

# Modélisation numérique de la variation saisonnière de la qualité des eaux souterraines de l'aquifère de Magra, Italie

Lhoussaine EL MEZOUARY<sup>1</sup>, Bouabid EL MANSOURI<sup>1</sup>, Samir KABBAJ<sup>2</sup>, Andrea SCOZZARI<sup>3</sup>, Marco DOVERI<sup>3</sup>, Matia MENICHINI<sup>4</sup>, Malika KILI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Géosciences des Ressources Naturelles, Equipe d'Hydroinformatique, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Campus Maamora, BP.133, 1400 Kénitra, Maroc-e-mail : el.mezouary.lhoussaine@gmail.com

<sup>2</sup> Laboratoires d'analyse mathématiques, géométrie non commutative et applications, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Campus Maamora, BP.133, 1400 Kénitra, Maroc-e-mail : samkabbaj@yahoo.fr

<sup>3</sup> Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Informazione-Consiglio Nazionale delle Ricerche (ISTI-CNR), Via Moruzzi 1, 56124 Pisa, Italy

<sup>4</sup> Istituto di Geoscienze e Georisorse-Consiglio Nazionale delle Ricerche (IGG-CNR), Via Moruzzi 1, 56124 Pisa, Italy, e-mail: menichini@igg.cnr.it.

**RÉSUMÉ.** – L'aquifère de la rivière Magra est la principale source de l'eau potable, de l'industrie et de l'agriculture dans la zone de La Spezia (NW de l'Italie). Toutefois, la nappe souffre d'une forte vulnérabilité aux problèmes de la surexploitation et de la pollution. A cet effet, après l'établissement du modèle conceptuel du système et la définition des conditions aux limites en utilisant, nous avons réalisé une modélisation hydrodynamique et de transport de solutés par le biais du code MODFLOW/GMS7.1. Le modèle est calé en régime permanent puis en transitoire sur la période 2004-2011. Le calage du modèle a montré l'importance des apports de la rivière de Magra dans le bilan de la nappe. Ces apports participent avec 66 % des entrées vers la nappe. En plus, le calage en régime transitoire montre une variation saisonnière de la piézométrie, la différence d'amplitude peut atteindre 2 m dans les zones de captage. Cette variation a été observée également lors de l'analyse de certains éléments chimiques des eaux de la nappe de Magra tels que Cl, SO<sub>4</sub> ainsi que pour le total des solides dissous (TDS). Afin de contrôler ce phénomène, nous avons élaboré un modèle de transport par le code MT3DMS/GMS après avoir défini les paramètres et les conditions aux limites relatives au modèle de transport. La dispersivité et la porosité effective ont été calées et sont respectivement de l'ordre de 4 m et 11-29 %. Les simulations ont montré que le transport dans l'aquifère de Magra est conditionné plutôt par l'advection que par la diffusion-dispersion.

Mots-clés : Aquifère Magra, Modélisation Hydrodynamique, Transport, Modflow, MT3D

## Numerical modeling of the seasonal variation of the groundwater quality in the aquifer Magra River, Italy

**ABSTRACT.** – The aquifer of the Magra river is the main source of drinking water, industry and agriculture in the area of La Spezia (NW of Italy). However, the groundwater suffers from a high vulnerability to the problems of over-exploitation and pollution. In order to control these constraints, a hydrodynamic and transport modeling was achieved using by MODFLOW/GMS7.1 after the establishment of the conceptual model of the system and the definition of the limits conditions. The model is calibrated in steady state and transient considering the period 2004-2011. The calibration of model has shown the importance of the Magra river flows in the water balance of the aquifer, these contributions participates up 66% of the inputs to the Magra aquifer. In addition, the transient calibration shows a seasonal variation of the piezometry. the piezometric amplitude difference can reach 2 m in water catchment areas. This variation was also observed in the analysis of some chemical elements water of Magra groundwater such as Cl, SO<sub>4</sub> and also for total dissolved solids (TDS). In order to control this phenomenon, we developed a model of transport by MT3DMS/GMS. The identification of the contamination sources during the conceptual model elaboration is very important in the process of the quality of groundwater modeling. It was necessary to define the presence of multi- sources of groundwater contamination environment: from river and boundaries (NE side). The choice of the period of the reference for calibration of the model is based on well sinks monitoring the level and the quality of groundwater Magra basin. These wells are themselves the catchments of resources in this area. These measuring points offer a series of measurements of groundwater levels and the concentration of certain chemical elements (SO<sub>4</sub>, Cl, TDS). The results show a strong correlation between on the one hand physic - chemical parameters, and on the other hand between these parameters and the hydrodynamic behavior of the aquifer. The seasonal variation of the groundwater quality is reproduced by managing a suitable stress period in MTD module. The Dispersivity and effective porosity were calibrated and are respectively about of 4 m and 11-29%. The simulations showed that the transport in the hydrogeological Magra aquifer is influenced by advection rather than diffusion-dispersion.

Key-words: Magra aquifer, hydrodispersive seasonal modeling, Transport, Modflow, MT3D.

## I. INTRODUCTION

L'objectif de ce travail est de réaliser une modélisation de la qualité des eaux souterraines et le transfert de polluants dans la nappe de Magra (Fig. 1). La modélisation hydrodispersive de la nappe de Magra est destinée à simuler la migration des éléments chimiques dans la nappe alluviale et les processus d'atténuation naturels mis en jeu. Dans un premier temps, nous avons élaboré le modèle conceptuel en valorisant les données d'entrées utilisées dans le modèle de simulation. Par la suite, la comparaison des différentes approches, la synthèse des résultats concernant le calage des paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs, ont fait apparaître quelques points essentiels dans la modélisation de migration chimique de l'aquifère de Magra.

Les données disponibles relatives au niveau statique mesuré dans les différents forages et puits répertoriés (environ 112 puits & forages, Fig. 2a) couvrant toute la zone de la nappe alluviale du bassin de la rivière Magra ont été utilisées pour la réalisation des états hydrodynamiques (piézométries, profondeurs de la nappe) et de la qualité d'eau dans la nappe (Fig. 2b).

La détermination du terme source de la contamination est très importante, il est nécessaire d'identifier la présence d'un contexte multi-source continu du contaminant vers la nappe de Magra. Le choix des ouvrages de références dans la phase de la calibration du modèle dépend de l'importance potentielle de la zone de captage d'eau, ainsi que de la continuité temporelle de différentes données de calage pour le modèle de l'écoulement et de la qualité des eaux dans la zone aquifère. Les résultats montrent une très grande corrélation d'une part entre les paramètres physico-chimiques, et d'autre part entre ces paramètres et le comportement hydrodynamique.

## II. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET GÉOCHIMIE

La plaine alluviale du bassin de Magra (NW de l'Italie) est située en aval de la rivière Magra en confluence avec la rivière Vara, cette plaine s'étend sur environ 30 km<sup>2</sup> avec une largeur qui varie de 1 à 3 km. Dans cette région du bassin, les sédiments du Quaternaire accumulés par les deux rivières ont formé une vaste plaine alluviale avec une épaisseur qui ne dépasse pas 30 m, la zone comprend les municipalités de

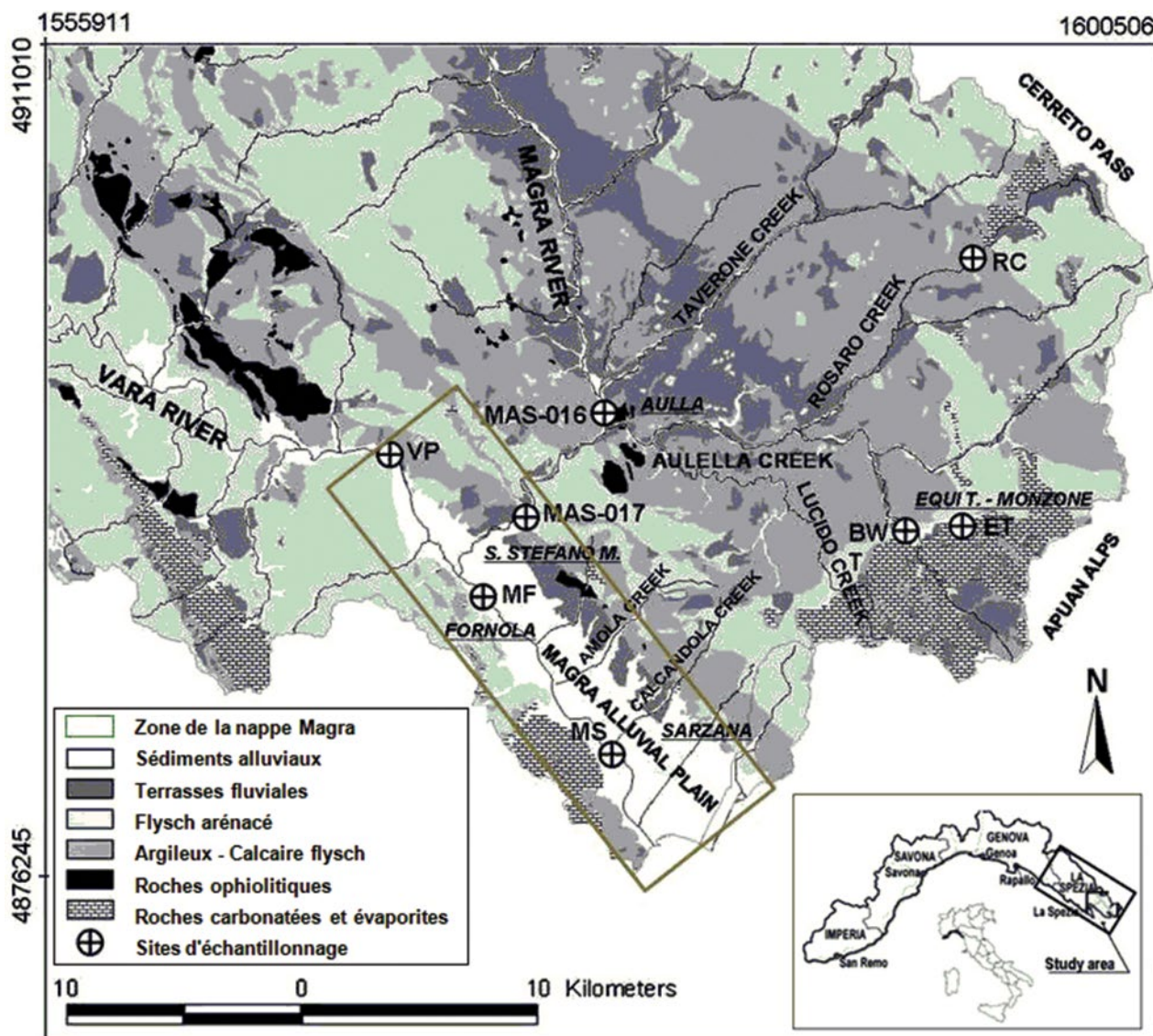


Figure 1 : Situation géographique et contexte géologique de la zone d'étude [Brozzo et al., 2011], modifiée.

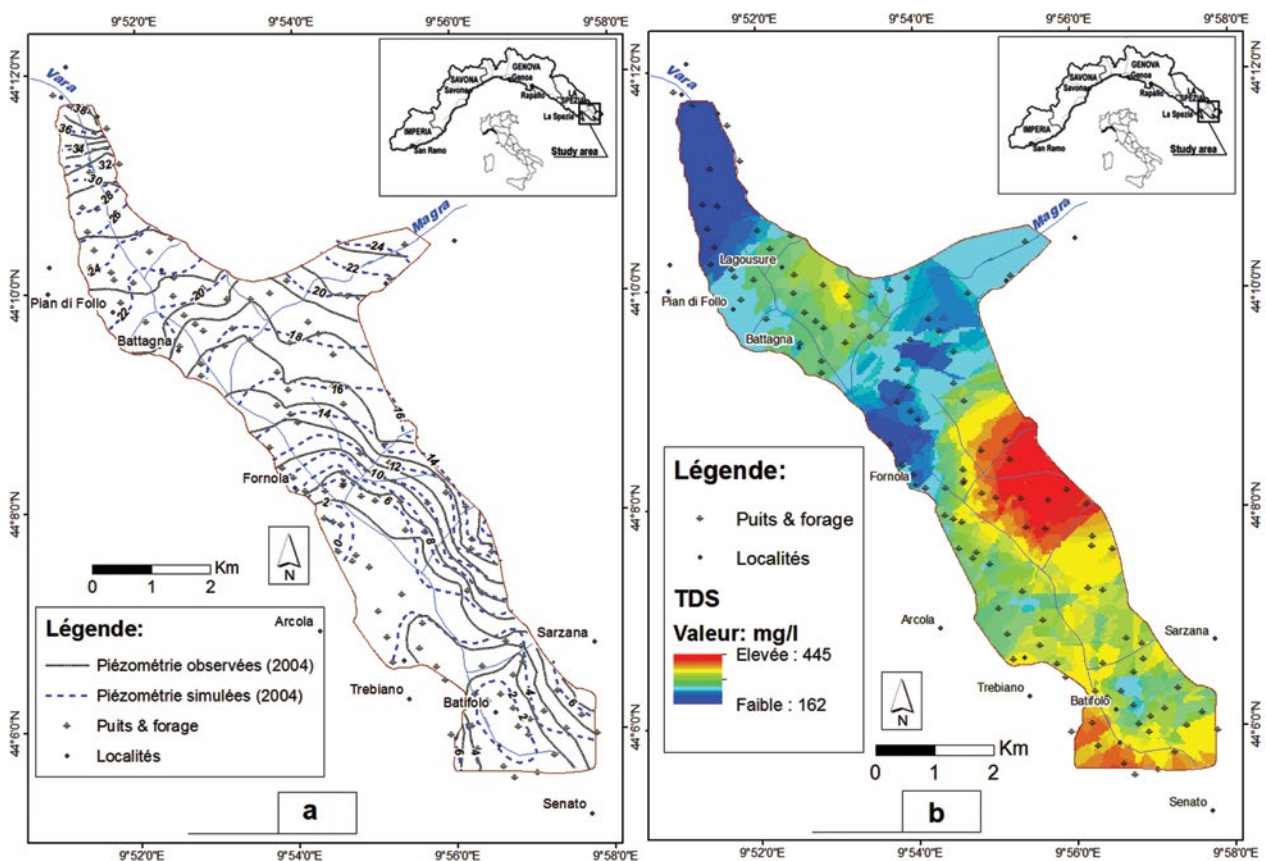


Figure 2 : (a) Piézométrie observées et simulées par le modèle numérique (mai-2004); (b) Distribution de TDS dans la nappe de Magra (Mai-2004).

Folio, Bolano, S. Magra Stefano, Vezzano Ligure, Arcole, Sarzana, Magra Castelnuovo et Ameglia (Fig. 1). L'aquifère contient des couches perméables formées de graviers alluvionnaires comportant la nappe Magra qui est la principale ressource en eau de la province, en fournissant l'eau potable à environ 150 000 habitants.

La typologie géologique basée sur la stratigraphie des dépôts selon la normalisation décrite par DIPTERIS [2003], correspond aux sept strates géologiques suivantes: Substratum rocheux, Argile-Tourbe-Limon, Sable-Sable limoneux, Sable et Gravier, Gravier et Sable, Gravier Grossier-Cailloux et en fin une couche arable et de remplissage qui couvre la topographie de l'aquifère.

Les alluvions de la partie aval de rivière Magra sont situés dans une dépression d'origine tectonique asymétrique qui descend en pente plus douce, à travers une série de terrasses alluviales. La dernière ligne droite des alluvions récents de la rivière de Magra souffrent d'une dégradation de la qualité chimique. La rivière traverse des faciès des évaporites et de gypse qui affleurent dans la rivière en amont

du confluent Vara-Magra, qui prévaut sur les deux côtés lithotypes du graben. Par conséquent, nous pouvons attendre que les caractéristiques chimiques de l'eau soient influencées, au moins en partie, par la composition chimique et minéralogique de ces roches. Les relevés physico chimique menées sur le site ont mis en évidence la présence des éléments suivants (Tab. 1).

Basé sur l'étude de Brozzo *et al.* [2011] sur la chimie de l'eau dans la région de l'aquifère de Magra, nous avons établi la carte de répartition de TDS dans notre zone d'étude. Ce paramètre est obtenu en multipliant la conductivité électrique par le facteur 0,65 défini par Brown *et al.* [1970]. La carte de TDS indique la présence d'une zone de forte concentration entre la zone Fornola et Ponzano-Magra (Fig. 2b), selon Brozzo *et al.* [2011], la source naturelle de minéralisation, notamment pour le Cl et SO<sub>4</sub>, ne peut être attribuée à l'intrusion d'eau de la mer, aussi la pollution anthropique peut être exclue, en raison de la forte corrélation entre les teneurs en SO<sub>4</sub> et Cl. En outre, la richesse en SO<sub>4</sub> et Cl dans les eaux de Magra et la rareté de ces deux

Tableau 1 : Données sur la concentration des éléments chimiques de la nappe de Margra.

Elément en (mg/l)	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	Sr	Ba	SiO <sub>2</sub>
	41-128	6,1-28	6.2-58	0, 2-11,5	91,5-445,4	9,3-99	8,4-99	0,2-56,6	0,095-4,1	0,01-0,4	1,8-21
Elément en (µg/l)	Li	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
	0,2-14	1-7,2	1,2-981	1,4-2030	1-5,9	1-181	1-2283	< 1	1-4,2	1-2,2	2-8



constituants dissouts dans les eaux de Vara nous mènent à penser que les sources de  $\text{SO}_4$  et Cl doivent être hérités du bassin supérieur de Magra. L'échantillonnage de relevés du débit à partir des sources et des ruisseaux de bassin supérieur de Magra est caractérisé par une CE élevée qui indique sans doute des teneurs relativement élevées de  $\text{SO}_4$  et Cl, due à la dissolution des évaporites de gypse d'âge triasique affleurant près du col de Cerreto (Fig. 1). et par conséquent, le Chlorure s'est avéré être presque totalement fourni par des sources thermales riches en NaCl situés dans le versant nord des Alpes Apuanes [Boschetti *et al.*, 2005].

### III. MODELISATION HYDRODYNAMIQUE DANS L'AQUIFERE MAGRA

Le modèle conceptuel, en matière de modélisation, consiste en une représentation conceptuelle de la réalité, souvent simplifiée, destinée à être implémentée dans le logiciel de modélisation sous les contraintes qu'impose celui-ci. Le modèle mathématique développé considère que l'aquifère de la rivière Magra a un caractère d'un réservoir hétérogène verticalement avec un excès de gravier-sable, il peut toutefois être représenté valablement à l'échelle du domaine retenu par une équation d'écoulement supposant un milieu poreux continu (1), selon la notion d'élément de volume représentatif.

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \pm Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Où  $K_x$ ,  $K_y$  et  $K_z$  indique la conductivité hydraulique le long des axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  ( $L T^{-1}$ ),  $h$  hauteur hydraulique ( $L$ ),  $Q$  le flux volumétrique par unité de volume représentant le terme source/puits ( $T^{-1}$ ),  $S_s$  le coefficient d'emmagasinement spécifique, est déterminé à partir de la quantité d'eau libérée pour une perte de charge donnée ( $L^{-1}$ ) et  $T$  indique le temps ( $T$ ).

Le modèle mathématique destiné à simuler les écoulements d'eau souterraine sur l'entièreté de la zone d'étude, a été réalisé par le code Modflow/GMS7. Le maillage réalisé est un maillage 3D régulier sur l'ensemble de la zone modélisée, il est constitué de cellules carrées de 100 mètres de côté, soit un total d'environ 10 000 cellules avec 20 402 nœuds, comportant 2 479 cellules actives et 7 521 cellules non actives. Les épaisseurs des mailles du modèle mathématique seront conformes à la géométrie de l'aquifère telle qu'elle est connue ou estimée, ce qui permettra des calculs de flux réels. Généralement l'épaisseur de l'aquifère augmente de 15 m au nord et 30 m vers le sud. Le modèle intègre les données des puits les plus exploités, soit en total 122 526  $\text{m}^3/\text{j}$ . Les tronçons des rivières supposés en équilibre avec la nappe sont représentés explicitement par les fonctions «River» du code Modflow/GMS. Le débit échangé est contrôlé indirectement en fixant la valeur de la conductance, ce paramètre est calculé à partir de la conductivité hydraulique du matériel représentant le lit de la rivière, de l'épaisseur mouillée et en utilisant la surface de la section considérée. MODFLOW calcule la conductance  $C$  en appliquant la formule suivante :

$$C = \frac{K_z}{e} \times S \quad (2)$$

Où  $C$  est la conductance en ( $\text{m}^2/\text{j}$ ,  $L^2/T$ ),  $K_z$  est la perméabilité verticale en ( $\text{m}/\text{j}$ ,  $L/T$ ),  $e$  représente l'épaisseur

colmatée en ( $\text{m}$ ,  $L$ ), et  $S$  indique la surface de contact rivière-nappe en ( $\text{m}^2$ ,  $L^2$ ).

La valeur moyenne journalière de la recharge efficace (RCH) (n'inclut pas la recharge par la rivière) estimée est de l'ordre de 16082  $\text{m}^3/\text{j}$ . Les conditions aux limites de types : Neumann, Flux imposé (Limite EST) et Dirichlet, Potentiel imposé (Limite Nord et Limite Sud) ont été formulées grâce à l'analyse de la carte piézométrique de référence mai-2004 (Fig. 2a). L'application de la loi expérimentale de Darcy et les possibilités offertes par les outils SIG pour le dimensionnement de l'aquifère nous a permis de calculer le flux entant ( $Q$ ) le long de toute la limite orientale. Pour ajuster la perméabilité et pour mieux reproduire la piézométrie observée en 2004 sur le terrain (Fig. 2a), la calibration du modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains dans l'aquifère Magra a été réalisée en régime permanent pour l'année 2004 et projetée en transitoire sur l'année 2011. La distribution de valeur du coefficient d'emmagasinement adoptée au cours du calage du modèle en régime transitoire est de l'ordre de 11 % à 29 %.

Le champ de conductivité hydraulique ( $Kh$ ) obtenu par la modélisation mathématique est hétérogène, avec des valeurs qui varient entre  $6,23 \cdot 10^{-06}$   $\text{m/s}$  à  $7,87 \cdot 10^{-03}$   $\text{m/s}$ , les grandes valeurs de la conductivité se localisent dans l'extrémité Nord-Ouest ( $7,87 \cdot 10^{-03}$   $\text{m/s}$ ) et au centre à côté de la limite ouest et sud-ouest de la l'aquifère, ainsi la plupart des zones avec des valeurs homogène de  $Kh$  et de RCH sont caractérisées par un cours d'eau, est également influencées par les formations géologiques autour de la zone de l'aquifère et les anciens dépôts alluviaux. Les principaux flux d'eau souterraine entrant du modèle sont localisés au niveau des cours d'eau (91 447  $\text{m}^3/\text{j}$ , soit 66 %), par contre les prélèvements dans les ouvrages de captages constituent la plus grande partie des flux sortants de la nappe (88 %, soit 122 526  $\text{m}^3/\text{j}$ ), ainsi on observe en particulier que les flux d'eau souterraine sortant de l'aquifère vers la mer de La Spezia (3 %) sont relativement faibles par rapport aux flux échangés à travers les cours d'eaux, ce qui conforte l'hypothèse conceptuelle prise qui consistait à limiter la zone modélisée aux dessus de Senato.

### IV. MODELISATION DE TRANSPORT DANS L'AQUIFERE MAGRA

La simulation de transport des éléments chimiques (Minéralisation) dans la nappe de Magra est une extension du modèle hydrodynamique de celui-ci. Nous allons utiliser la solution de ce modèle comme un champ d'écoulement pour la simulation de transport, afin de reproduire le comportement qui caractérise la concentration de Cl,  $\text{SO}_4$  et TDS dans l'aquifère de Magra. Le code MT3DMS/GMS (Mass Transport in Three Dimensions Modeling System) nous a permis de simuler la migration des solutés dans l'aquifère, on affecte une concentration initiale de TDS, Cl et  $\text{SO}_4$  dans l'ensemble de la nappe à partir des relevés de mai 2004 (Fig. 2b), en fait, la concentration de Cl,  $\text{SO}_4$  et TDS dépend de la période de stress et aussi des différents états du niveau d'eau dans la rivière Magra et Vara.

Les mécanismes de transport de polluants dans les nappes souterraines sont régis par de nombreux phénomènes, la convection et la dispersion sont les deux phénomènes les plus importants. L'équation (3) de McDonald et Harbaugh [1988] de transport définissant la variation de la

concentration en fonction du temps d'une substance organique dissoute transférée en milieu poreux saturé, s'écrit sous la forme suivante:

$$\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (V_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (V_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (V_z C) \right] = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

Où  $V_x, V_y, V_z$  sont les vitesses d'écoulement de l'eau en milieu poreux dans les directions  $x, y, z$  (m/s) [L/T],  $D_x, D_y, D_z$  sont les coefficients de dispersion dans le milieu poreux saturé (m<sup>2</sup>/s) [L<sup>2</sup>/T],  $C$  la concentration du polluant en solution dans l'eau mg/m<sup>3</sup> [M/L<sup>3</sup>] et  $t$  indique le temps s [T].

Pour le modèle de transport de Magra, nous proposons des simulations de transport afin d'analyser le potentiel à long terme pour Cl, SO<sub>4</sub> et TDS, la simulation est basée sur l'hypothèse selon laquelle le long de la rivière Magra et la limite orientale de l'aquifère sont les sources de migration potentiels de la contamination minérale (contexte multi-source continu) vers les eaux souterraines, soit un taux d'injection qui varie de 35-120 mg/l pour SO<sub>4</sub>, 20-125 mg/l pour Cl et 306-455 mg/l pour le TDS, les choix relatifs à la définition du terme source, sa position, sa géométrie et le taux d'injection en polluant sont déterminants. Dans le cas de l'aquifère Magra, à l'exception des valeurs de surveillance observées de la concentration au niveau de la limite orientale de la nappe et à côté de la zone Fornola et Batifolla, peu de renseignements sont disponibles sur le terme source dans les autres sections de la rivière Magra. De ce fait le taux de pollution n'est pas connu et fait partie des paramètres de calage. Les autres données hydrogéologiques qui ont permis de conceptualiser le modèle de transport sont: une dispersivité longitudinale ( $D_L$ ) estimée de 4 m, la porosité efficace ( $\phi$ ) presque confondue avec la valeur de coefficient d'emmagasinement de 0,11 à 0,29 assignés au modèle. En générale, dans la phase de calibration du modèle de la qualité d'eau, l'évolution de la porosité est très sensible à la perméabilité. En effet, la porosité  $\phi$  diminue avec la perméabilité Kh, il existe une relation de régression puissance établie entre la conductivité hydraulique et la porosité dans le modèle de l'aquifère (Fig. 3, équation 4).

$$\phi = 59,29.Kh^{0.151} \quad (4)$$

Où  $\phi$  est porosité efficace en % et Kh représente la perméabilité en m/s.

Le modèle de transport numérique est étalonné en régime transitoire à travers une série de concentration de Cl, SO<sub>4</sub> et TDS. La conceptualisation de la circulation régionale et l'architecture du modèle relativement complexe ont été précisément défini dans la phase préliminaire de l'élaboration du modèle hydrodynamique. Les figures 4a, 4b et 4c montrent la tendance des valeurs de concentration calculées de Cl, SO<sub>4</sub> et TDS vers des valeurs de concentration observés au cours de Mai 2004 à 2011.

Lorsque la dispersivité du modèle a été augmentée de 4 m à 40 m, aucun changement significatif dans la concentration de Cl, SO<sub>4</sub> et TDS n'a été remarqué, cela confirme que la dispersion et non pas l'advection qui est prédominante dans la migration des solutés. L'analyse des réponses du modèle de concentration pour le TDS montre que l'évolution de la concentration des eaux de la nappe est inversement proportionnelle à la hauteur de la rivière ainsi que pour l'état hydrodynamique de la nappe (Fig. 4d, Fig. 5), en effet, il dépend essentiellement de l'état de la rivière de Magra. Ce résultats semble confirmer l'hypothèse selon laquelle ces contaminants affectent principalement l'aquifère à travers la rivière à l'aval de la confluence Magra-Vara et que l'influence de la limite orientale de l'aquifère quand à la contamination est inférieure.

## V. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons réalisé un modèle mathématique par les codes MODFLOW et MT3D, de la nappe alluviale du bassin de la rivière Magra en Italie. Ce modèle a permis la simulation des écoulements souterrains et de transport de polluants minéraux dans le système aquifère de Magra.

Le modèle calé a fait l'objet d'une première phase d'exploitation ce qui a permis la quantification des termes du bilan, la détermination des zones d'entrées/sorties et la simulation des scénarios d'exploitation. Ces scénarios ont montré que l'état de la nappe en 2004 est en équilibre hydrodynamique et que les zones de Fornola et Batifollo sont les deux zones les plus vulnérables au changement de la charge

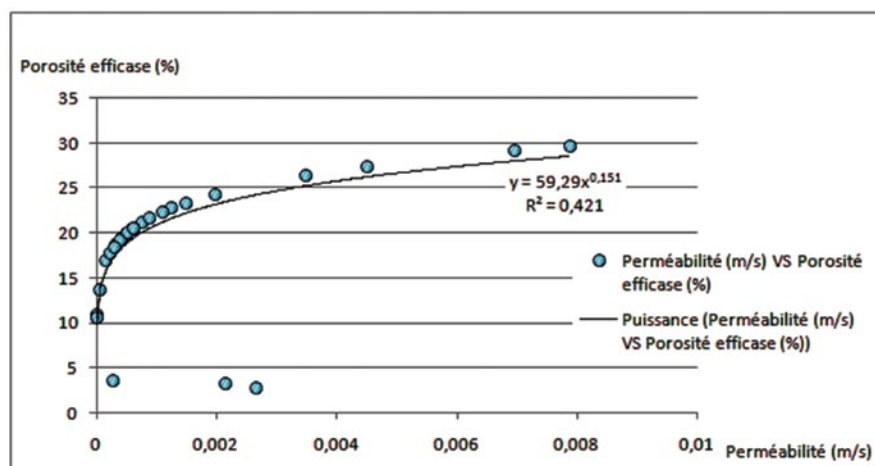


Figure 3 : Corrélation entre les valeurs de la perméabilité (Kh) et de la porosité efficace ( $\phi$ ) ajustées par le modèle.

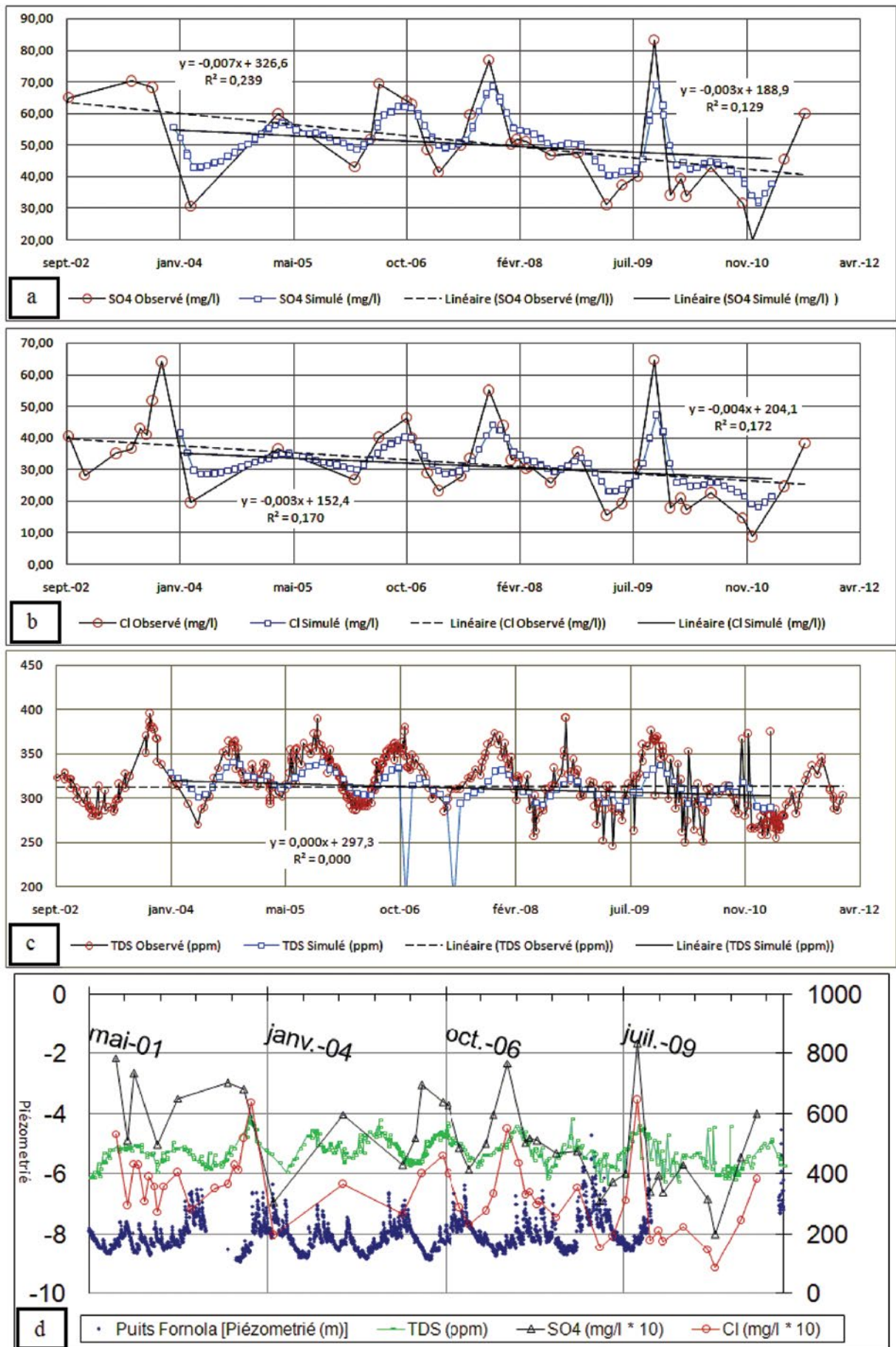


Figure 4 (a), (b), (c) : Variations des concentrations observées et simulées par le modèle de SO<sub>4</sub>, Cl et TDS dans l'aquifère de 2004 à 2011 sur les puits de Fornola ; (d) Evolution des concentrations de Cl, SO<sub>4</sub> et TDS en parallèle avec la piézométrie de la nappe dans l'aquifère Magra de 2004 à 2011 sur les puits de Fornola.

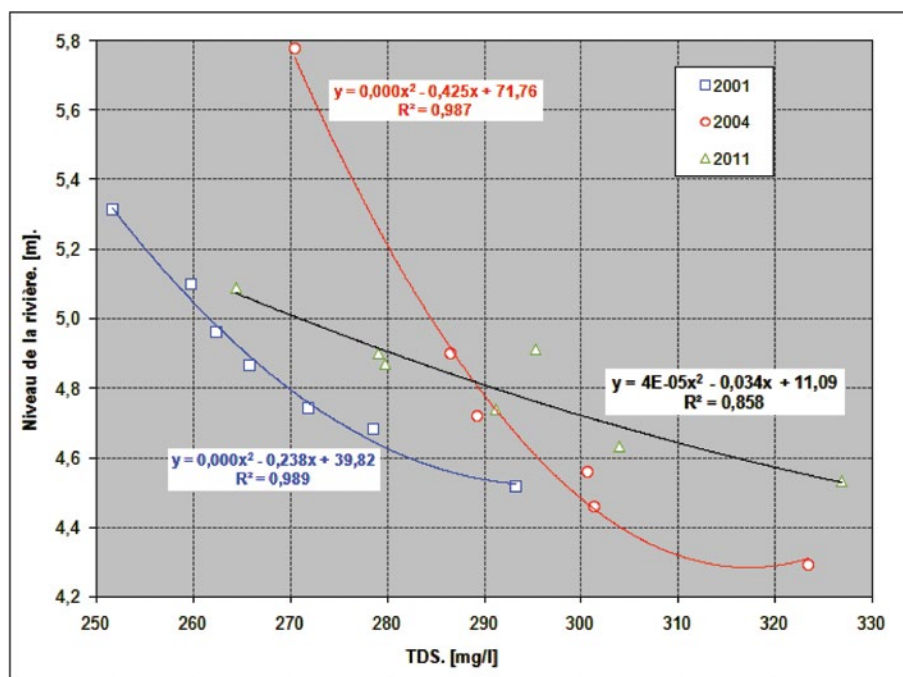


Figure 5 : Corrélation entre les valeurs de (TDS) et de la hauteur de la rivière Magra pour les années : 2001, 2004 et 2011.

hydraulique. Le bilan hydrique de la nappe diminue proportionnellement avec le taux de diminution de l'infiltration des eaux de la rivière. Par ailleurs toute activité environnementale sur la rivière affectera automatiquement la qualité de l'eau souterraine. Or, sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Magra au niveau du sous-bassin de la rivière de Vara au Nord et Nord-est au niveau du sous-bassin supérieur de la rivière Magra, les sources de pollution avérées ou potentielles sont nombreuses. La qualité de la rivière est d'ailleurs mauvaise à très mauvaise pour certains paramètres, ce qui pourrait mettre la qualité des eaux de la nappe en péril.

Les résultats du modèle de la qualité de Magra que nous avons mis en œuvre a consisté à mettre en évidence quelques aspects principaux, à savoir l'importance du modèle hydrodynamique comme une étape pré-requis de celui du transport, ainsi que les paramètres du calage hydrodynamiques et hydrodispersifs et la détermination du terme source du contaminant. La convection liée à l'hydrodynamique étant un phénomène prépondérant dans le transport de  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  et TDS dans les eaux souterraines, en effet la dégradation de la qualité des eaux dans l'aquifère Magra est proportionnel à l'abaissement du niveau de la rivière. Le TDS dans la nappe varie de 145–534 mg/l, la partie inférieure de l'aquifère Magra a développé des dépressions semi-régionales d'eaux souterraines surtout en été (abaissement des niveaux piézométriques atteint 4 m dans la zone Fornola et 3 m dans la zone Batifolla), avec des profondeurs de la nappe de plus de 11 à 20 m dans la zone Fornola et de 4 à 10 dans la zone de Batifolla. Ces zones qui sont exploitées pour l'alimentation en eau potable de la ville de La Spezia sont exposées à une minéralisation issue de la rivière Magra. Il est donc indispensable de poursuivre les initiatives visant à restaurer la qualité des eaux superficielles et souterraines dans la zone.

## VI. REFERENCES

- BOSCHETTI T., VENTURELLI G., TOSCANI L., BARBIERI M., MUCCHINO C. (2005) — The Bagni di Lucca thermal waters (Tuscany, Italy): an example of Ca-SO<sub>4</sub> waters with high Na/Cl and low Ca/SO<sub>4</sub> ratios. *J Hydrol.* **307** : 270–293
- BROWN E., SKOUGSTAND MW., FISHMAN M. J. (1970) — Methods for collection and analyses of water samples for dissolved minerals and gases. *Techniques of Water Resources Investigation, Book, US Geological Survey, Reston, VA.* **5**
- BROZZO G., MARINA A., MARINI L. (2011) — The alluvial aquifer of the Lower Magra Basin (La Spezia, Italy): conceptual hydrogeochemical–hydrogeological model, behavior of solutes, and groundwater dynamics, DOI 10.1007/s13146-011-0066-1. *Carbonates Evaporites*
- DIPTERIS: DIPARTIMENTO PER LO STUDIO DEL TERRITORIO E DELLE SUE RISORSE (2003) — L'aquifero alluvionale della bassa valle di fiume Magra. *Atlante degli acquiferi della Liguria.* **4** : 10
- HARBAUGH A.W., BANTA ER., HILL MC, MCDONALD MG. (2000) — MODFLOW- 2000, The U.S. Geological Survey modular groundwater model–User guide to modularization concepts and the groundwater flow process. *US Geol Surv Open-File Rep.* **00(92)** : 121
- KHAN R., RANA T., GABRIEL H. F., ULLAH M. K. (2008) — Hydrogeologic assessment of escalating groundwater exploitation in the Indus Basin, Pakistan. DOI 10.1007/s10040-008-0336-8. *Hydrogeology Journal.*
- MCDONALD MG., HARBAUGH AW. (1988) — A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. *US Geological Survey Technical Manual of Water Resources Investigation.* *US Geological Survey, Reston, Va.* **6** : 586
- ZHENG C. (2010) — *MT3DMS v 5.3 - Supplemental User's Guide, Department of Geological Sciences, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama*