs captant suite aux prélèvements prévus en 2050 ..... 34

## Résumé exécutif

De plus en plus nous prenons conscience de l'importance de la connaissance et de la recherche dans le domaine de la mobilisation des ressources en eau face à un environnement qui met en opposition des investissements de plus en plus importants pour approvisionner durablement les populations en eau potable et les risques de voir cette ressource s'épuiser ou voir sa qualité se détériorer.

La modélisation de l'aquifère du mio-pliocène vise à estimer la pérennité de la ressource en eau, et donc à évaluer la réaction de l'aquifère aux pressions subies comme la recharge, les prélèvements et tout ce qui peut faire varier les paramètres de la nappe, en particulier dans les contextes de forte pression humaine et du changement climatique.

Pour la réalisation de travail le programme AGIRES/INE, initialement NOEVA, a bénéficié des appuis financiers, techniques et scientifiques du programme OmiDelta et de l'IRD.

Le processus de modélisation de l'aquifère sédimentaire côtier du plateau d'Allada répond à un besoin fondamental, par la connaissance des écoulements et des conditions aux limites de cet aquifère, de répondre aux questions légitimes des décideurs et de l'Etat béninois. Dans quelle mesure cette ressource dans laquelle nous puisons plus de 100.000 m<sup>3</sup> par jour est-elle durable, et à quel horizon devons-nous nous inquiéter de la disponibilité de cette ressource. Le doublement de la population du grand Cotonou à l'horizon 2050 et le risque d'intrusion d'eau fortement minéralisée (intrusions salines) soit directement par la mer ou via les lacs au Sud Est et Ouest du plateau sont autant de signaux dont il faut tenir compte dans la gestion de cette ressource.

L'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada est un aquifère multicouche qui repose sur les formations argileuses de l'Eocène moyen et dont le toit est constitué par la terre de barre. Les conditions aux limites, c'est-à-dire les paramètres qui vont définir la géométrie et la réaction de l'aquifère, soit le contexte géologique et géomorphologique mais aussi hydrodynamique, sont définies en fonction de l'analyse du terrain.

Dans un premier temps les procédures méthodologiques sont rappelées. Ils sont suivis par l'analyse fine des différents paramètres à prendre en compte et de leur disponibilité qui permet de poser les bases de la modélisation dont retiendrons les points essentiels suivants. L'épaisseur de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada varie du simple au double du nord (45m) vers le sud (85m), la transmissivité qui contrôle les débits de la nappe varie sur l'ensemble de l'aquifère d'une décade (ou facteur de dix) soit de  $3.10^{-3}$  à  $6.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s et les valeurs les plus faibles se retrouvent au nord-ouest. Sur l'ensemble du plateau, les débits théoriques estimés vont de 20m<sup>3</sup>/h à 200m<sup>3</sup>/h. Enfin, la porosité de drainage qui qualifie quant à elle la capacité de stockage de l'aquifère varie de 5 à 12% avec également les valeurs les plus faibles au nord-ouest.

**Ainsi, le stock (ou la réserve) total d'eau de l'aquifère est d'environ 13km<sup>3</sup> (13 milliards de m<sup>3</sup>), ce qui correspond à environ 35 fois le volume du lac Nokoué.**

Cependant, il convient de préciser que ce volume correspond à une globalité de l'aquifère dont seule la partie dite « renouvelable » peut-être exploitée dans un schéma de développement durable. Les connaissances acquises ont permis de conclure que la recharge de l'aquifère du plateau d'Allada est directe et se fait par la pluie et augmente au moins d'un facteur de dix du nord au sud, soit de 10

mm/an à 200 mm/an. La rivière So à l'est, le fleuve Couffo à l'ouest et le lac Hlan via les sources au nord du plateau (vers la dépression de la Lama) sont des exutoires de l'aquifère ;

**Le volume de la recharge est estimé à 80 millions de mètre cube d'eau par an sur l'ensemble du plateau, ce qui correspond en première approximation au volume que l'on peut utiliser aujourd'hui sans mettre en péril la pérennité de l'aquifère.** Ce volume doit être mis en parallèle avec les besoins du « grand Cotonou » aux horizons de planification du Gouvernement du Bénin. Nous parlons donc ici des forages réservés aux besoins humains exploités par la SONEB mais également des zones à fort développement industriel comme la Zone Economique Spéciale de Glo-Djigbé.

Toutes ces informations ont permis de construire un modèle de gestion, capable non seulement de reproduire le fonctionnement du système, mais aussi d'effectuer des scénarios de prélèvement future (augmentation des prélèvements, mise en place de nouveaux captant et impacts sur ceux existants, possibilité d'intrusion saline, ...) pour une gestion prédictive de la ressource. Ce modèle est pour lors calibré en régime permanent et sa calibration en régime transitoire est en cours et se poursuivra. En supposant que les champs de Ouèdo et de Kpinsa soient les deux utilisés pour compenser les besoins en eau futurs, les simulations conduites en régime permanent calibré sous la base d'hypothèses de prélèvement prévu aux horizons 2030 et 2050 ont montré que l'approfondissement du niveau de l'eau qui en résulterait serait trop important (respectivement 30 à 100% de plus que l'approfondissement causé par les prélèvements actuels). Ainsi et plus particulièrement pour les prélèvements prévus en 2050, les zones de capture des champs se prolongeront jusqu'à l'océan, avec des lignes d'écoulement qui se densifient au niveau du lac Nokoué, occasionnant de ce fait une intrusion saline à partir de ces derniers. Ce même constat bien que de plus faible ampleur, est également fait pour les prélèvements prévus à l'horizons 2030. *Pour pallier à ces situations défavorables à l'alimentation du grand Cotonou, la solution serait d'installer les futurs champs captant à des distances permettant de prévenir un chevauchement des zones de capture de ces derniers avec ceux existants. Pour ce faire l'installation de nouveaux champs captant ainsi que les volumes qu'ils pourraient prélevés devraient être simulés au préalable avec le modèle de gestion afin de les installer au mieux pour une utilisation durable et optimale de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada. Toutefois, ces résultats seront actualisés avec le modèle en régime transitoire, une fois la calibration de ce dernier achevée.*

Enfin il est rappelé que cette modélisation est un outil dynamique qui devra être affiné et modifié, le cas échéant, en fonction des connaissances et de l'évolution des prélèvements.

# 1. Contexte et problématique

A l'image de plusieurs autres pays en Afrique, l'approvisionnement en eau potable des populations au Bénin est essentiellement basé sur les eaux souterraines. Sur le plateau d'Allada situé au Sud du Bénin dans le Bassin Sédimentaire Côtier (BSC), c'est un aquifère constitué de sable et d'argile datant du Mio-Pliocène qui est le plus sollicité. Plus de 100.000 m<sup>3</sup> d'eau sont mobilisés chaque jour à partir de cet aquifère pour l'approvisionnement du Grand-Cotonou, la plus grande ville du Bénin avec près de 2.000.000 d'habitants. Cet aquifère va sans doute subir davantage de pression puisqu'à l'horizon 2050, la population du grand Cotonou devrait doubler avec une concentration dans les villes. De plus, il est également envisagé un développement industriel sur le plateau d'Allada, notamment dans la zone de Glo-djigbé. Outre l'intensification prévue des prélèvements dans un futur proche, la préservation de la qualité de l'eau de cet aquifère n'est pas encore un acquis lorsqu'on sait que par le passé, son exploitation a engendré une intrusion saline dans le champ de captage de Godomey. De plus, l'impact des activités anthropiques notamment l'agriculture sur la qualité de l'eau de cet aquifère demeure à ce jour peu connu. Il devient urgent, face à ces constats, de mieux connaître cette ressource en eau souterraine pour sa meilleure gestion afin de satisfaire durablement les besoins en eau actuel et futur des populations du grand Cotonou.

Durant deux années (2017-2019), le projet NOEVA (NOuvelle approche pour l'Eau des Villes Africaines) a permis de caractériser l'aquifère du Mio-Pliocène du Plateau d'Allada permettant la définition de la géométrie et des paramètres hydrodynamiques de cet aquifère grâce à la mise en œuvre d'une méthodologie novatrice de caractérisation des aquifères combinant l'hydrogéologie et la géophysique. Dans le cadre du projet AGIRES (Action pour une Gestion Intégrée des Ressources en Eau Souterraines : 06-2019 à 05-2022), projet prioritaire de la planification Delta du programme OmiDelta 2017-2022, il est prévu de valoriser les acquis du projet NOEVA pour construire un modèle hydrogéologique de gestion de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada.

Ce rapport présente dans le détail les différentes étapes ayant conduit à la construction du modèle de gestion, de la construction du modèle conceptuel au calage en passant par les divers intrants du modèle.

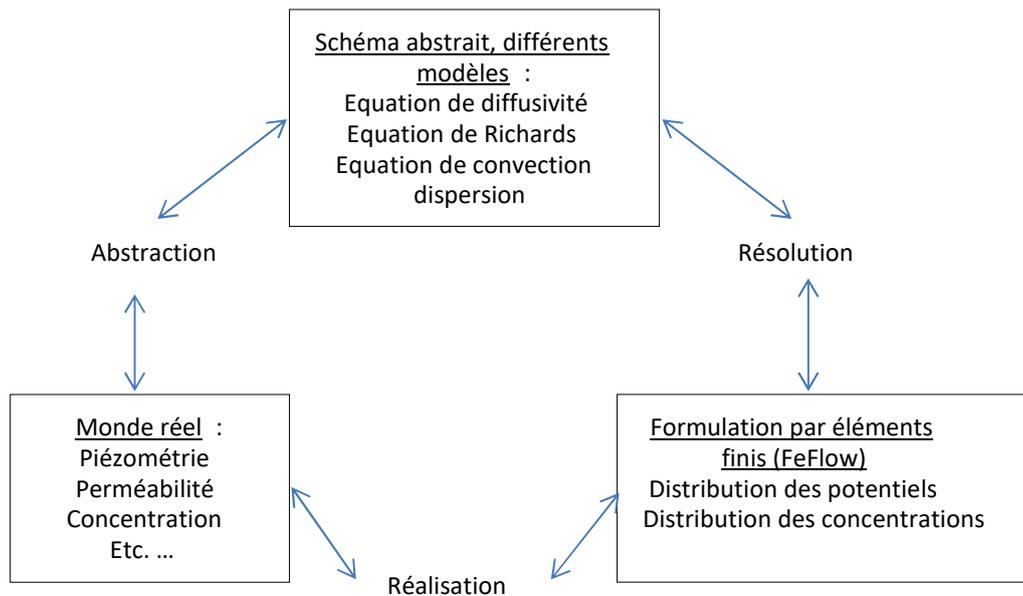
## 2. Principes et démarche de modélisation appliqués à ce projet

### 2.1. Rappel de la procédure de modélisation en hydrogéologie

La procédure de modélisation suppose un modèle conceptuel (ou un schéma abstrait) à réaliser et qui s'appuie sur une base réelle (les mesures et les grandeurs que l'on prend en considération pour quantifier un phénomène physique dans un domaine d'étude : potentiel hydraulique, concentration, perméabilité, porosité, etc...)

Dans un milieu poreux, le premier modèle conceptuel est celui de l'écoulement, premier au sens où tous les autres transferts en sont dépendants. Cet écoulement doit être représenté dans un espace que l'on définit comme un domaine d'étude. La mesure de l'écoulement s'effectue au moyen du potentiel hydraulique (H). La distribution du potentiel hydraulique dans le domaine d'étude est le résultat de la résolution d'une équation qui permet la description de ce phénomène : l'équation de diffusivité en zone saturée pure, l'équation de Richards en zone variablement saturée. La distribution permet la partition du domaine d'étude en systèmes d'écoulement qui correspondent à une zone d'exutoire reliée à une aire d'alimentation par des lignes de courant. Pour chacun des systèmes d'écoulement, il est possible d'effectuer un bilan de masse qui compare toutes les entrées à toutes les sorties d'eau dans ledit système d'écoulement. La réalisation de ce schéma abstrait suppose l'utilisation d'une technique numérique (code de calcul) appropriée. Il existe des techniques numériques à base de différences finies et d'autres à base d'éléments finis. Dans ce projet, nous avons opté pour une technique numérique à base d'éléments finis du fait du bien connu intérêt de ce dernier, dans un environnement robuste, stable et convivial (FEFLOW v.7.4).

Ce schéma abstrait et le contrôle de sa réalisation suppose d'avoir à disposition des données ou des informations qui se situent dans le monde réel. La réalisation du schéma abstrait par la méthode des éléments finis par le biais d'un logiciel suppose l'implémentation des données et des informations en provenance du monde réel. Cette procédure de modélisation est présentée, pour le cas général (pas seulement pour l'écoulement mais pour d'autres schémas abstraits tels que le transport à la figure 1. Cette phase d'implémentation constitue l'élaboration du problème. C'est cette phase d'implémentation des données existantes dans le logiciel permettant la résolution par éléments finis d'une équation pour aboutir à la distribution des potentiels hydraulique dans le domaine d'étude que l'on décrit dans ce rapport.

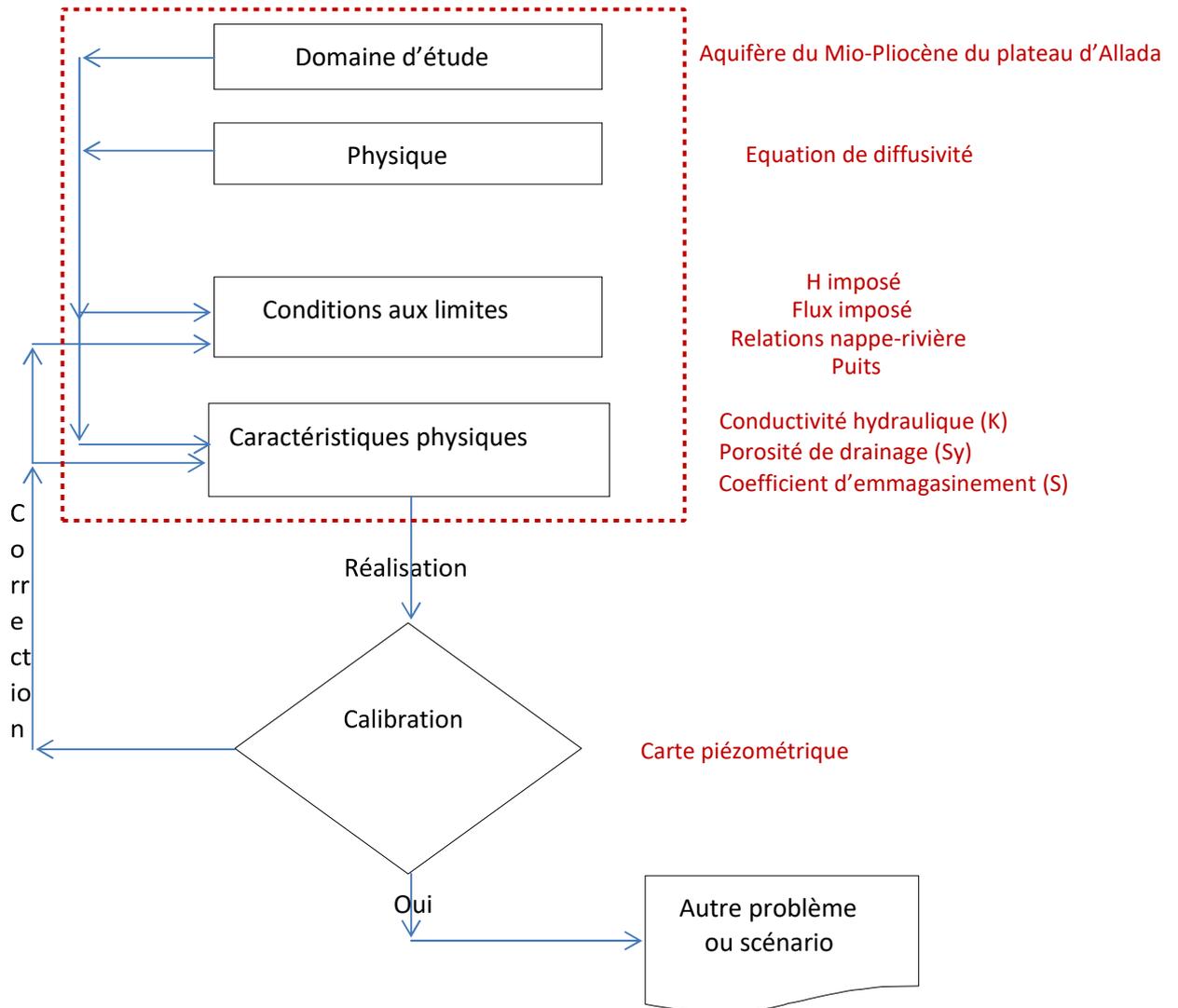


**Figure 1:** procédure de modélisation

## 2.2. Démarche de modélisation adoptée

Nous avons dans un premier temps cherché à résoudre l'écoulement dans notre domaine d'étude. Nous l'appréhenderons en trois dimensions, tout d'abord en régime permanent, en résolvant l'équation de diffusivité. Le régime permanent a permis d'avoir l'état initial de l'écoulement dans le domaine et a été utilisé comme état initial pour le régime transitoire. Il a été simulé avec le champ captant de Godomey en fonctionnement car depuis la mise en place de ce dernier (1956), un régime permanent s'est mis en place à la réalisation des nouveaux champs captant. Dans la version actuelle du modèle et pour palier au problème de temps de résolution trop long, nous ne simulons pas l'infiltration à travers la zone non saturée grâce à l'équation de Richards. Bien que le modèle soit construit de façon à pouvoir simuler le flux dans la zone non saturée, dans sa version actuelle, le flux de recharge est certes imposé à la surface du sol, mais ce flux est ensuite apporté à la surface libre de la nappe. Il en est ainsi en régime permanent qu'en régime transitoire. Le système d'écoulement est donc résolu en zone saturée en utilisant l'équation de diffusivité. En fonction des informations disponibles, qui sont issues de mesures de terrain, de rapports, de notes de synthèses, de bases de données, etc., nous avons construit un domaine d'étude et l'avons discrétisé. Nous avons ensuite attribué aux limites de ce domaine des conditions aux limites et à l'intérieur du domaine d'étude, distribué des caractéristiques physiques. Ces informations sont à implémenter dans un format adéquat, adapté au logiciel qui nous permet la résolution du problème d'écoulement par la technique des éléments finis dans Feflow dans sa version 7.4 d'Octobre 2022.

La procédure de modélisation adoptée peut être schématisé comme à la figure 2.



**Figure 2:** Démarche de modélisation adoptée dans la construction du modèle du plateau d'Allada

### 3. Activités contributives du modèle

- **Etats des lieux des connaissances et collectes des données piézométriques et pluviométriques**

Les connaissances sur la géométrie et les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ayant été obtenus dans le cadre du projet NOEVA, l'état des lieux des connaissances a consisté essentiellement à faire un point des connaissances sur les échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Des séances de travail sur l'hydrogéochimie de l'aquifère avec le Professeur ALASSANE (Enseignant –

Chercheur Hydrogéologue à l'INE) ont permis, sur la base de ses travaux de thèse, de cerner certains échanges notamment l'alimentation de lac Hlan par les eaux souterraines de l'aquifère.

Afin d'améliorer la connaissance sur l'évolution des niveaux d'eau souterraine et de la pluviométrie, 7 tournées sur 14 sites de la DGEau sur le plateau d'Allada (14 piézomètres et 5 pluviomètres) ont été réalisées dans le cadre du projet AGIRES. Ces données acquises ont contribué en partie à la compréhension du fonctionnement de l'aquifère et au calage du modèle.

- **Caractérisation de la recharge (renouvellement de l'eau souterraine et son interaction avec l'eau de surface)**

L'estimation de la recharge a été faite en se basant essentiellement sur les analyses, chimiques, isotopiques et de gaz rares. Près de 200 échantillons d'eau (souterraine, pluie et surface sur 5 saisons – sèches et pluvieuses) ont été prélevés puis analysés (majeurs, deutérium, oxygène 18 et tritium, CFC – SF6).

Les travaux sur la caractérisation de la recharge sont présentés dans un rapport détaillé rédigé à cet effet dans le cadre du projet AGIRES.

- **Densification des mesures géophysiques**

En plus des 67 sondages (24 RMP et 43 TDEM) réalisés dans le cadre du projet NOEVA pour la caractérisation de la géométrie de l'aquifère et la détermination des caractéristiques physiques, 5 sondages RMP supplémentaires ont été réalisés dans le projet AGIRES. Ces données mis ensemble ont permis une bonne couverture spatiale de la zone d'étude pour une meilleure caractérisation du domaine à modéliser.

- **Caractérisation hydrogéologique de l'aquifère**

Afin de posséder des informations de références sur l'aquifère il a été prévu de réaliser 3 forages (Nord, centre et sud) avec des essais de pompages courtes et longues durées sur le plateau d'Allada. 2 forages suivis de pompages ont été réalisés dans le cadre du projet NOEVA et le troisième a été réalisé dans le cadre d'AGIRES. Les données de ces trois forages ainsi que ceux de plus de 430 autres forages existants et 33 piézomètres ont été utilisés pour la construction du modèle.

## 4. Construction du modèle de gestion

### 4.1. Intrants du modèle

Les intrants pour la construction d'un modèle de gestion sont notamment la géométrie de l'aquifère, les caractéristiques hydrodynamiques et les conditions aux limites.

**La géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques** : ces informations ont été obtenus grâce à la géophysique au cours du projet NOEVA. Le forage et l'essai de pompage réalisés dans AGIRES qui vient compléter les deux premiers de NOEVA, permettent d'obtenir des informations hydrogéologiques considérées comme des références. On sait donc avant la réalisation du modèle que :

- L'épaisseur de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada varie du simple au double du nord (45m) vers le sud (85m) ;
- La transmissivité qui contrôle la productivité ou encore les débits de l'aquifère varie sur l'ensemble de l'aquifère d'une décade ( $3.10^{-3}$  à  $6.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s) avec les valeurs les plus faibles qu'on retrouve au nord-ouest. Soit des débits théoriques qui vont de 20m<sup>3</sup>/h à 200m<sup>3</sup>/h sur l'ensemble du plateau ;
- la porosité de drainage qui contrôle quant à elle la capacité de stockage de l'aquifère varie de 5 à 12% avec également les valeurs les plus faibles qu'on retrouvent au nord-ouest. Le stock (réserve) total d'eau de l'aquifère est d'environ 13km<sup>3</sup> (13 milliards de m<sup>3</sup>), ce qui correspond à environ 35 fois le volume du lac Nokoué.

La connaissance du stock seul ne suffit pas pour planifier une exploitation durable de la ressource qui doit surtout être basée sur le renouvellement du stock (la recharge). Dans le cadre du projet AGIRES, des travaux ont donc été menés non seulement dans le but de quantifier le renouvellement de l'aquifère et de le comparer aux prélèvements qui sont effectués, mais aussi afin de l'introduire comme une condition aux limites dans le modèle de gestion.

**Les conditions aux limites** : les échanges avec le Professeur Alassane et des analyses d'eau ont permis d'améliorer les connaissances des conditions aux limites. Les travaux de thèse du Professeur Alassane ont permis de savoir que l'eau souterraine alimente à des moments donnés (en saison sèche notamment) la rivière Sô. Les analyses chimiques, isotopiques et de gaz rares ainsi que l'analyse des chroniques de pluie réalisées dans le projet AGIRES ont précisé ces informations et ont abouti à des résultats concrets :

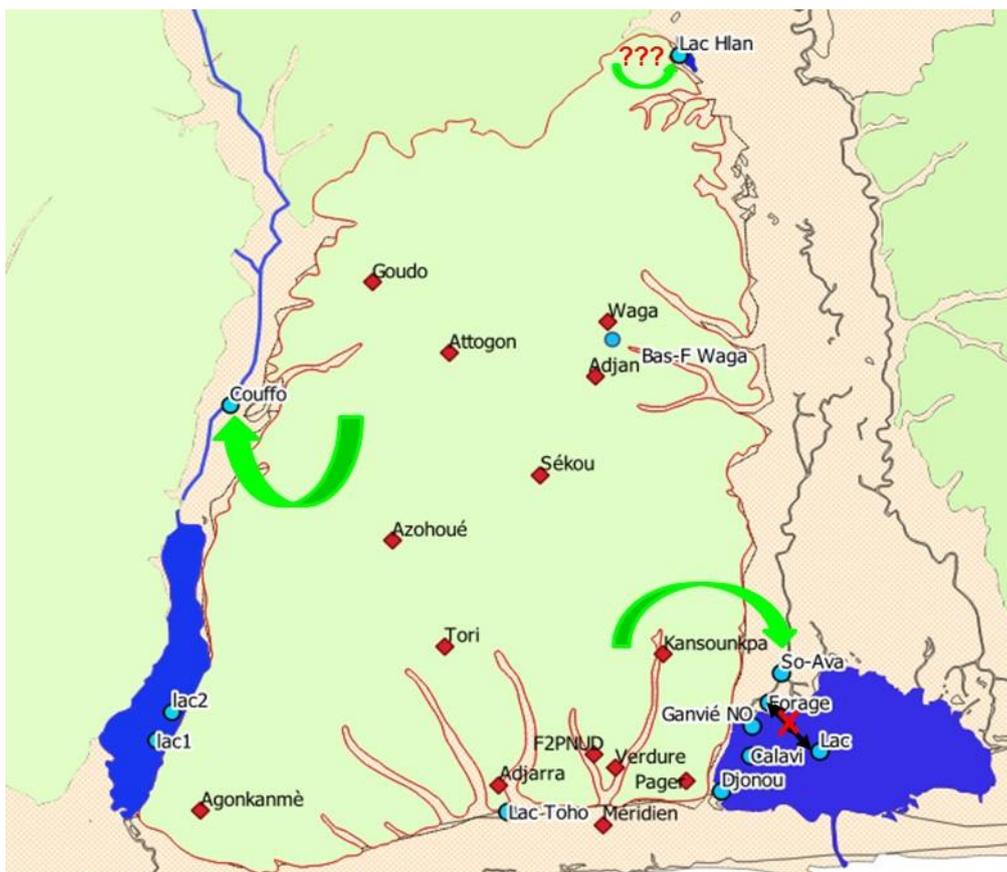
- la recharge de l'aquifère du plateau d'Allada est directe et se fait par la pluie ;
- la recharge augmente au moins d'une décade du nord au sud, soit de 10 mm/an à 200 mm/an. Cela se justifie notamment par l'épaisseur de la zone non saturée qui est plus épaisse au nord et permet donc une reprise par évapotranspiration plus importante ;
- le volume de recharge est d'environ 80 millions de mètre cube d'eau par an sur l'ensemble du plateau ;

- la rivière So à l'est, le fleuve Couffo à l'ouest et le lac Hlan via les sources au nord du plateau (vers la dépression de la Lama) sont des exutoires de l'aquifère ;
- Il n'y a aucun échange entre le lac Ahémé situé au sud-ouest du plateau et l'aquifère.



**Figure 3:** Prélèvements des eaux réalisées par Valerie KOTCHONI, Christian ALLE et des étudiants. De la droite vers la gauche : dans le lac Ahémé, au niveau de la source, à la station pluviométrique de Niaouli.

La figure ci-dessous résume schématiquement les différents échanges qui existent entre l'aquifère et son environnement. **Un rapport scientifique détaillé est dédié aux travaux réalisés sur les interactions eaux souterraine – eau de surface et sur la caractérisation de la recharge.**



**Figure 4:** Esquisse du modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada. Les flèches vertes indiquent les interactions entre les eaux souterraines et de surface ; la croix rouge montre une déconnexion entre les eaux souterraines et de surface. Les interrogations indiquent les résultats à approfondir

## 4.2. Domaine d'étude

### 4.2.1. Délimitation du domaine d'étude

Le plateau d'Allada, principale zone d'étude du projet AGIRES est le plus grand des plateaux du BSC avec une superficie d'environ 2100 km<sup>2</sup>. Les figures 5 et 6 présentent le plateau d'Allada dans l'ensemble du BSC avec les cours et plans d'eau le jouxtant.

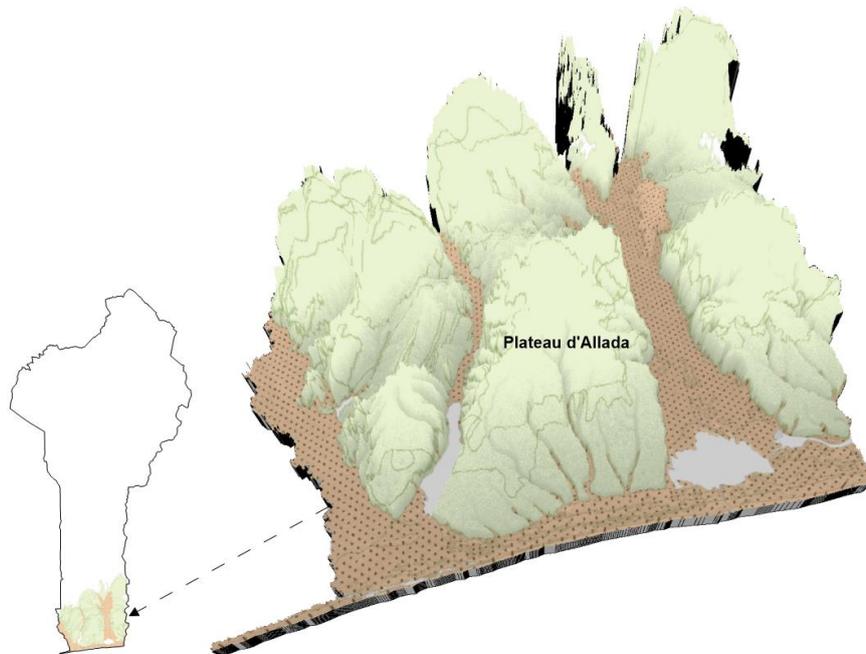


Figure 5: Situation et morphologie du plateau d'Allada au sein du bassin sédimentaire côtier

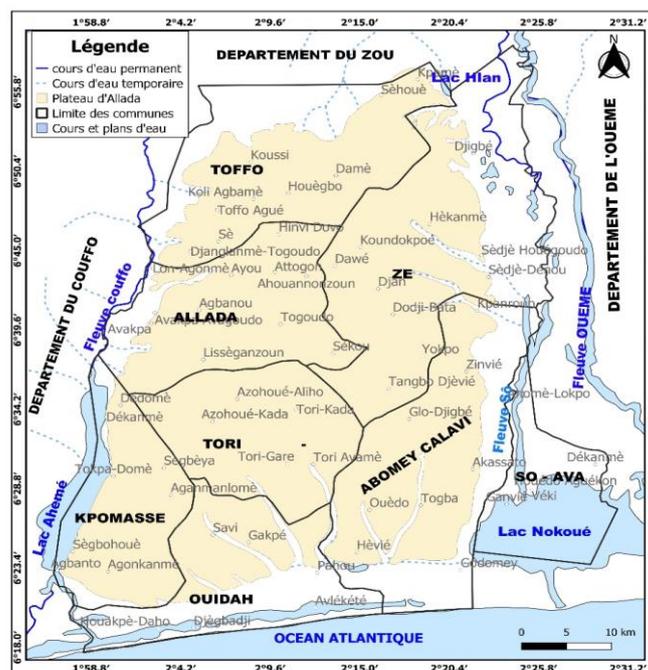


Figure 6: Découpage administratif du plateau d'Allada avec les cours et plans d'eau environnants

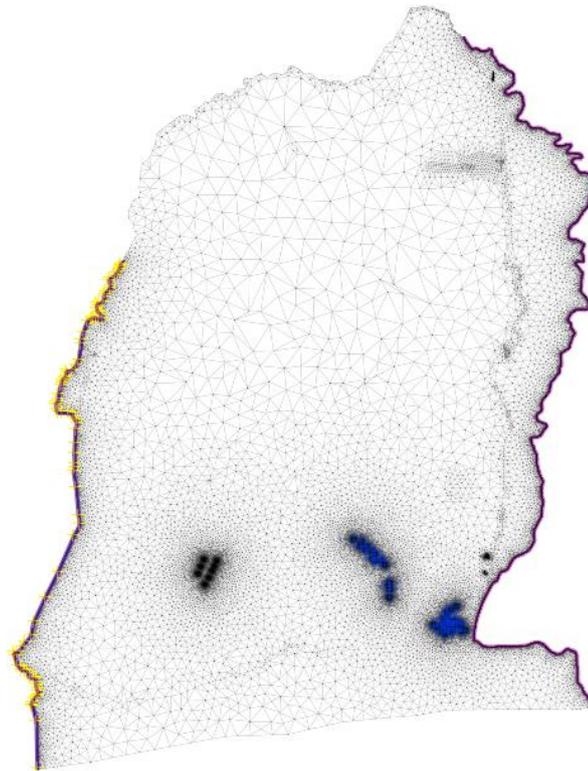
Comme illustré par les figures 5 et 6, le plateau d'Allada est une unité hydro-géomorphologique à part entière, limité au Nord par la dépression de la Lama à hauteur de laquelle se trouve une ligne de partage des eaux souterraines. Le plateau d'Allada est en contact au Sud avec les formations de plaine côtière datant du quaternaire et est bordé à l'Est tout comme à l'Ouest par des cours d'eau situés dans des alluvions sablo-argileux datant également du quaternaire. Le domaine d'étude se résume donc à l'emprise spatiale du plateau d'Allada, étendu à l'Est jusqu'à la rivière Sô et au lac Nokoué et à l'Ouest au fleuve Couffo et à lac Ahémé comme illustré à la figure 7.



*Figure 7: Emprunte spatiale du domaine d'étude*

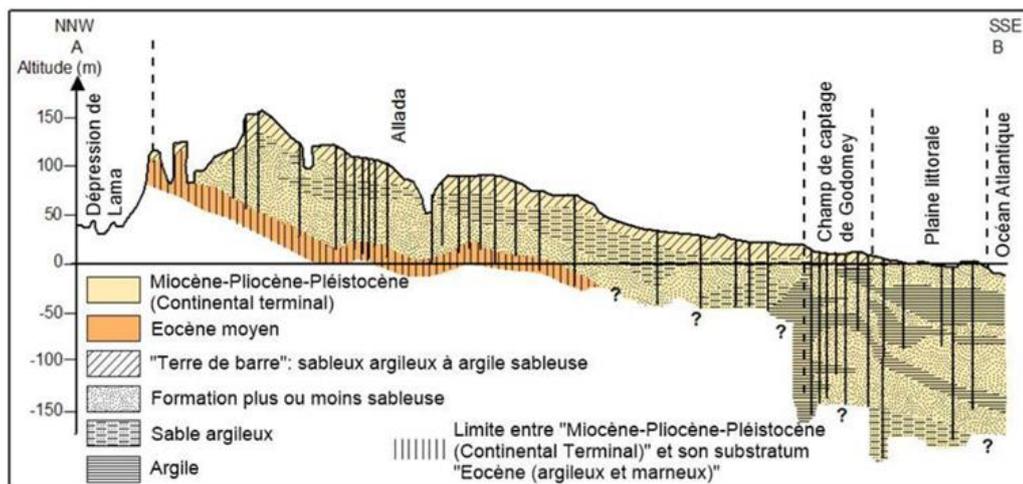
#### **4.2.2. Discrétisation spatiale**

Afin de réaliser un modèle qui représente au mieux la réalité mais qui tourne sur une durée raisonnable, le domaine d'étude a été discrétisé à 1 200 00 nœuds, avec un raffinement au niveau des champs captants pour bien reproduire l'écoulement à leur niveau. La figure 8 montre le domaine d'étude et sa discrétisation.



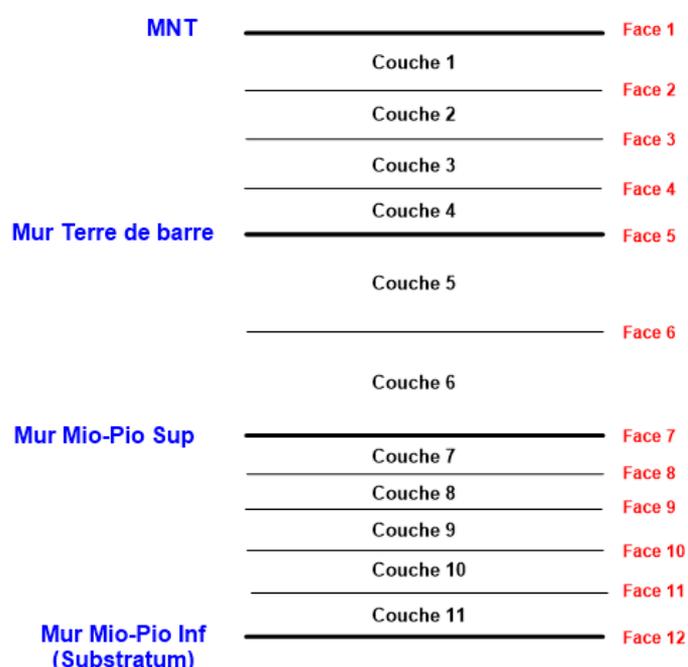
**Figure 8:** Discrétisation en plan du domaine d'étude montrant un raffinement fin au niveau des champs de Godomey, Ouèdo et Kpinsa (droite vers la gauche)

L'aquifère du Mio-Pliocène est décrit comme un aquifère multicouche qui repose sur les formations argileuses de l'Eocène moyen et dont le toit est constitué par la terre de barre. La multitude de forage et de piézomètre qui capte cet aquifère a révélée l'existence en son sein de formation sableuse et argileuse (Figure 9) indiquant ainsi une hétérogénéité spatiale des propriétés hydrogéologiques de l'aquifère.



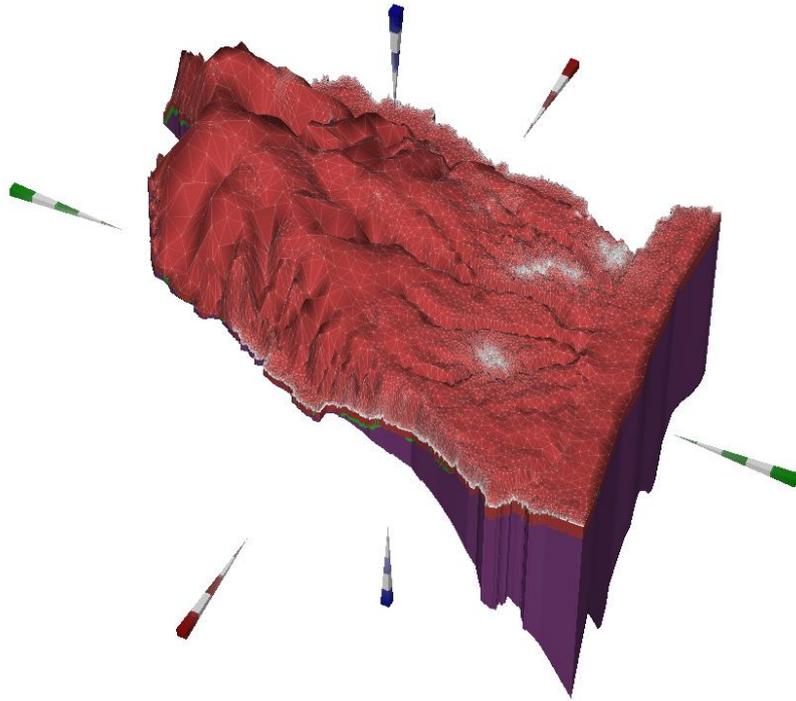
**Figure 9:** Coupe hydrogéologique NW-SE du plateau d'Allada montrant l'aquifère du Mio-Pliocène et sa lithologie. (Extraite de Alassane 2016).

Sur la base des informations géologiques collectées et suite à l'exploitation de 438 logs de forage, le modèle a été subdivisé en profondeur en 11 couches (Figure 10). Les 4 premières couches appartiennent à la formation de la terre de barre qui a été subdivisée ainsi dans la perspective de conduire au mieux les flux entrants et de simuler la recharge à travers la zone non saturée. Le Mio-pliocène a été scindé en deux avec une partie supérieure et l'autre inférieure afin de pouvoir intégrer au modèle les variations en profondeur des propriétés hydrogéologiques telles suggérées par les informations géologiques collectées. Les subdivisions au sein des parties supérieures et inférieures du Mio-Pliocène ont été effectuées pour d'une part faciliter les calculs numériques et d'autre part pour positionner précisément les côtes des crépines des forages captant le Mio-Pliocène.



**Figure 10:** Subdivision des trois principales couches du modèle (en bleu) en onze couches

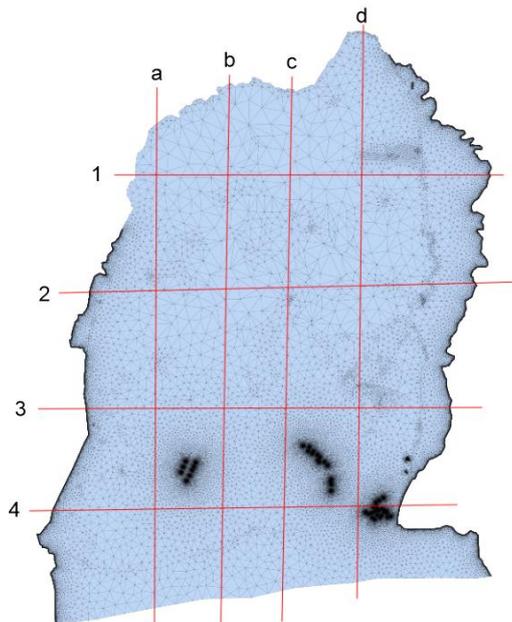
La géométrie du modèle ainsi construit est montrée en 3D à la figure 11



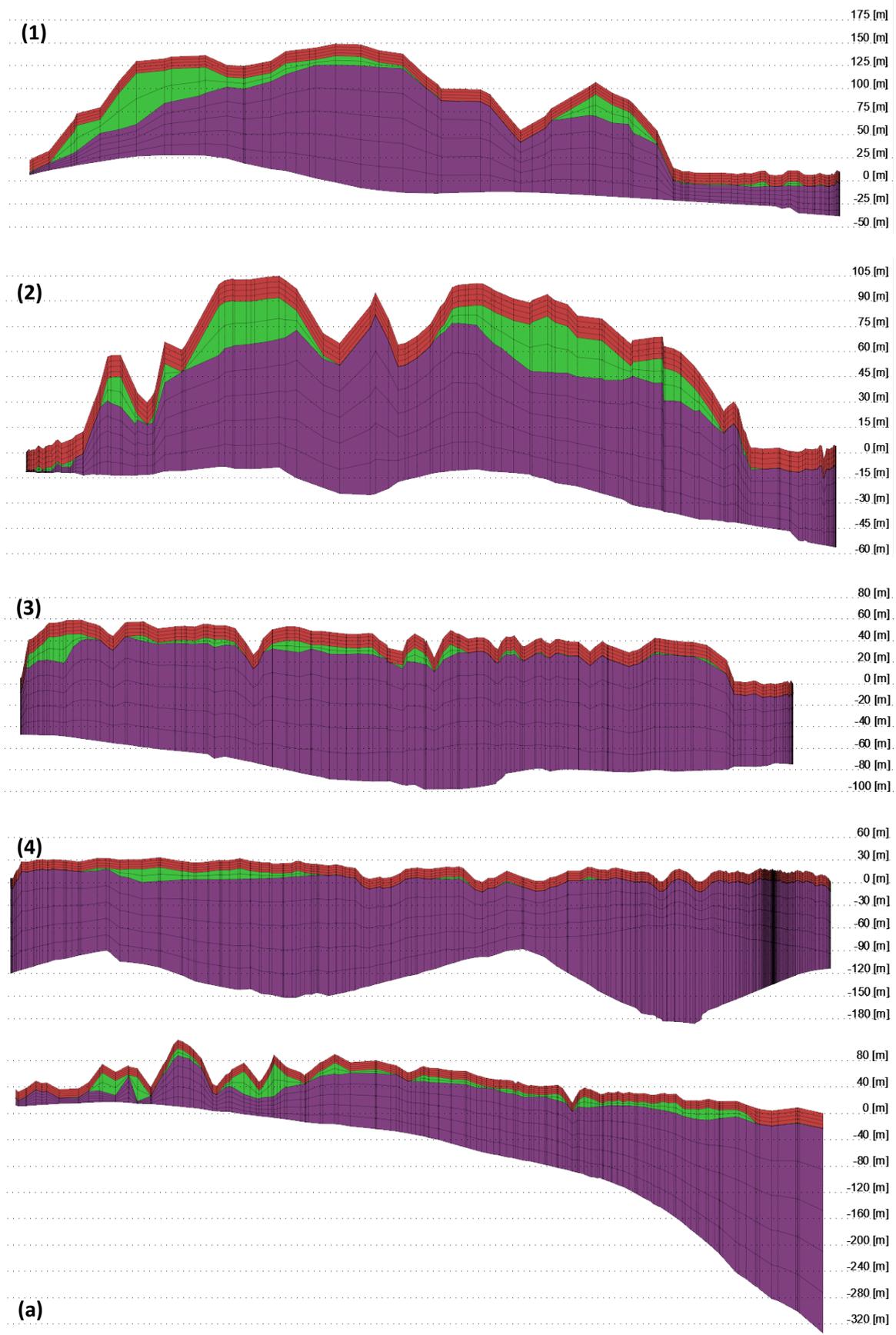
**Figure 11:** Modèle 3D montrant les trois principales couches (du haut vers le bas : terre de barre, Mio-Pliocène supérieure et Mio-Pliocène inférieure)

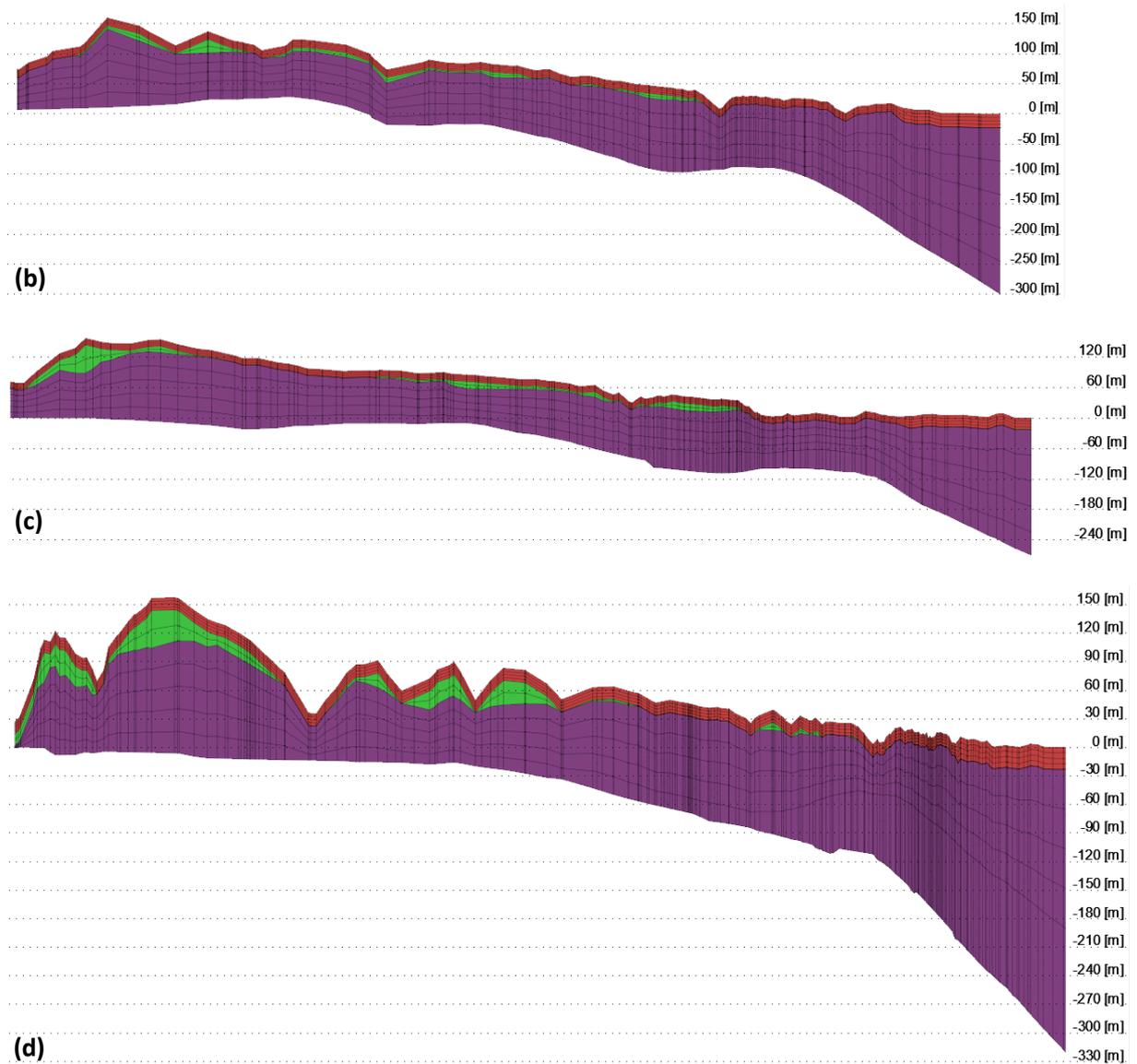
#### 4.2.3. Coupes géologiques

A partir du modèle 3D, plusieurs coupes ont été réalisées pour juger de la conformité de la géométrie avec les connaissances antérieures du milieu comme par exemple l'épaississement de l'aquifère du Mio-Pliocène s'agrandie à mesure qu'on va vers le Sud. Ces coupes sont présentées sur les figures 12 et 13



**Figure 12:** Localisation des coupes





*Figure 13: Coupes Nord-Sud (chiffres) et Est-Ouest (lettres) issues de la géométrie 3D construite*

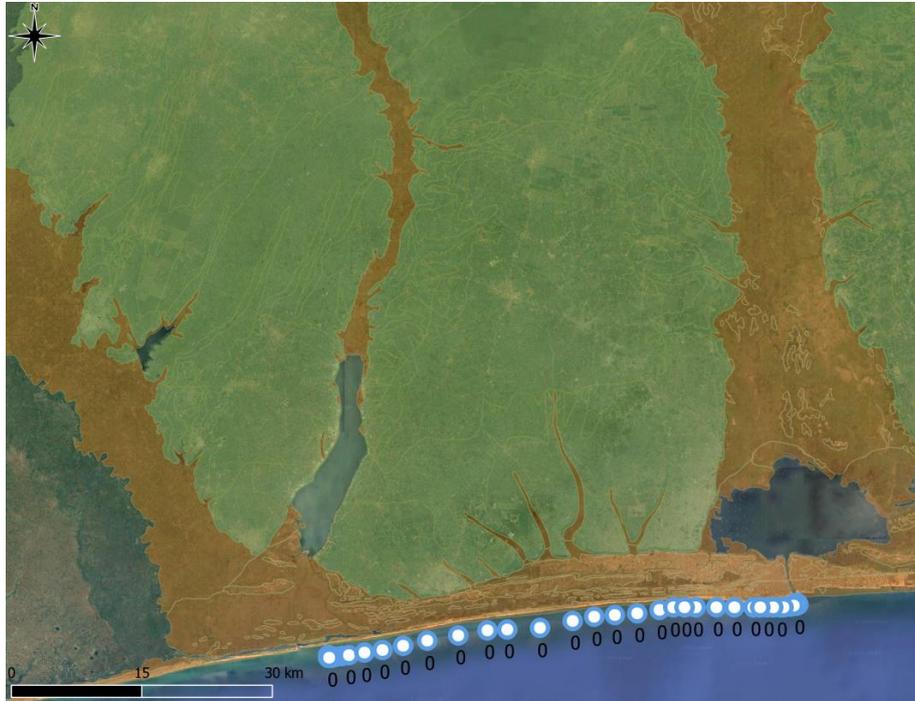
### 4.3. Conditions aux limites

Au vu de la figure 2 qui considère la démarche de modélisation, dès lors que le domaine d'étude est défini et la physique connue, alors il faut attribuer des caractéristiques et des conditions aux limites. La physique que nous prenons en considération est celle de la diffusivité qui permet de décrire l'écoulement en zone saturée.

Les conditions aux limites du modèle ont été définie sur la base des résultats des travaux hydrogéochimiques effectués dans le cadre du projet AGIRES (figure 3) et de l'analyse de la géomorphologie du plateau. Trois types de conditions aux limites ont ainsi été définies et intégrée au modèle.

#### 4.3.1. Conditions à la limite Sud

Le Sud du domaine étant en contact avec la mer, une charge de 0 m a été imposée sur les faces 5 à 12 du modèle (figure 14).



*Figure 14 : Condition aux limites de type 1 (Dirichlet) imposée au Sud du domaine*

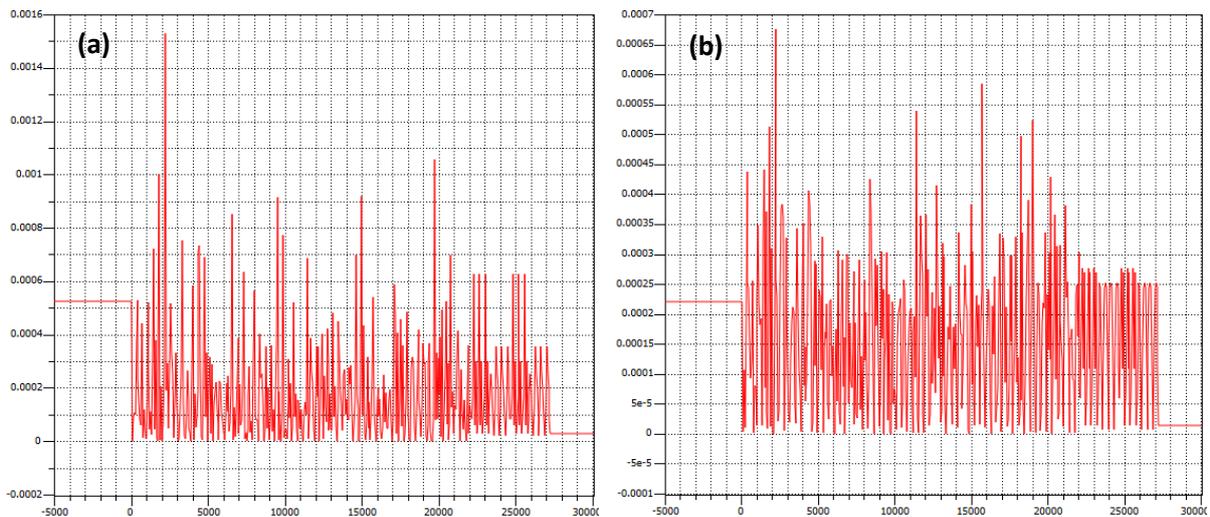
#### 4.3.2. Conditions à la limite Nord et à l'intérieur du modèle

Le flux nul est une condition de type Neuman qui s'applique sur une ligne en bordure de domaine d'étude. Du fait de la présence d'une ligne de partage des eaux au Nord du plateau, une condition de flux nul y a été imposée (Figure 15). Les pompages au niveau des champs captant (Godomey, Ouèdo et Kpinsa) ainsi que les prélèvements dans 418 forages privés font également office de condition de flux imposé (Figure 15).

La recharge de l'aquifère a également été imposée comme une condition de flux entrant, donc de type Neuman. En régime permanent, une recharge de 40 mm équivalent à 5% de la pluie moyenne annuelle sur les 60 dernières années sur le domaine d'étude a été imposée. En régime transitoire, deux chroniques de recharge dont une pour la zone Sud du modèle et l'autre pour la zone Nord ont été imposées. Le pourcentage de pluie auquel correspond la recharge a été testé au cours de la calibration en régime transitoire.



**Figure 15 :** Condition aux limites de type 1 : flux nul (line rouge) et flux imposé (les points rouges sont les champs captant et les points bleus sont les prélèvements privés).



**Figure 16 :** Chronique de recharge correspondant à 5% de la pluie imposée comme condition de type Neuman. (a) recharge au Nord du domaine ; (b) recharge au Sud du domaine.

#### 4.3.3. Conditions aux limites des plan d'eau : relation nappe-rivière

Les conditions de type Cauchy prennent en considération les relations qui existent entre l'aquifère et les cours d'eau ; c'est une condition de colmatage. Il n'y a pas continuité hydraulique entre un cours d'eau et la surface libre de l'aquifère du fait du colmatage qui existe à la base du cours d'eau ; c'est ce qu'exprime cette condition. Elle s'applique au niveau du fleuve Couffo, du lac Ahémé, du lac Nokoué, de la rivière Sô et de l'océan (Figure 17). Elle s'exprime par l'imposition d'un niveau d'eau dans chaque

cours d'eau, variable dans l'espace, évoluant de l'amont vers l'aval et par un coefficient de colmatage qui n'est autre que le rapport de la perméabilité de la couche colmatée sur son épaisseur. Plus ce coefficient est faible, plus la rivière est colmatée. Sa valeur la plus élevée correspond au coefficient de perméabilité de l'encaissant et les valeurs les plus faibles peuvent correspondre à un milieu argileux. Dans le premier cas, il y aurait continuité hydraulique entre la rivière et la nappe ; dans le second cas les flux entrant ou sortant vers ou hors de la rivière seraient quasi nuls. Ce coefficient peut évoluer tout le long d'un cours d'eau. Malheureusement nous ne le connaissons pas a priori ; ce n'est qu'à l'issue de la procédure de calibration que ces coefficients peuvent être reconnus. Aussi, dans ce premier modèle, le coefficient de colmatage est de  $5E-5$  m/s, correspondant à 4% de la perméabilité de l'encaissant.



*Figure 17 : Condition aux limites de type 3*

#### **4.4. Caractéristiques physiques**

Dans une suite logique du processus de modélisation, la définition des conditions aux limites à l'interface du domaine d'étude est suivie de l'insertion des caractéristiques physiques à l'intérieur du domaine d'étude en fonction, en particulier, de la variation lithologique.

Travaillant d'abord en régime permanent, les caractéristiques physiques se résument principalement à la conductivité hydraulique. Les paramètres de stockage (porosité de drainage et coefficient d'emménagement) ont par la suite été insérés pour le régime transitoire.

#### 4.4.1. Champ de perméabilité

A partir des valeurs de perméabilité estimées sur le plateau d'Allada dans le cadre du projet NOEVA, un champ de perméabilité a été généré en tout point du domaine d'étude (Figure 18). La méthode d'interpolation utilisée est celle de l'inverse distance appliquée à 29 valeurs de perméabilité obtenues à partir de mesure hydrogéophysiques.

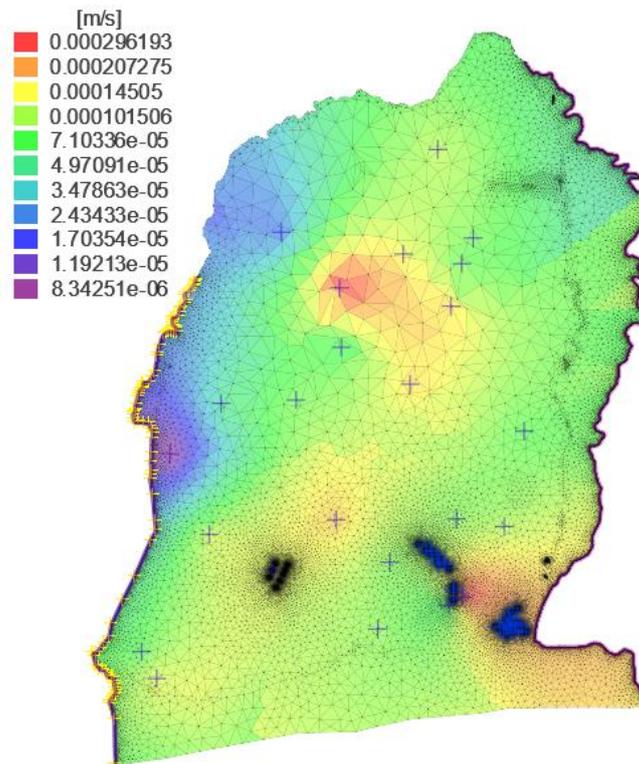
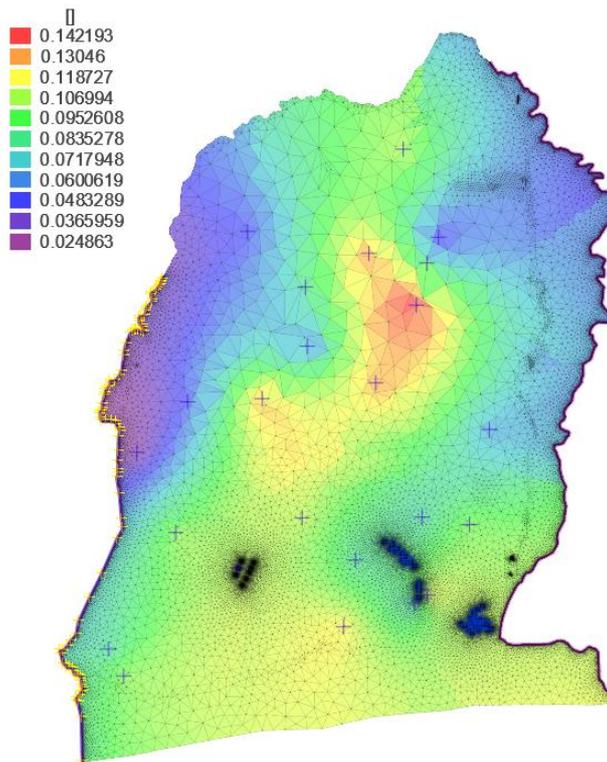


Figure 18 : Perméabilité dans le domaine d'étude

#### 4.4.2. Champ de porosité de drainage

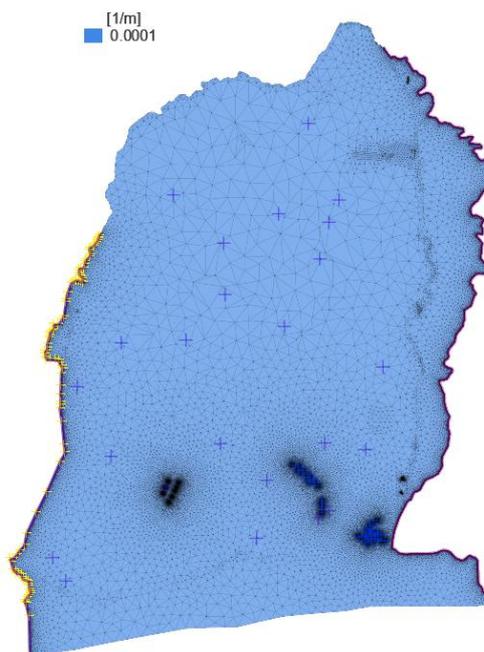
A partir des valeurs de porosité de drainage obtenues sur le plateau d'Allada dans le cadre du projet NOEVA, un champ de porosité de drainage a été généré en tout point du domaine d'étude (Figure 19). La méthode d'interpolation utilisée est celle de l'inverse distance appliquée à 29 valeurs de porosité de drainage obtenues à partir de mesure hydrogéophysiques.



**Figure 19** : porosité de drainage dans le domaine d'étude

#### 4.4.3. Champ de coefficient d'emmagasinement

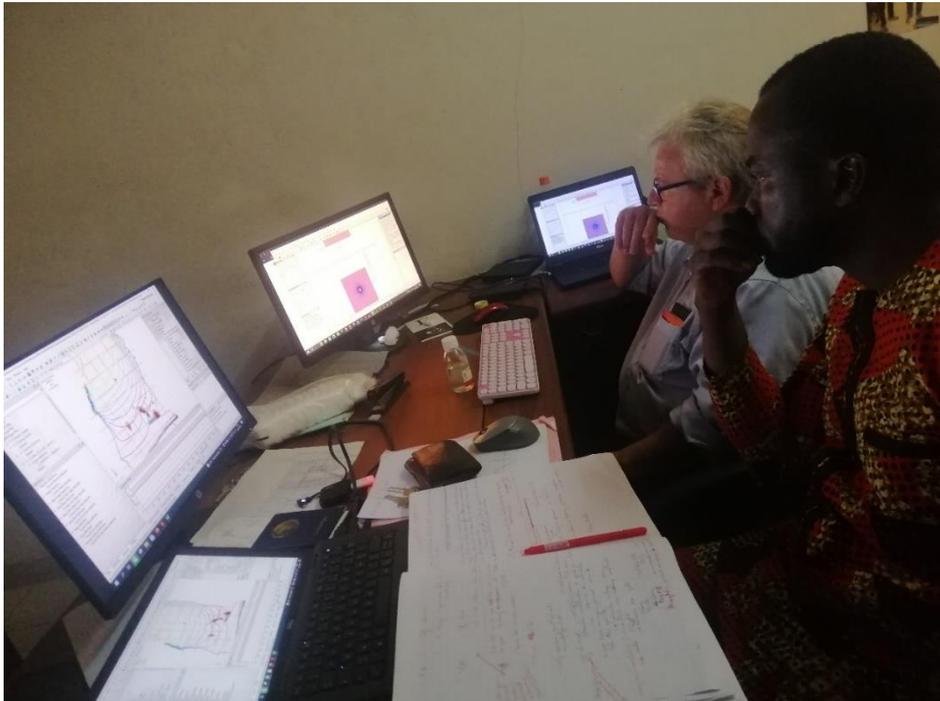
Le champ de coefficient d'emmagasinement utilisé dans le modèle dépend de l'épaisseur de la couche concernée. C'est l'emmagasinement spécifique maintenu uniforme dans le modèle à une valeur de  $1E-4$  (figure 20).



**Figure 20** : Emmagasinement spécifique dans le domaine d'étude

## 5. Simulation

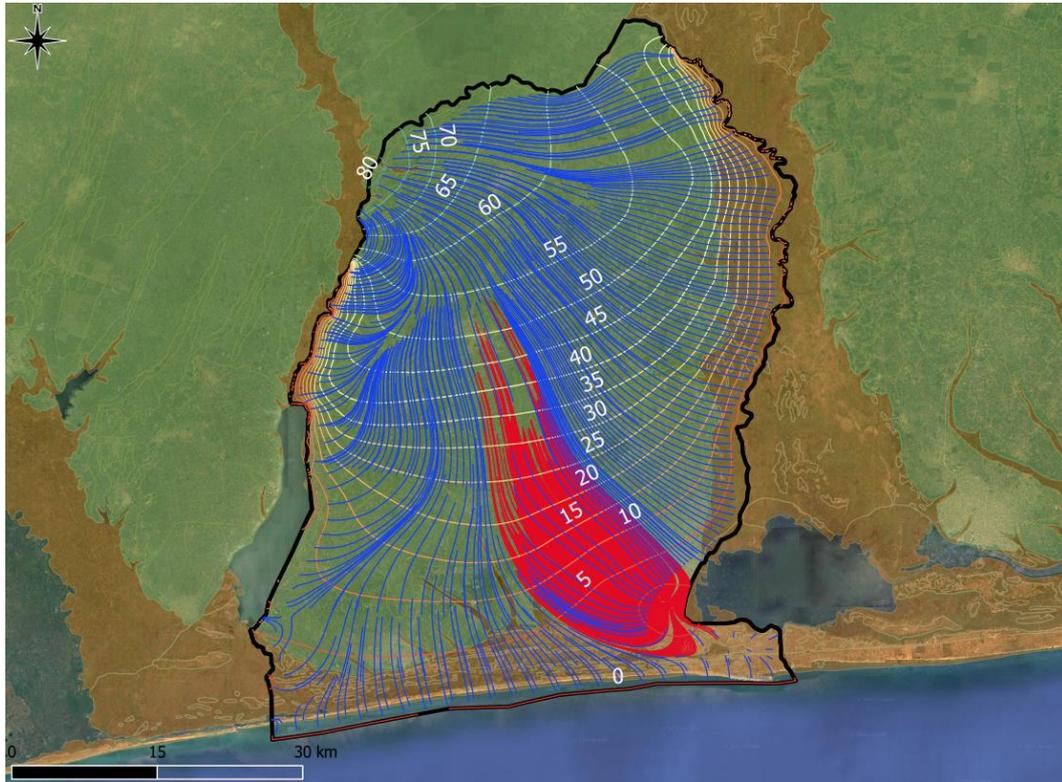
Après la discrétisation du domaine, l'ajout des conditions aux limites et la l'insertion des paramètres physiques, l'étape suivante est celle de la résolution du système d'écoulement en fonction de la physique précédemment choisie, ici celle de la diffusivité. Le logiciel Feflow v7.4 fonctionnant à base des éléments finis a été utilisée sous la supervision d'experts en modélisation (Figure 21) pour simuler dans un premier temps l'état permanent du système d'écoulement de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada qui a été comparé à la piézométrie telle que connue aujourd'hui. Dans un second temps, cet état permanent a servi de solution initiale pour la simulation en régime transitoire à partir duquel des scénarios de prélèvement future seront testés.



**Figure 21** : Elaboration du modèle de gestion avec le logiciel Feflow : Fabrice LAWSON de l'équipe AGIRES soutenu par le modélisateur suisse Yvan ROSSIER

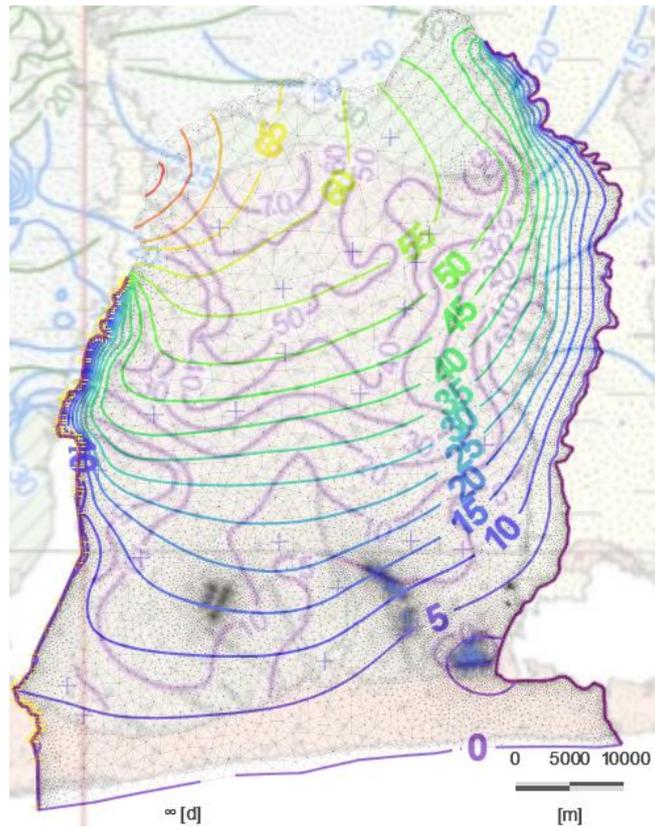
## 5.1. Régime permanent

La figure 22 présente le système d'écoulement simulé de l'aquifère du Mio-Pliocène. Il décrit un écoulement générale Nord-Sud vers l'exutoire qui est l'océan et un écoulement de l'Ouest vers l'Est au Nord du domaine. La zone de capture du champ de Godomey montre que ce dernier prélève de l'eau au niveau du lac Nokoué, mais pas au niveau de la mer.



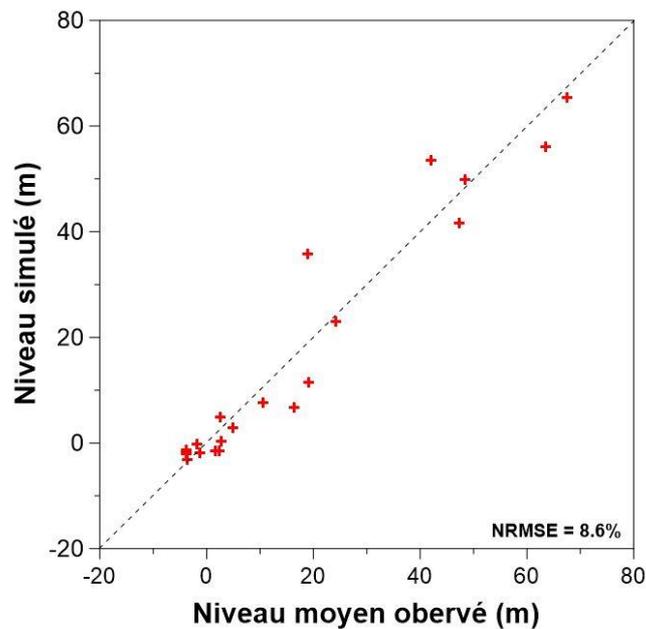
**Figure 22 :** *Système d'écoulement et carte piézométrique simulées en régime permanent de l'aquifère du Mio-Pliocène. En rouge la zone de capture du champ de Godomey*

En comparant cette carte piézométrique simulée à celle réalisée par Achidi et al. (2012), on remarque que la piézométrie est globalement bien reproduite et que l'écoulement Nord-Sud bien décrite par la piézométrie simulée (figure 23). Toutefois, les apports de la nappe aux plans d'eau clairement mis en évidence par la piézométrie ne sont pas mis en exergue par la carte piézométrique de référence. Cela provient probablement du fait de l'absence de données piézométriques observées au niveau du lit des cours qui auraient permis à la carte de référence de ressortir les échanges nappes-rivières comme le fait la carte piézométrique simulée.



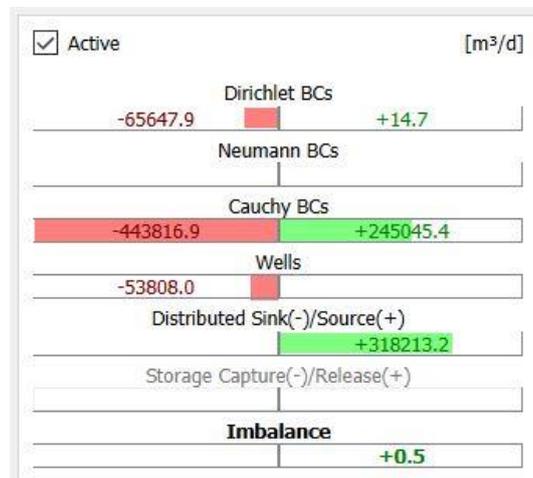
**Figure 23 :** Calibration du modèle en régime permanent sur la carte piézométrique de Achidi et al. 2012

Le niveau de calibration du modèle en régime permanent peut-être investiguer à partir de la figure 24. On remarque que les niveaux simulés représentent bien les niveaux moyens observés dans chacun des piézomètres, avec une NRMSE de 8.5%.



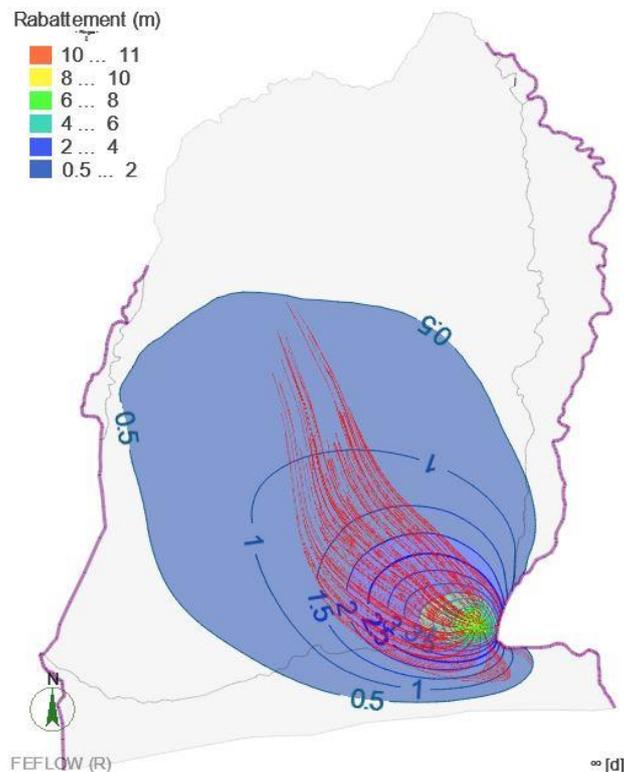
**Figure 24 :** Calibration du modèle en régime permanent

Le bilan de masse illustré à la figure 25 montre également que le régime est bien équilibré avec un écart de moins de 1m<sup>3</sup>/jour entre les entrées et les sorties. 53808m<sup>3</sup> d'eau sont prélevés journalièrement par le pompage à Godomey. Toutefois, la principale sortie d'eau du modèle se fait au travers des apports de la nappe aux cours d'eau et la principale source d'entrée d'eau dans le modèle est la recharge.



**Figure 25** : Billant de masse

Malgré le pompage du champ de Godomey, ce régime est considéré comme permanent car depuis la mise en place de ce champ (1956) un état d'équilibre entre l'état initial et l'impact de ce pompage s'est sans doute déjà mis en place. Toutefois, comparé à l'état initial (sans pompage), le champ de Godomey à lui seul aurait engendré un rabattement maximal de 11m (figure 26)



**Figure 26** : Evolution spatiale du rabattement de la nappe suite au pompage sur le champ de Godomey

## 5.2. Régime transitoire

Au cours de la simulation en régime transitoire, les pompages des champs de Calavi et de Ouédo ont été intégrés au modèle aux dates correspondants respectivement aux périodes de mise en route des pompages dans la réalité. La calibration a essentiellement consisté à tester plusieurs scénarios de recharge dans le but de reproduire les chroniques piézométriques observées (Figure 27). On remarque globalement en comparant les niveaux simulés à ceux observés que les dynamiques de l'évolution des niveaux observés sont assez bien reproduits et que subsiste des différences de charge de l'ordre de quelques mètres à une dizaine de mètres entre les charges observées et celles simulées. Ces différences de charge seront corrigées par des ajustements de la perméabilité pendant le processus de calibration qui doit être poursuivi.

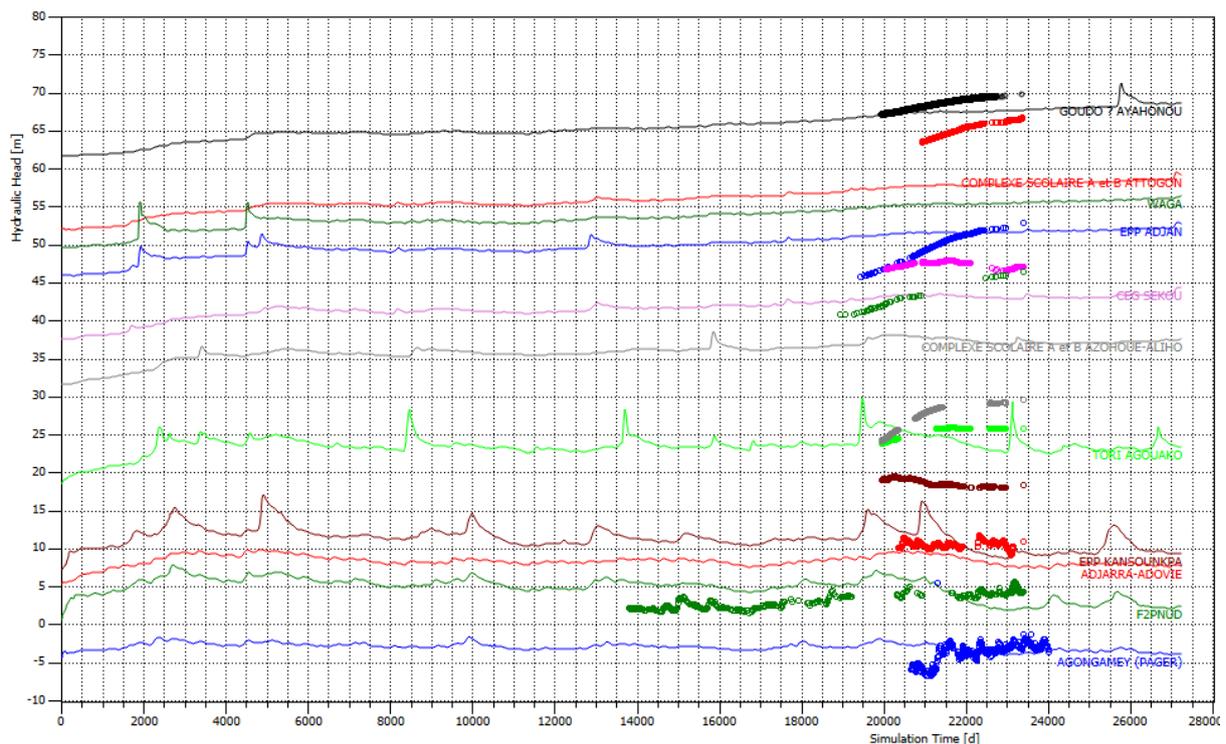
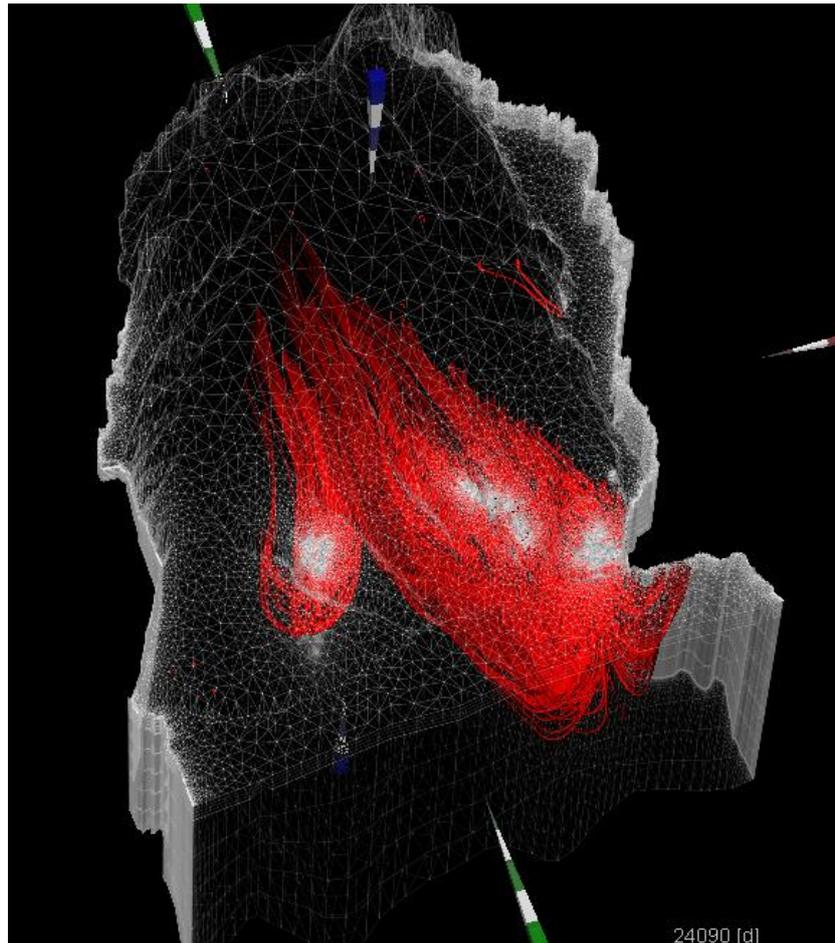


Figure 27 : Calibration en régime transitoire

A ce stade de la calibration en régime transitoire, il est possible d'investiguer les zones de captures des champs captant. Une première simulation de la zone de capture des deux champs captant en exploitation et du troisième en cours de réalisation a montré que les zones de capture des trois champs se côtoient, surtout celles des champs de Godomey et de Ouédo (figure 28). Ceci montre que même si ces champs sont distants de plusieurs à plus d'une dizaine de kilomètres, les prélèvements dans l'un influent sur l'autre, surtout au niveau des deux premiers réalisés (Godomey et Ouédo). Les zones de captures montrent également que l'eau prélevée par les champs captant provient essentiellement de la partie septentrionale du plateau d'Allada. Ceci suggère que les activités humaines notamment l'utilisation des engrais chimiques pour l'agriculture soient réglementé dans ces régions du plateau pour préserver la qualité de l'eau prélevée au niveau des champs captant.



**Figure 28** : Zone de capture des trois champs captant simulée en régime transitoire

### 5.3. Evolution du niveau de la nappe aux horizons 2030 et 2050

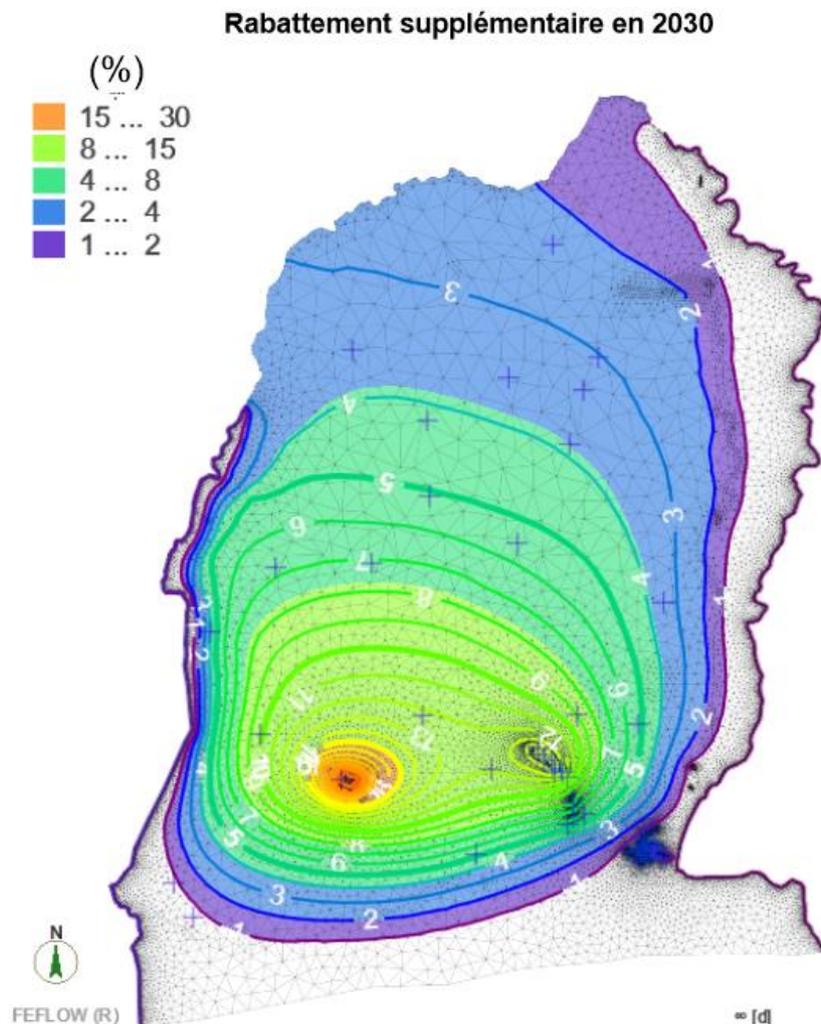
Du fait de l'accroissement de la population, les besoins en eau sont en constante augmentation. Dans la planification delta, une augmentation des besoins en eau actuels pour l'AEP d'un facteur de 1.5 et 3.8 est attendu respectivement aux horizons 2030 et 2050. Sur la base de ces projections, et à partir du modèle de gestion calibré en régime permanent, des simulations de l'évolution du niveau de la nappe de l'aquifère du Mio-Pliocène sur le plateau d'Allada ont été conduites. A cet effet, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- Il n'y a pas de différence significative entre les paramètres physiques et les conditions aux limites du modèle calibré en régime transitoire lorsqu'on les compare à ceux du modèle calibré en régime permanent. Cette hypothèse pourra être validé lorsque le processus de calibration en régime transitoire serait arrivé à son terme.
- Pour satisfaire l'augmentation des besoins en eau pour l'AEP au horizons 2030 et 2050, les prélèvements supplémentaires se feront uniquement au niveau des champs captant de Ouèdo et de Kpinsa en cours de construction. Il n'est donc pas envisagé d'étendre l'augmentation attendus des prélèvements aux champs de Godomey et de Calavi puisque ces derniers sont

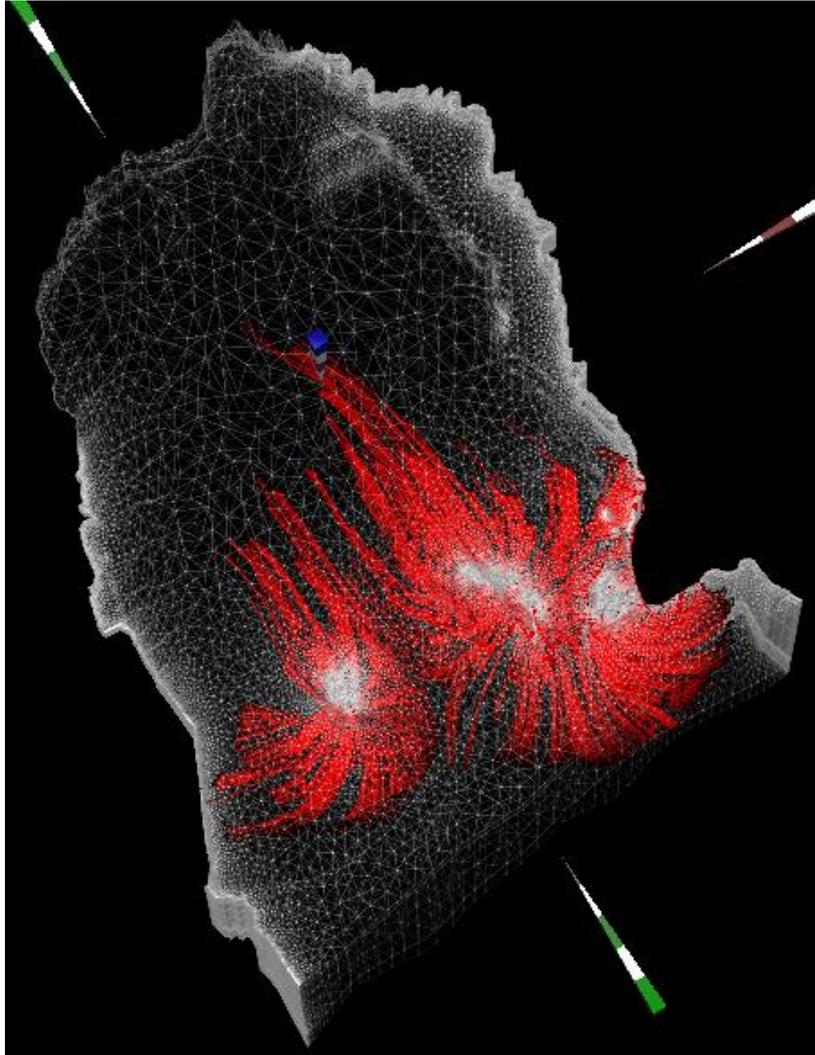
plus susceptibles d'occasionner une intrusion saline à partir du lac Nokoué en cas de surexploitation comme l'ont montré les travaux antérieurs.

Les résultats des simulations effectués à partir d'hypothèse de prélèvements ci-dessus évoqués sont illustrés aux figures suivantes.

La figure 29 présente l'approfondissement relatif (rabattement) du niveau d'eau lorsque les prélèvements nécessaires pour satisfaire les besoins prévus à l'horizon 2030, sont effectués au niveau des champs captant de Ouèdo et de Kpinsa. On peut remarquer que ce scénario de prélèvement conduirait à une augmentation allant de 8 à 30% du rabattement occasionné par les prélèvements actuels. Bien que ce scénario conduit à une dépression piézométrique non négligeable au voisinage des champs captant, on peut cependant remarquer que les zones de captures des champs ne s'étendent à l'océan (figure 30). Ce qui ne met pas en évidence une intrusion saline à partir de cette dernière.

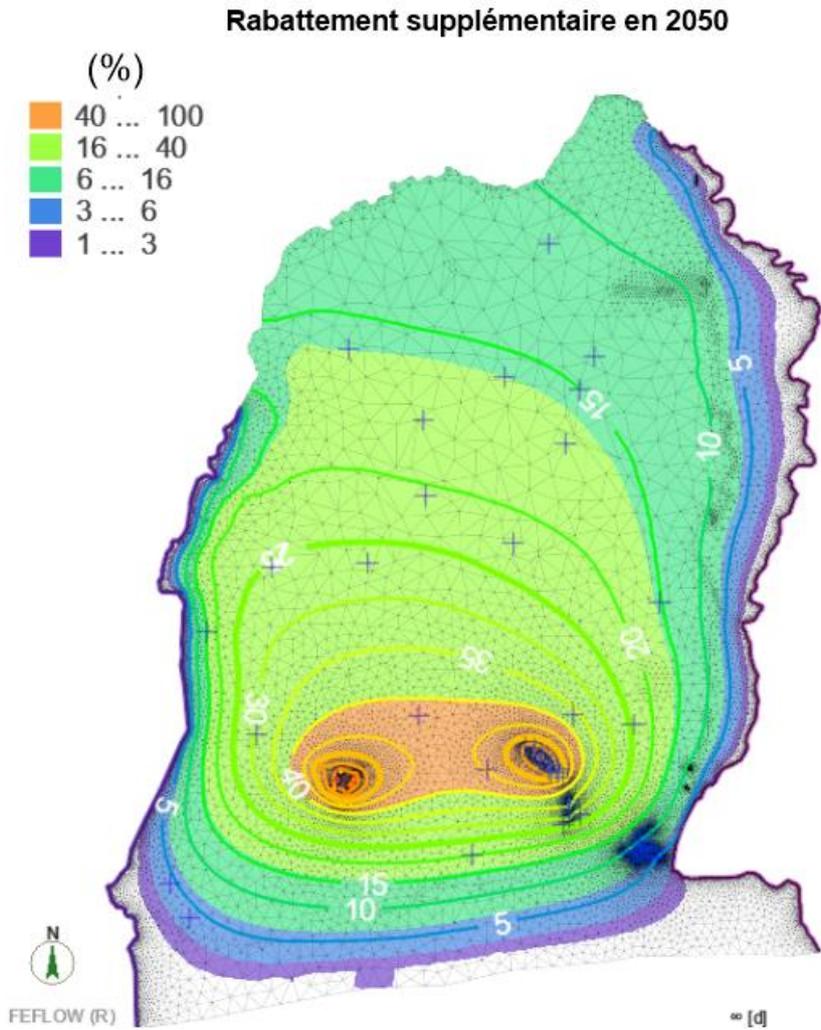


**Figure 29** : Evolution spatiale du rabattement de la nappe suite aux prélèvements prévus en 2030

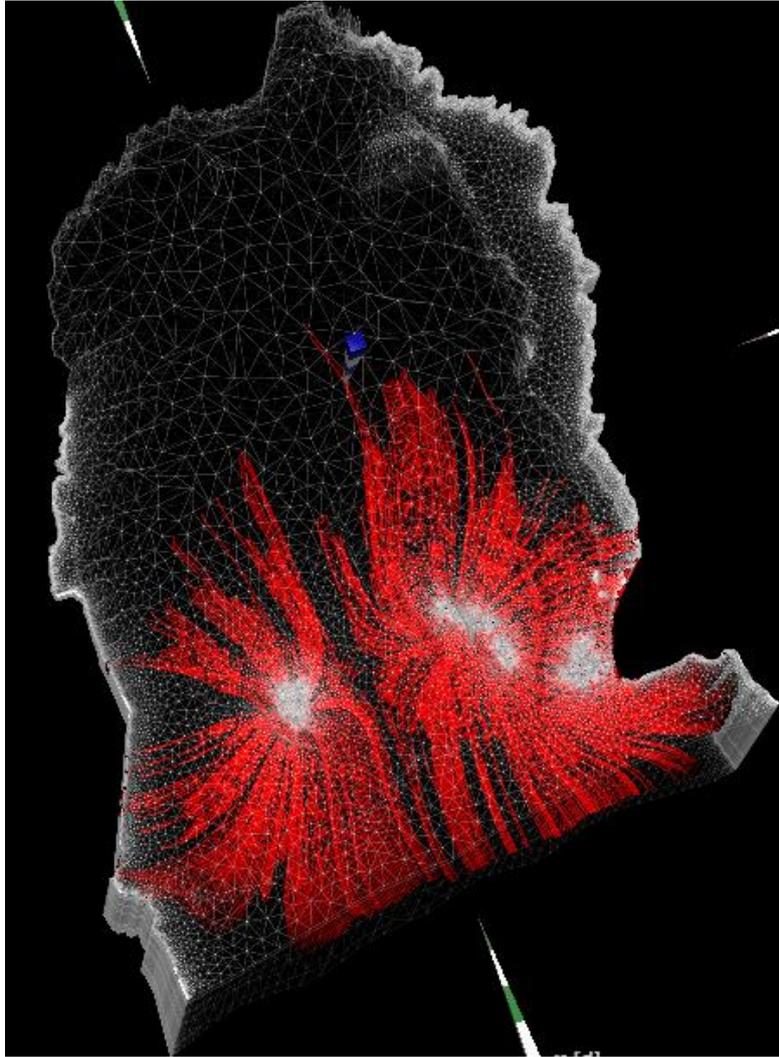


*Figure 30 : zone de capture des champs captant suite aux prélèvements prévus en 2030*

Lorsque la simulation est effectuée de façon à satisfaire les prélèvements attendus à l'horizon 2050, le cône de dépression globale s'étend sur une zone bien plus importante (figure 31). L'approfondissement du niveau de l'eau (rabattement) est nettement plus accru et peut correspondre à 40 à 100% du rabattement occasionné par les prélèvements actuels. La zone de capture des champs captant est donc bien plus importante avec une évidence de ligne de courant en provenance de l'océan (figure 32). Ce qui engendrerait une intrusion saline à partir de ce dernier.



**Figure 31** : Evolution spatiale du rabattement de la nappe suite aux prélèvements prévus en 2050



*Figure 32 : zone de capture des champs captant suite aux prélèvements prévus en 2050*

## 6. Conclusion quant à l'élaboration du modèle

Dans l'optique de modéliser l'aquifère du Mio-pliocène du plateau d'Allada afin de pouvoir la gérer durablement, il est indispensable de reproduire l'écoulement au sein de cet aquifère. Cet écoulement, dans un premier temps doit être décrit en régime permanent, obtenu par la résolution de l'équation de diffusivité qui décrit ce phénomène en milieu saturé (de la surface libre jusqu'à un substratum réputé imperméable). On obtient un champ de potentiels hydrauliques duquel on détermine les lignes de courant qui permettent la description de l'écoulement et l'établissement d'un bilan de masse. Ce champ de potentiels doit être analogue à une piézométrie de référence pour valider le modèle. Ce qui est le cas du modèle faisant l'objet du présent rapport.

Le présent modèle est calibré en régime permanent et la calibration du régime transitoire est presque à son terme. Les simulations conduites en régime permanent calibré sous la base d'hypothèses de prélèvement prévu aux horizons 2030 et 2050 ont montré que l'approfondissement du niveau de l'eau qui en résulterait serait trop importante et peut aller respectivement à 30% et 100% de

l'approfondissement causé par les prélèvements actuels. De plus, et particulièrement pour les prélèvements prévus en 2050, les zones de capture des champs se prolongeront jusqu'à l'océan, avec des lignes d'écoulement qui se densifient au niveau du lac Nokoué, occasionnant ainsi une intrusion saline à partir de ces derniers. Ce même constat bien que de plus faible ampleur, est également fait pour les prélèvements prévus à l'horizon 2030. *Pour pallier à ces situations défavorables à l'alimentation du grand Cotonou, la solution serait d'installer les futurs champs captant à des distances permettant de prévenir un chevauchement des zones de capture de ces derniers avec ceux existants. Pour ce faire l'installation de nouveaux champs captant ainsi que les volumes qu'ils pourraient prélevés devrait être simulé au préalable avec le modèle de gestion afin de les installer au mieux pour une utilisation durable et optimale de l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada. Toutefois, ces résultats seront actualisés avec le modèle en régime transitoire, une fois la calibration de ce dernier achevée.*

Nous ne saurions finir ce travail sans adresser nos remerciements au programme OmiDelta qui a soutenu de diverses manières, ce projet de modélisation entamé depuis le projet NOEVA. Nos sincères remerciements vont également à l'endroit des chercheurs de l'IRD, des collègues de l'Institut de Géoscience et Environnement (IGE) et au Laboratoire Mixte International qui ont permis d'avoir l'outil informatique et la licence du logiciel Feflow grâce auquel le présent modèle a pu être réalisé.

En perspective et à la suite du processus de calibration en régime transitoire, il est prévu de renforcer le modèle pour aborder les problématiques suivantes :

- Capture probabiliste
- Intrusion saline
- Impact de changement d'occupation des sols
- Tests de scénarios de recharge et de pluie
- Quels sont les volumes qui peuvent être durablement prélevés dans l'aquifère du Mio-Pliocène du plateau d'Allada

Une fois le modèle renforcé sur ces aspects cités ci-dessus, il s'agira ensuite de doter les autres plateaux du bassin sédimentaire côtier de ce précieux outil de gestion de la ressource, en commençant par le plateau de Sakété sur lequel certaines données sont déjà collectées.