
**EVALUATION DE L'EFFET DU POMPAGE A LONG TERMES :
MODELISATION PAR LE LOGICIEL « PMWIN »**

Les considérations sur l'impact du prélèvement ne doivent pas uniquement se limiter à la ressource en eau sollicitée, mais devraient concerner l'intégralité de l'hydro système. Cela implique la prise en compte simultanée de toutes les réserves en eau, en relation hydraulique avec la nappe captée susceptibles d'être affectées par le pompage. Mis à part cela, les dimensions temporelles interviennent aussi dans la gestion rationnelle des ressources en eau. Elle demande une vision à long terme du prélèvement vis-à-vis de la disponibilité de l'eau et de la situation de l'hydro système mis en jeu.

Il existe différents types d'outils capables de répondre à ces objectifs de gestion. Dans cette étude, nous avons opté pour l'outil de modélisation numérique. Cet outil est bien adapté à l'échelle de la zone à étudier, c'est-à-dire à une échelle locale. La méthode présente aussi l'avantage d'être plus facile à manipuler et moins chère par rapport aux autres méthodes d'investigation sur le terrain comme la surveillance géophysique ou l'analyse hydrogéologique ou autres.

L'objectif poursuivi dans cette partie, au cours de la modélisation, est d'établir des scénarios d'analyse qui permettent de représenter l'état du système en tenant compte des différents contextes climatiques liés à chaque période de l'étude. On cherche à anticiper les éventuelles réactions de l'hydro système face aux sollicitations pour chaque situation type dans lequel se trouve le système.

Marquons toutefois, qu'il ne s'agit pas ici de se focaliser sur une modélisation proprement dite, dans l'état de l'art. La modélisation représente juste un moyen de procéder pour atteindre l'objectif ultime qui vient d'être exposé plus haut et ne sera discuté que de manière synthétique.

V-2-1 Généralités

i- Définition

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système naturellement complexe, utilisé pour se rapprocher de la réalité. Il cherche à comprendre et à formuler par différents moyens les phénomènes physiques de la réalité sous ses aspects divers. Ainsi, le modèle est créé pour simuler, estimer et prédéterminer la réalité ou ses caractéristiques et son évolution.

ii- Typologie des modèles

Il existe différents types de modèle selon le principe, l'échelle de l'espace considéré, l'échelle du temps et les objectifs visés.

Selon le principe, on peut distinguer deux types de modèle :

- Le modèle stochastique, basé sur des lois statistiques et faisant intervenir des variables aléatoires..
- Le modèle déterministe, associant par une relation unique avec des paramètres à valeur unique la cause d'un phénomène et les résultats..

En fonction de l'objectif visé, on peut avoir recours à :

- Des modèles globaux qui considèrent le système comme un ensemble homogène. Ils ne tiennent pas compte de la variabilité spatiale des paramètres d'entrée.
- Des modèles distribués qui prennent en considération une partie de l'hétérogénéité spatiale des variables et paramètres. L'espace est discrétisé en unités considérées homogènes en termes de caractéristiques physiques et de fonctionnement.

Comme nous ne disposons pas d'assez de données historiques, l'option de la modélisation stochastique sera rejetée. Ce qui nous ramène à l'utilisation d'un modèle déterministe. Compte tenu de la variabilité spatiale des paramètres d'entrée et des résultats attendus, l'adoption d'un modèle physiquement basé et spatialement distribué est la mieux adaptée pour représenter l'aspect du problème, d'où le choix du logiciel de modélisation PMWin.

Démarches de la modélisation

L'établissement d'un modèle hydrogéologique, comme tout autre modèle, comprend plusieurs étapes indispensables.

i- Collecte et organisation des données

L'étape de la collecte des données demande d'importantes travaux de recherche bibliographiques et parfois aussi des campagnes de terrain pour compléter les informations en base de données, surtout quand il s'agit d'une étude à l'échelle locale d'une zone spécifique. Il existe certaines données capitales requises pour la modélisation et dont il faut s'en disposer. Ces données sont essentiellement :

- La géométrie de l'aquifère à modéliser d'un point de vue géologique, topographique, hydrologique,...

- Les caractéristiques du système influençant les processus simulés (conductivités hydrauliques, coefficients d'emmagasinement spécifiques, porosité effective,...)
- Les sollicitations appliquées au système (pompages, injections,...)
- Les données historiques mesurées de la variable du problème (hauteurs piézométriques mesurées,...), indispensables pour la calibration du modèle

Ces données doivent être ensuite organisées et structurées sous la forme requise par le logiciel, qui fera fonctionner le modèle (assemblage des fichiers de structure spécifiée par le logiciel).

ii- Ebauche d'un modèle conceptuel

Les modèles informatiques ont besoin d'être renseigné par de nombreuses informations qui concernent le système à modéliser. La création d'un modèle conceptuel est la première procédure dans la modélisation dont l'objectif est la simplification du problème. Le modèle conceptuel permet d'avoir une première approche de la méthodologie à mettre en place dans la construction du modèle numérique. Le modèle conceptuel définit :

- Le niveau d'échelle et la dimensionnalité de l'aquifère,
- Les frontières existantes, qui plus tard, vont définir les conditions aux limites
- La structure de l'aquifère qui va régir les interrelations dans le système

iii- Discrétisation de la zone

La zone est discrétisée en un maillage par un modèle numérique qui remplace la variable continue par une variable discrète. Le maillage d'éléments finis est construit de manière à représenter de façon la plus optimale possible la géométrie de l'aquifère et les écoulements

iv- Habillage du maillage

Une fois le maillage défini, on passe à l'attribution des paramètres correspondants à chaque maille du modèle et des conditions aux limites

v- Calage et validation du modèle

Le calage consiste à l'optimisation des paramètres pour faire correspondre les résultats aux mesures. Pendant cette phase, on cherche l'ensemble des valeurs des paramètres pour lesquelles il y aura la meilleure adéquation possible entre les observations et les valeurs calculées par le modèle. La tâche consiste à varier certains paramètres pour faire converger le résultat vers l'état le plus représentatif. Pour cela il est nécessaire de prendre connaissance des paramètres qui ont les plus importantes influences sur le modèle. Et il faut jouer à partir de ces paramètres.

Le procédé de validation est similaire à la calibration mais en opérant avec d'autres mesures.

vi- Exploitation du modèle et prédiction

Une fois le modèle calé et validé, il peut être mis en application pour simuler et quantifier les phénomènes à étudier. Le modèle permettra de reproduire divers scénarios liés à un contexte bien défini selon les objectifs assignés au départ.

Application à l'étude du site minier de Ranobe

i- Les données

Les données qui vont servir à l'établissement du modèle sont issues des travaux d'investigations et d'études bibliographiques. Les informations utilisées ont été extraites du rapport d'étude hydrogéologique préliminaire menée par SRK et HYDROMAD. Le modèle sera ébauché à partir de la description du système géologique et hydrogéologique défini précédemment

ii Le modèle conceptuel

A titre de rappel,

- Nous avons un modèle bicouche présentant comme couche inférieure la formation calcaire et la formation dunaire et alluviale comme couche supérieure. L'épaisseur de chaque couche est respectivement moyenne de 30m et 80m pour la couche supérieure et inférieure et elles ne sont saturées que sur une certaine hauteur.
- La limite nord du domaine est représentée par la rivière Manombo, ce dernier étant en connexion hydraulique avec l'aquifère des alluvions. L'est est délimité par la faille de Toliara, orientée dans une direction NNE-SSW. Au sud, le bassin fait frontière avec la ville de Toliara et à l'Ouest avec la côte.

Conditions aux frontières

Comme pour tout problème basé sur des équations physiques, le fonctionnement du modèle exige la définition des limites et l'introduction sur ces dernières des conditions pertinentes, fonction du contexte hydrogéologique. Les conditions aux frontières sont de trois types : la limite à flux imposé ou à flux nul (condition de Neumann), la limite à charge imposée (condition de Dirichlet) et la limite à flux variable (condition de Fourier).

- Pour la couche supérieure, au nord correspond une condition de limite à charge imposée au niveau de la rivière. La charge est imposée par la côte de l'eau dans la rivière. Aux autres frontières on attribue une condition de flux variable
- Pour la couche inférieure, la limite Est est conditionnée par une charge imposée car c'est de là que se fait la recharge. Les autres frontières correspondent à une condition de flux variable.

iii Du modèle conceptuel au modèle numérique : Le logiciel PMWIN (PROCESSING MODFLOW for WINDOWS)

PMWIN est un logiciel de simulation d'écoulement souterrain développé au sein de l'U.S. Geological Survey en 1996 par Arlen W. Harbaugh et Michael G. McDonald. C'est un code de calcul non interfacé basé sur la méthode d'éléments finis. Ce code permet de modéliser des situations en régime permanent ou transitoire pour des nappes aquifères libres et/ou captives en 3 dimensions. Il s'agit d'un modèle numérique distribué, nécessitant un maillage rectangulaire, généralement utilisé pour les écoulements en milieu poreux saturé. PMWIN est un logiciel libre qu'on peut télécharger légalement sur internet.

Le programme MODFLOW permet de traiter de nombreux problèmes du système hydrogéologique et hydrologique tels que :

- Les problèmes de recharge et de décharge d'une nappe
- Les problèmes de pompage dans une nappe d'eau souterraine
- L'échange nappe-rivière grâce à des modules intégrés lui permettant de tenir compte de la présence des cours d'eau,
- Les problèmes de drainage
- Les problèmes de transport de polluants et de contamination d'une nappe

Modélisation par PMWin

Le processus de modélisation par le logiciel Modflow comprend plusieurs étapes

- Maillage et orientation

La première étape dans la manipulation du logiciel est de définir le maillage du domaine étudié et son orientation. Les mailles sont rectangulaires, d'une taille moyenne de 108m x 104m.

Le maillage est représenté en annexe 11 avec les conditions aux limites

➤ Géométrie de l'aquifère

○ Limites du domaine

La délimitation de l'aquifère a été effectuée sur SIG par le logiciel Arcgis. Elle est intégrée dans Modflow sous format (*.dxf)

○ Structure lithologique de l'aquifère

Après avoir tracé les limites du domaine, il faut définir le nombre de couches qui constituent le système aquifère et le type de chaque couche.

Pour ce qui est de notre système, il comprend deux couches :

- ✓ Une couche inférieure représentée par une formation calcaire. Cette couche est semi-confinée et à transmissivité constante.
- ✓ Une couche supérieure formée d'alluvions et de dunes. Evidemment, elle est non confinée et supporte la nappe phréatique.

Les toits de la couche inférieure et supérieure se trouvent respectivement à 50m et 80m en moyenne.

○ Conditions aux limites et conditions initiales

✚ Conditions aux limites

Les conditions aux limites de notre modèle ont déjà été présentées lors de la création du modèle conceptuel,

✚ Conditions initiales

Les charges initiales sont représentées par la piézométrie moyenne mensuelle mesurée de l'année considérée. Ces dernières sont déduites des cartes piézométriques établies précédemment.

○ Paramètres du modèle

Les modèles hydrogéologiques spatialement distribués ont besoin d'un grand nombre de paramètres pour décrire le système. Les paramètres introduits dans le modèle sont de deux types : il y a les paramètres de base propres au système aquifère qui restent fixes et les paramètres extérieurs au modèle variable dans le temps et qui sont spécifiés par l'utilisateur pour chaque cas.

➤ Les paramètres de base

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sont à la base du modèle comme on les appelle « paramètres de base ». Les valeurs de ces paramètres sont souvent peu et vaguement connues et par l'inexistence de données, elles sont prises forfaitairement. Ainsi, ces paramètres seront restitués lors du calage du modèle. Ces paramètres sont listés dans le tableau suivant.

Paramètres	Unités	Sources
Conductivité hydraulique horizontale K_h	m/ unité de temps (j)	Mesuré par des essais de perméabilité in situ
Conductivité hydraulique verticale K_v	m/ unité de temps (j)	Mesuré par des essais de perméabilité in situ
Porosité efficace n_e	%	Évaluée par des essais au laboratoire, mais la plupart du temps, elle est prise de manière forfaitaire
Transmissivité T	m^2 / unité de temps (j)	Estimée à partir de l'interprétation des résultats de pompage
Coefficient d'emménagement S		Estimé à partir de l'interprétation des résultats de pompage. Pour une nappe libre, il est le même que la porosité efficace
Conductance du lit de la rivière	m^2 / unité de temps (j)	Estimée en fonction de la nature de la formation géologique du lit de la rivière

Tableau 30: Paramètres de base du modèle MODFLOW

Les paramètres donnés dans ce tableau sont uniquement ceux qui intéressent notre étude.

➤ Les paramètres extérieurs

On qualifie de paramètres extérieurs ceux variables dans le temps. Il s'agit des sollicitations appliquées à la nappe spécifiées par l'utilisateur pour chaque période de la simulation selon le contexte. Nous gardons toujours, uniquement, les paramètres qui entrent en jeu dans notre étude.

Variabes	Unités	Sources
Recharge ou injection	m/unité de temps (jour)	Estimée à partir d'un bilan d'eau établi au préalable et peut être ajustée lors du calage
Evapotranspiration		Calculée à priori à l'aide de différentes formules empiriques
Prélèvement	m^3 / unité de temps (jour)	Défini selon les besoins fixés

Tableau 31: Variables extérieures pour le modèle MODFLOW

Ces paramètres seront définis plus tard, dans les sections suivantes, à mesure de l'avancement de la modélisation en fonction des différentes situations à modéliser.

➤ Le temps

L'unité de temps de la simulation est définie dépendamment de la dynamique de la nappe. La longueur de la période de simulation est fixée selon l'horizon de temps de prévision, le régime d'écoulement est déterminé en conséquence.

Comme les écoulements souterrains sont des processus lents, le pas de temps choisi est le « jour ». Le modèle étant développé, pour étudier l'évolution spatiale et temporelle des écoulements sur le long terme, les variations sur le court terme, associées aux fluctuations du niveau piézométrique ne seront donc pas reproduites. Le modèle d'écoulement peut donc être supposé permanent et modélisé en régime stationnaire, en utilisant des conditions moyennes pour cette période.

La période de simulation est découpée en périodes de stress et pas de temps. La notion de stress est définie comme toutes les perturbations sur le domaine, qui peuvent être assimilées aux variables externes du modèle, c'est-à-dire les sollicitations (la recharge, un régime de pompage, *etc.*). La discrétisation du temps tient compte de toutes les chronologies pour obtenir des périodes de pas de temps durant lesquelles tous les stress ont une valeur constante. Pour chaque période de stress, on peut changer les paramètres extérieurs au modèle.

Le paramètre temps pour notre modèle sera défini plus tard, lors de la présentation des différents cas à étudier.

➤ Calage et validation du modèle

Généralement, les paramètres de calage sont les paramètres descriptifs du milieu (transmissivité, coefficient d'emménagement,...). Dans le cas d'un modèle spatialisé comme celui-ci, les paramètres ne sont connus que ponctuellement (à partir des essais de pompage) et le calage a pour but de les restituer spatialement.

Pour calibrer et valider le modèle, des mesures piézométriques moyennes en 16 points répartis sur le domaine ont été utilisées.

Cette étape de calage et de validation ne sera pas développée dans le livre car on s'est servi d'un modèle déjà calé et validé utilisé dans des études antérieures, en 2012 mais pour d'autres contextes.

➤ Exploitation du modèle : Analyse des divers scénarios du pompage

Maintenant que nous avons un modèle valide, on peut passer à l'analyse de l'impact du pompage sous différentes conditions.

✚ Dans l'hypothèse d'une variation saisonnière de la recharge

Le premier scénario que nous allons simuler a pour objectif de mettre en évidence l'évolution de l'impact selon les différentes conditions saisonnières.

L'étude se fera, seulement le long d'une année mais sera divisée en 2 périodes de stress. Le régime de pompage reste constant mais seule la recharge connaît une variation. En se référant au bilan hydrique et au graphique représentant l'étude de la fluctuation des niveaux piézométriques, on peut considérer une période de recharge de 3 mois. On a donc :

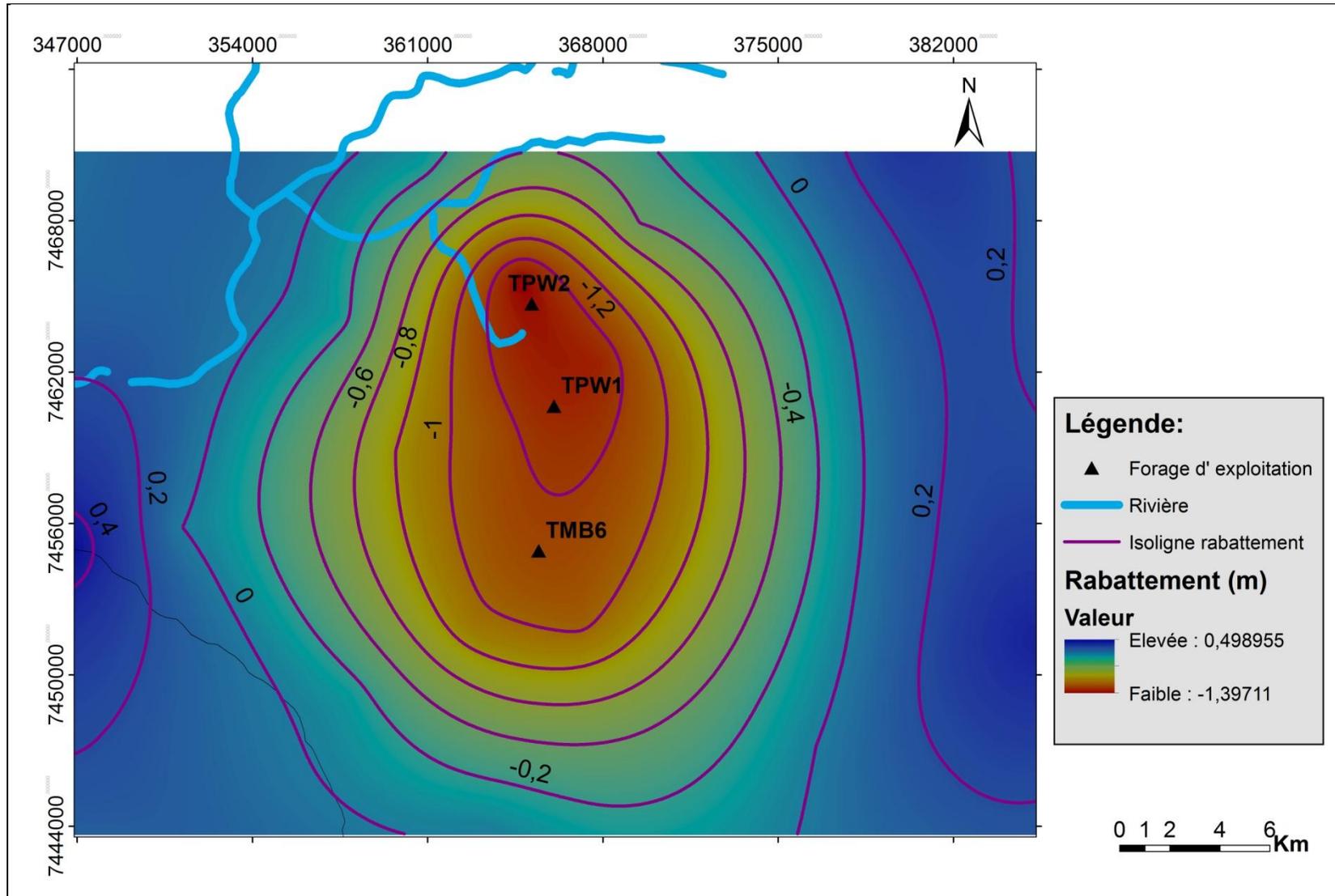
- Une période sans recharge de 9 mois
- Une période d'alimentation de 3 mois. La quantité de cette recharge est tirée du bilan hydrique établi précédemment, justement dans le but d'estimer l'infiltration qui va alimenter la nappe.

Temps		Paramètres					
Pas de temps	Période de stress	Pompage [m ³ /jour]		Recharge[m/jour]		Injection[m ³ /jour]	
		Couche supérieure	Couche inférieure	Couche supérieure	Couche inférieure	Couche supérieure	Couche inférieure
1 ans = 365 jours	1 (9mois)	0	3240	0	0	2592	0
	2 (3mois)			4.10 ⁻⁴	3.310 ⁻⁴		

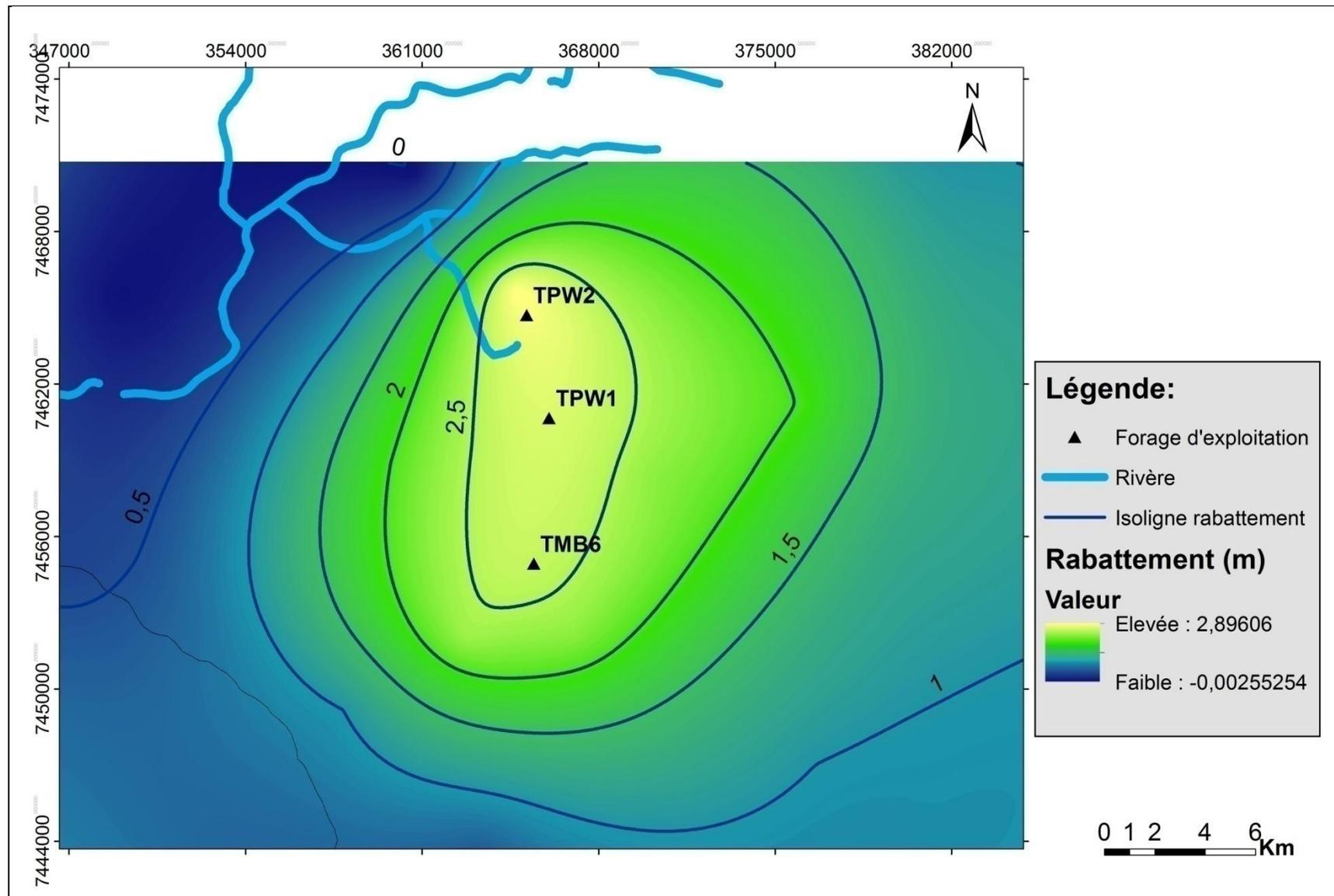
Les résultats de la simulation sont présentés en annexe 12 de l'ouvrage. Ces résultats sont traités sous SIG pour être mieux représentés sous forme de carte montrant l'évolution spatiale du rabattement dans les aquifères à la suite du pompage.

▪ **Rabattement après 9 mois de pompage sans recharge**

Carte 10: Evolution du rabattement dans la nappe alluviale après 9 mois de pompage sans recharge



Carte 11: Evolution du rabattement dans la nappe calcaire après 9 mois de pompage sans recharge



On peut voir sur la carte que le niveau d'eau monte d'une hauteur de 1,49m sur le site de dépôt des résidus humides et diminue progressivement aux alentours jusqu'à un rabattement de 0,5m dans l'aquifère d'alluvion. Malgré l'inexistence de la recharge, l'effet de drainage dû au pompage de la nappe sous jacente n'est presque pas évident au niveau de la nappe phréatique. En effet, le rabattement est compensé par le recyclage via résidus humides. On peut donc dire que, même en l'absence d'une réalimentation de la nappe en saison sèche, la variation subite par cette dernière n'est pas assez importante car les fluctuations des niveaux d'eau ne s'écartent pas des variations saisonnières enregistrées lors des suivis des niveaux piézométriques.

Par contre, dans la nappe calcaire, qui est directement sollicitée, le rabattement est plus important. Au voisinage immédiat des points de forage, le rabattement est maximal et atteint 2,9 m. Il progresse en diminuant plus rapidement vers le nord avec un rayon d'influence de 700m environ et un rayon d'influence de 900m vers le sud. Comme le calcaire est presque imperméable à l'état sain, l'eau réintégrée dans l'aquifère supérieur ne peut pas contribuer assez pour combler le rabattement dû au pompage de la nappe souterraine. L'effet du prélèvement d'eau en période sèche est non négligeable mais n'est pas pour autant défavorable.

Aucune variation autre que la fluctuation saisonnière habituelle n'est prévue se produire au niveau de la rivière.

- Rabattement simulé après 3 mois de pompage avec réalimentation