

Article

« Approche spatialisée dans la modélisation hydrogéologique d'un ancien secteur minier »

Yann Lucas et Laurent Vaute

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 24, n° 1, 2011, p. 77-85.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/045829ar>

DOI: 10.7202/045829ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

APPROCHE SPATIALISÉE DANS LA MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE D'UN ANCIEN SECTEUR MINIER

Spatialized approach in the hydrogeological modeling of an abandoned mining sector

YANN LUCAS¹ ET LAURENT VAUTE²

¹Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg, CNRS-UdS,
1, rue de Blessig, 67000, Strasbourg, France

²BRGM, 1, avenue du Parc-de-Brabois, 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex, France

Reçu le 26 décembre 2008, accepté le 13 mai 2010

RÉSUMÉ

La présente recherche concerne l'étude d'un site situé dans le nord-est de la France dont le régime hydrogéologique est perturbé par la présence des galeries d'une ancienne mine de fer. Ce site a fait l'objet d'une modélisation hydrodynamique en trois dimensions. Quatre couches représentant le système aquifère et les formations imperméables sont numérisées; le réseau de galeries est représenté de manière explicite dans la couche ferrifère au moyen d'une option du code MARTHE qui intègre la géométrie des galeries. Après un calage sur près de six ans se basant sur deux critères, l'évolution de la charge hydraulique, en un point, et les volumes débordés par la mine, en un autre point, la simulation a permis de vérifier le caractère prédictif du modèle, au moins en un point. De plus, l'analyse de sensibilité prouve une certaine robustesse du modèle. Malgré un certain manque de données, l'étude montre qu'une modélisation en trois dimensions est envisageable.

Mots-clés : *Différences finies, galeries, mines de fer, karst, Lorraine, modélisation 3D.*

ABSTRACT

The present study deals with the specific hydrogeology of an old iron mining sector in north-eastern France. We modelled flows in three dimensions, particularly disturbed by the presence of old mine galleries. Four layers, representing the aquifer system and impermeable formations, were digitalized; the network of galleries was implemented in the iron-bearing formation by using an option of the code MARTHE, which takes into account the geometry of the network of galleries. After a history matching based on two criteria - the hydraulic head at a point of the network of galleries and the overflowed volumes over about six years at another point - a simulation over six years correctly forecasts the changes in hydraulic head evolution at one point. Furthermore, sensitivity analyses demonstrate that the model is rather robust. Even though the amount of available data is low, our study shows that a three dimensional modelling is not impossible to achieve.

Keywords: *Finite differences, galleries, iron mine, karst, Lorraine, 3D modelling.*

*Auteur pour correspondance :

Téléphone : +33(0) 3 68 85 04 09

T.élecopieur : +33(0) 3 68 85 04 02

Courriel : yann.lucas@east.u-strasbg.fr

1. INTRODUCTION

Le gisement de fer lorrain, qui s'étend de la frontière luxembourgeoise à la région de Nancy, a été exploité de manière industrielle durant plus d'un siècle. Les venues d'eau d'infiltration, dues notamment à la fragilisation de l'écran imperméable qui séparait la formation ferrifère des aquifères susjacentes, furent toujours un problème majeur (VAUTE et FRAPPIER, 2004). L'exploitation a duré jusqu'à ce que la crise dans la sidérurgie entraîne l'arrêt de l'extraction du minerai et, en conséquence, l'arrêt des pompages d'exhaure.

Dans cet article, nous nous intéressons au fonctionnement hydrogéologique spécifique d'une ancienne mine de fer du bassin de Nancy, la mine de Saizerais (Figure 1). Étant donné la complexité de la structure du système hydrogéologique, les modélisations sur ce sujet ont été, dans un premier temps, nécessairement globales (ex. : COLLON *et al.*, 2005). Nous essayons ici de modéliser dans l'espace les écoulements, perturbés notamment par la présence des anciennes galeries de mine. Cette mine a été choisie pour sa taille raisonnable, le fait que son réseau de galeries a une forme simple et que c'est une des mines pour lesquelles nous disposons du plus grand nombre de données hydrodynamiques, même si ce nombre est en soi relativement faible.

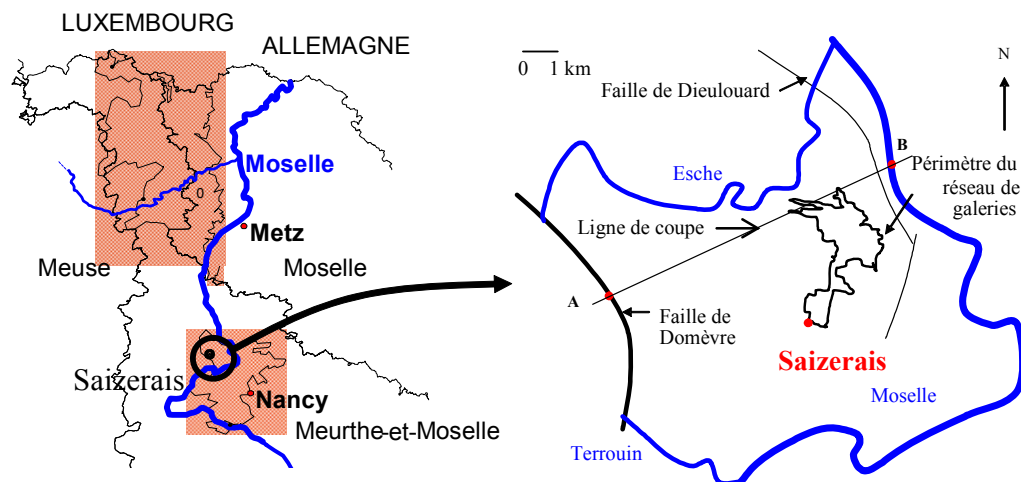
2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Les alentours de la mine de Saizerais présentent un relief en cuvette (Figure 2), où sont présentes, du bas vers le haut, les formations suivantes (BUBENICEK, 1970) :

- le Toarcien (épaisseur de 90 à 100 m) comporte à sa base les « Schistes Cartons », puis vient une série de marnes et d'argiles micacées. Une dizaine de mètres de grès argileux micacés termine cet étage;
- l'Aalénien : constitué par une alternance de minerai de fer oolithique et de bancs de marnes calcaréo-gréseuses et micacées, il constitue la formation ferrifère, bien que tout l'étage ne soit pas exploitable. Sa puissance varie entre 0 et 9 m sur notre zone, s'amenuisant vers le nord et l'ouest et augmentant vers le sud;
- le Jurassique moyen : la série du Dogger, qui surmonte la formation ferrifère, est une alternance de marnes et de calcaires allant du Bajocien jusqu'au Bathonien. Sa puissance est d'environ 150 m.

Du point de vue hydrogéologique, deux nappes principales peuvent être distinguées dans ce secteur (Figure 2a) :

- la nappe de l'Aalénien : cette formation contient une nappe conséquente. Elle affleure très peu sur la zone étudiée. Néanmoins, en certains endroits, elle est alimentée par la nappe susjacente du Dogger, le toit de la formation ferrifère et les marnes micacées, qui font habituellement office de couche imperméable entre l'Aalénien et le Dogger, ayant été fragilisés par les travaux miniers;
- la nappe du Dogger : elle est en fait composée de deux ensembles aquifères : (i) la nappe du Bajocien supérieur, qui est connectée aux aquifères sous-jacents (Bajocien moyen et inférieur) en raison de la karstification ou de la fracturation artificielle formée lors de l'exploitation minière; et (ii) la nappe du Bajocien moyen et inférieur,



1

Figure 1. Localisation de la mine de Saizerais (a) et limites hydrogéologiques de la zone d'étude (b). Sur la figure (a), la zone rouge correspond à l'extension régionale du bassin ferrifère lorrain. Location of the Saizerais mine (a) and hydrogeological limits of the studied zone (b).

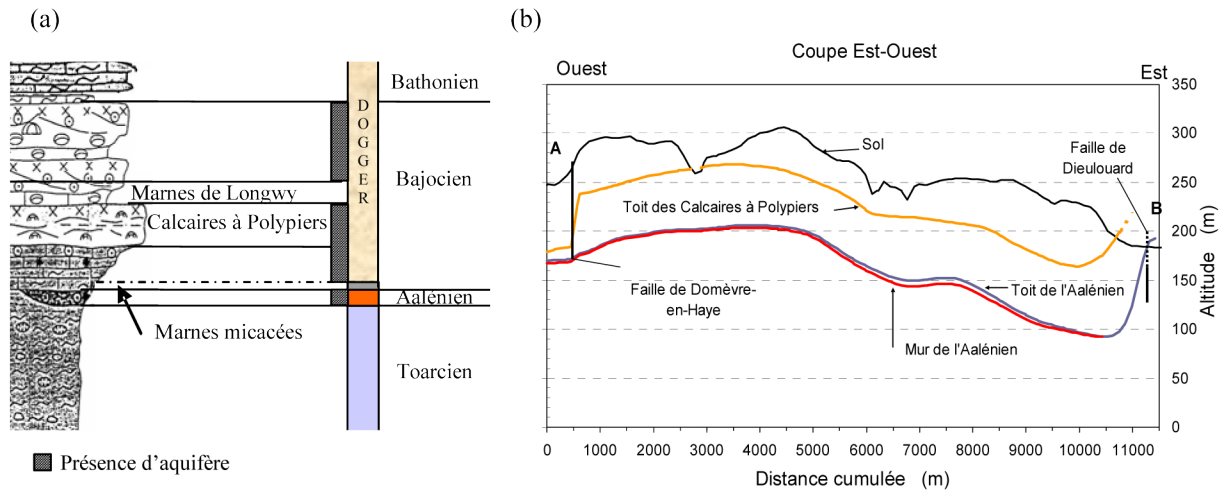


Figure 2. Coupe lithostratigraphique (a) et coupe géologique par interpolation (b) (correspondant à la ligne de coupe de la figure 1).
Lithostratigraphical cut (a) and interpolated geological cut (b) (corresponding to the cut line of Figure 1).

qui est donc alimentée par la nappe susjacent. Les passées marneuses qui séparent ces deux aquifères, le niveau marneux des marnes de Longwy, ne sont pas toujours présentes ni strictement imperméables (AGENCE DE BASSIN RHIN-MEUSE, 1981). Dans ce secteur, le Bajocien inférieur présente un faciès caractéristique nommé « Calcaires à Polypiers » (DEMASSIEUX, 1977; LE NIR, 1973).

Pendant la durée de l'exploitation de la mine, l'assèchement nécessaire des galeries s'est fait sans affecter sensiblement l'aquifère du Dogger (BOULY et DEMASSIEUX, 1984). Après l'ennoyage, en 1982, l'alimentation en eau potable des communes alentours se faisait par un pompage dans un ancien puits d'aéragé de la mine. Mais, suite à l'augmentation régulière de la minéralisation de l'eau, il a été décidé de procéder, à partir de septembre 1987, à un surpompage au sein du réservoir minier afin d'accélérer le renouvellement de l'eau. À cet effet, une pompe a été placée dans une des descenderies de la mine où sont aussi régulièrement observés, et en partie mesurés, des débordements, le système pouvant fonctionner tel un trop plein temporaire.

3. ÉLÉMENTS PHYSIQUES DU MODÈLE

3.1 Numérisation des couches géologiques

Les isohypses des différentes formations définissant le système aquifère ont été numérisées à partir des cartes géologiques, puis interpolées. Des coupes ont été tracées au

travers des grilles ainsi calculées (Figure 2b), ce qui a permis de vérifier leur cohérence.

3.2 Conditions aux limites

La construction du modèle suppose au préalable de pouvoir circonscrire l'ancienne mine à l'intérieur de limites au comportement hydrogéologique connu (Figure 1b) :

- la faille de Domèvre-en-Haye : d'un rejet (compartiment ouest abaissé) pouvant atteindre localement 50 mètres, elle met en contact la base de l'aquifère du Bajocien inférieur et moyen du compartiment ouest avec les terrains imperméables du Toarcien à l'est, empêchant ainsi sur une certaine hauteur un passage latéral de la nappe du compartiment de l'ouest vers l'est. De plus, les failles mettant en contact des terrains différents sont en général peu perméables (ANDERSON et WOESSNER, 1992). Cette limite est considérée comme une limite à flux nul;
- l'Esche : c'est un ruisseau à charge presque constante. L'Aalémien affleure le long d'une partie du ruisseau et l'on montre que l'Esche, alternativement, draine le système aquifère ou comporte des pertes. Cependant, un essai de traçage au niveau des pertes n'a pas permis de retrouver la présence du traceur dans les galeries de mines (LE ROUX et SALADO, 1980). Nous avons donc fait les hypothèses suivantes : sur sa partie drainante, le ruisseau constitue une limite à charge imposée, sur la partie non drainante, c'est une limite à flux nul;
- le Terrouin : l'analyse des esquisses piézométriques à proximité de ce ruisseau montre que le comportement

général du ruisseau semble être celui d'un drain. Il a donc été pris comme limite à charge imposée;

- la Moselle : cette rivière borde l'est et une partie du sud de la zone, dans une vallée très encaissée. Les cartes piézométriques ont permis de conclure que cette rivière draine la nappe du Dogger. Elle a donc été prise comme limite à charge imposée.

3.3 Conditions de recharge

La valeur des pluies mensuelles ainsi que l'estimation de l'évapotranspiration potentielle ont été utilisées. Le calcul de la pluie efficace a ensuite été réalisé par la méthode de Thornwaite, s'appuyant sur la réserve utile du sol. Celle-ci a été discrétisée en cinq secteurs dans la zone modélisée (Figure 3) (TESSIER, 2000). Il a été considéré que 100 % de la pluie efficace s'infiltré.

3.4 Prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP)

Sur les différents forages AEP existant sur la zone d'étude, excepté le puits de la mine, un débit constant correspondant à

une moyenne sur vingt ans a été imposé. Cette approximation est légitime, car ces débits sont relativement faibles, assez peu variables dans le temps s'agissant d'AEP ainsi que des forages éloignés de la zone de galeries.

3.5 Paramètres hydrodynamiques

3.5.1 Conductivité hydraulique

- Dogger : la conductivité hydraulique a été évaluée par la méthode de Lefranc appliquée aux quelques essais de pompage réalisés. Des ordres de grandeur sont ainsi obtenus, mais comme cette zone est le siège de circulations karstiques, toute la conductivité hydraulique doit être augmentée afin d'essayer de rendre compte, en partie, de ce régime hydrogéologique particulier. Le long de la vallée de l'Esche, l'existence de pertes indique le développement d'un réseau karstique localisé; une conductivité hydraulique plus forte a donc été appliquée le long de cette vallée;
- Marnes micacées : il n'y a pas de données de terrain, l'ordre de grandeur, $10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a été choisi en se basant sur des données bibliographiques (SPITZ et MORENO, 1996).

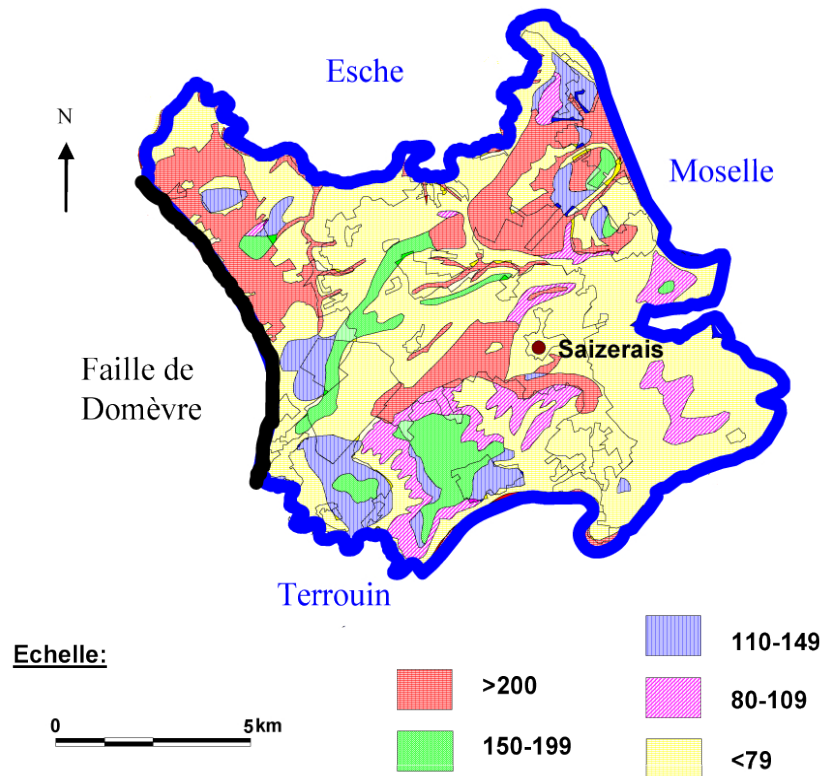


Figure 3. Répartition spatiale des zones de réserve utile en mm.
Spatial distribution of soil available moisture.

Bien qu'aucun foudroyage n'ait eu lieu dans la mine de Saizerais, nous avons considéré que l'extraction du minerai avait tout de même fragilisé la formation ferrifère autour des galeries et que les marnes micacées avaient été affectées par les travaux miniers au droit des galeries : leur conductivité hydraulique y a donc été augmentée;

- Formation ferrière : aucune mesure n'a été relevée et la formation étant composée de calcaires plus ou moins marneux, l'ordre de grandeur choisi a été de $10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (SPITZ et MORENO, 1996). La conductivité hydraulique est considérée comme plus importante au niveau des galeries.

3.5.2 Coefficient d'emmagasinement

Pour la nappe libre du Dogger, la valeur du coefficient d'emmagasinement a été choisie en se référant aux ordres de grandeur habituellement admis pour les formations carbonatées types, compris entre 0,01 et 0,30 (FREEZE et CHERRY, 1979). Mais pour tenir compte de la nature karstique du Dogger dans l'approche « milieu continu » qui est la nôtre, nous avons pris une valeur inférieure à la valeur usuelle du calcaire : en effet, les chemins préférentiels que constituent les conduits karstiques ne permettent pas au milieu poreux d'utiliser sa pleine capacité d'emmagasinement. Pour la nappe captive du Dogger, nous avons utilisé le coefficient d'emmagasinement spécifique, dont l'ordre de grandeur pour une roche fissurée est de 10^{-6} m^{-1} (SPITZ et MORENO, 1996), cette valeur constituant une

limite inférieure pour le Dogger, karstifié seulement en certains endroits.

4. CONSTRUCTION NUMÉRIQUE

4.1 Géométrie

MARTHE est un logiciel développé par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) depuis environ vingt ans (THIERY, 1990), basé sur la méthode des différences finies. La géométrie du modèle a été présentée précédemment. Quatre couches aquifères ont été modélisées (Figure 4) : une pour la formation ferrifère (Aalénien), une pour les marnes micacées, une pour les calcaires à polypiers (Bajocien inférieur), une dernière pour le Bajocien moyen et supérieur. Nous avons distingué deux couches aquifères dans l'aquifère du Dogger afin de simuler la mise en charge de la nappe des calcaires à polypiers, comme cela est observé dans la réalité (le code MARTHE considère que la nappe est captive quand sa charge a atteint la cote du toit de la couche aquifère).

4.2 Réseau de galeries

Les galeries sont modélisées à l'aide de l'option « drain-conduit » : ce « drain-conduit » peut drainer ou alimenter une nappe, il est caractérisé par une charge qui peut varier en régime

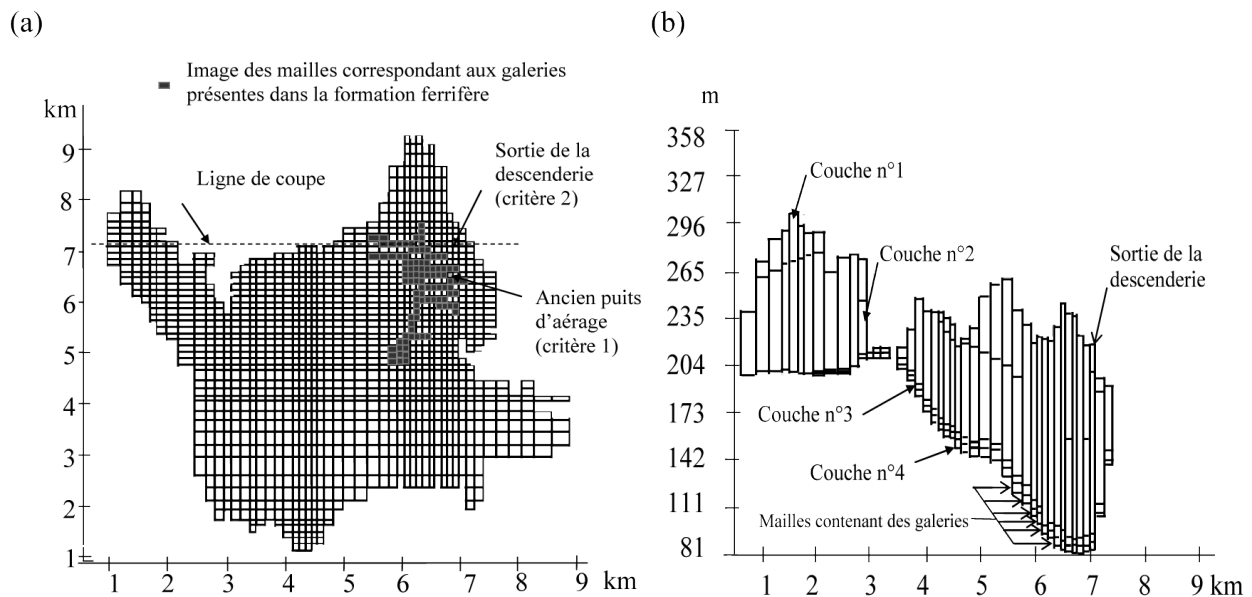


Figure 4. Première couche numérisée du modèle MARTHE, ligne de coupe (a) et les quatre couches numérisées correspondantes (b).

First digitalized layer with the MARTHE code, cross section (a), and the four digitalized corresponding layers (b).

transitoire par son débit circulant et par son débit d'échange $Q_{\text{éch}}$ avec la nappe :

$$Q_{\text{éch}} = C_{\text{éch}} * K_{\text{nappe}} * \text{Sat}_{\text{drain}} * L * (H_{\text{nappe}} - H_{\text{drain}}) \quad (1)$$

où $C_{\text{éch}}$ est un coefficient d'échange qui dépend de l'état du conduit, il vaut « 0 » quand le conduit est imperméable; $C_{\text{éch}}$ est un paramètre de calage; K_{nappe} est la conductivité hydraulique de la couche aquifère; $\text{Sat}_{\text{drain}}$ est une aire d'échange, calculée automatiquement par le code en fonction de la géométrie du drain; « L » est la longueur du drain; $(H_{\text{nappe}} - H_{\text{drain}})$ est la différence entre la charge dans la nappe et le drain. Les tronçons de drain sont implantés dans la couche de la formation ferrifère (Figure 4), ont 190 m de largeur, une longueur variant de 200 m à 400 m, une hauteur variant de 1,5 m à 2,8 m, ce qui permet de respecter le volume de vide calculé pour le réservoir minier, soit 8,9 millions de m^3 dans la formation ferrifère (COLLON *et al.*, 2000).

4.3 Calage de 1981 à septembre 1987

Le calage, réalisé au pas de temps mensuel, entre 1981 et août 1987, date à laquelle débute la phase de surpompage, a permis d'ajuster la valeur des différents paramètres (Tableau 1).

Pour juger de l'ajustement du modèle aux mesures, on a tout d'abord comparé le niveau piézométrique mesuré dans l'ancien puits d'aéragé de la mine (positionné sur la figure 4a) à celui calculé par le modèle (Figure 5a). Puisque le modèle suit un pas de temps mensuel et que les valeurs calculées

correspondent à la fin d'une simulation sur un mois, on ne peut comparer les valeurs calculées à chaque pas de temps qu'avec des mesures de niveau réalisées en fin de mois. Quand cette donnée était disponible, elle a été utilisée, sinon on a pris en compte des valeurs de niveau interpolées (COLLON *et al.*, 2000), à condition que la mesure la plus proche ne soit pas éloignée de plus de deux jours. Nous avons aussi comparé le volume débordé cumulé issu des mesures effectuées à la sortie de la descenderie (positionnée sur la figure 4a et 4b), qui déborde régulièrement et ce même volume calculé par le modèle (Figure 5b). D'après PETIT (1995), la précision des mesures de débits de débordement est de 15 %.

5. RÉSULTATS

Avec la période de surpompage qui débute en septembre 1987, le suivi des débordements n'a plus été assuré : n'ayant donc aucune donnée fiable relative à ceux-ci, la comparaison entre valeurs calculées et mesurées ne porte que sur la charge mesurée dans l'ancien puits d'aéragé de la mine. La simulation réalisée sur la période allant d'octobre 1987 à décembre 1993 reproduit assez correctement la variation réelle (Figure 6).

Nous avons de plus réalisé une analyse de sensibilité sur la période allant de juillet 1981 à août 1987. S'il apparaît en premier lieu que la phase de remplissage de la mine (juillet 1981-mars 1982, figure 5a) est très sensible à toute variation de paramètres, pour la période qui suit, le modèle se révèle assez robuste en ce qui concerne la charge hydraulique

Tableau 1. Valeurs des paramètres hydrodynamiques issues du calage.
Table 1. Values of hydrodynamical parameters from the model calibration.

Conductivité hydraulique du Dogger ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Conductivité hydraulique générale des marnes micacées ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	10^{-9}
Conductivité hydraulique des marnes micacées au droit des galeries ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$3 \cdot 10^{-9}$
Conductivité hydraulique générale de la formation ferrifère ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$5 \cdot 10^{-8}$
Conductivité hydraulique de la formation ferrifère au droit des galeries ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$9,5 \cdot 10^{-7}$
Coefficient d'échange nappe-conduit	2
Coefficient d'emmagasinement du Dogger (nappe libre)	0,0025
Coefficient d'emmagasinement des marnes micacées et de la formation ferrifère	0,01
Coefficient d'emmagasinement spécifique du Dogger (nappe captive) (m^{-1})	10^{-5}
Coefficient d'emmagasinement spécifique des marnes micacées et de la formation ferrifère (nappe captive) (m^{-1})	10^{-5}

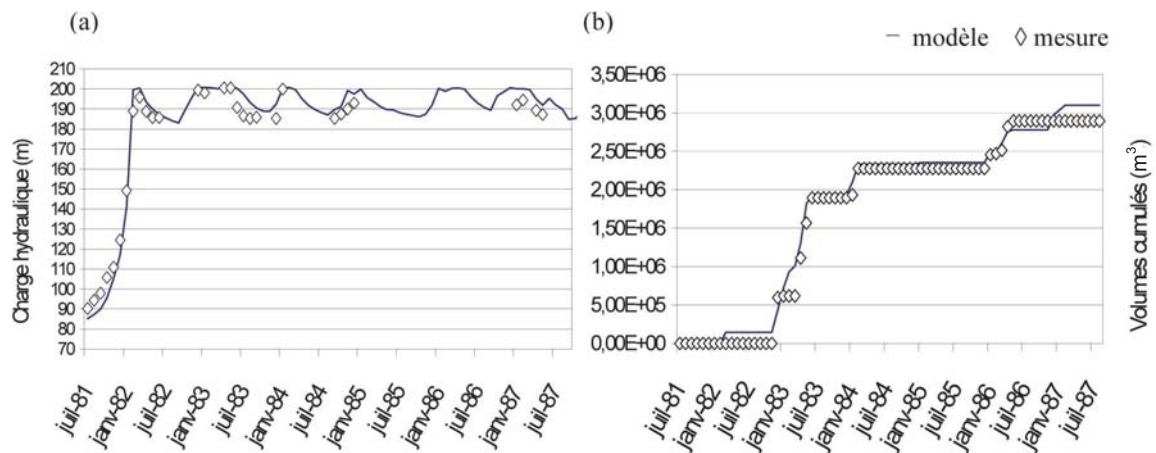


Figure 5. Résultat du calage sur la charge hydraulique dans l'ancien puits de mine (a) et sur les volumes débordés (b) depuis la phase de remplissage jusqu'en septembre 1987.
Result of the calibration for the hydraulic head (a) in the old mine well and overflowing flows (b) from the filling phase until September 1987.

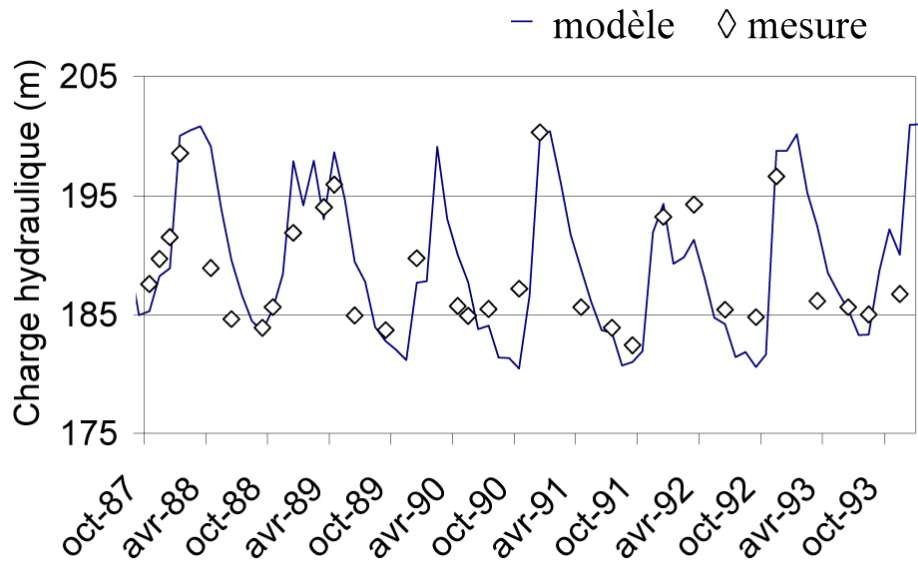


Figure 6. Résultat de la simulation après calage d'octobre 1987 à décembre 1993 sur la charge hydraulique dans l'ancien puits de mine.
Results of simulation after calibration from October 1987 to December 1993 on the hydraulic head in the old mine well.

dans les puits de la mine et les volumes cumulés débordés. Nous ne faisons figurer que les résultats de l'analyse concernant les variations du coefficient d'emmagasinement du Dogger dans le cas de la nappe libre (Figure 7). Nous pouvons notamment souligner qu'en ce qui concerne ce coefficient, la variation de +300 % donne à ce paramètre une valeur plus commune pour un calcaire. Néanmoins, l'écart entre les valeurs observées et calculées qui s'ensuit illustre la nécessité de prendre un coefficient très faible, afin de tenter de reproduire des écoulements dans un milieu fracturé karstique.

6. CONCLUSIONS

L'objectif du travail exposé dans cet article était de tester la faisabilité d'une modélisation hydrodynamique spatialisée d'un système hydrogéologique particulièrement complexe : une ancienne mine de fer du bassin ferrifère lorrain, alimentée par un aquifère calcaire fracturé multicouche localement karstifié. Les résultats de cette modélisation sont satisfaisants sur les

points suivants : (i) le calage reproduit plutôt bien l'évolution des deux critères de calage utilisés; (ii) les valeurs des paramètres hydrodynamiques issues du calage respectent des ordres de grandeur couramment admis, excepté en ce qui concerne ceux du Dogger, ceci étant dû à sa nature karstique; (iii) l'utilisation de la fonctionnalité drain-conduit du code MARTHE permet un certain respect de la géométrie du réseau de galeries et de leur état de connexion avec l'aquifère environnant; (iv) l'analyse de sensibilité prouve une relative robustesse du modèle après la phase de remplissage; (v) enfin, la simulation sur près de six ans permet de vérifier une certaine valeur prédictive du modèle.

Si le manque de données, notamment piézométriques, affecte la capacité de prévision du modèle, l'étude réalisée ouvre toutefois la perspective d'une meilleure compréhension par la modélisation spatialisée des régimes hydrogéologiques des anciennes mines. La démarche modélisatrice permet en outre une approche quantitative des problèmes, ici hydrogéologiques, liés à la fermeture des mines, ce qui constitue un outil appréciable dans la gestion de cette question, dont les répercussions économiques, écologiques et sociales sont souvent importantes.

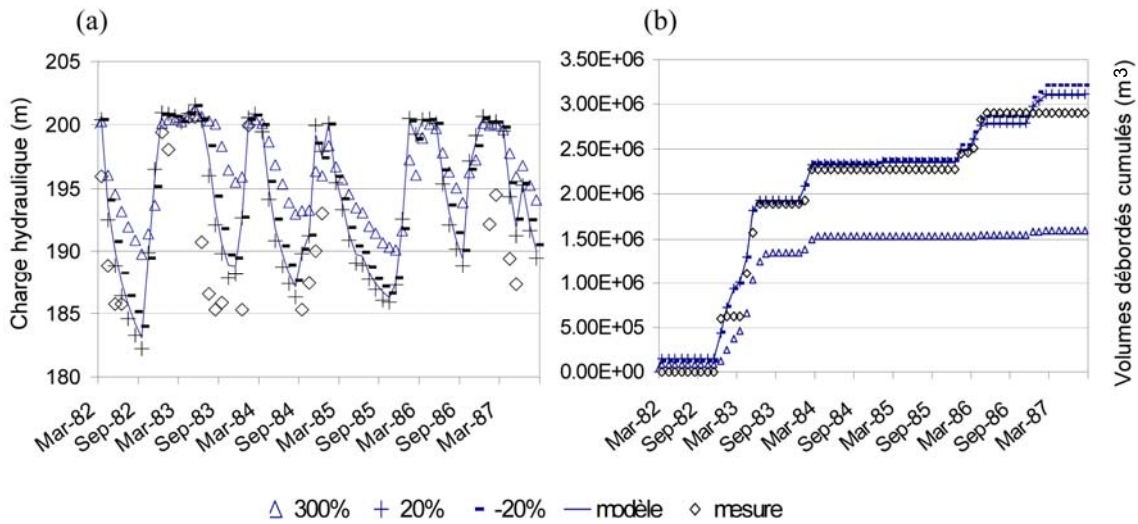


Figure 7. Analyse de sensibilité au coefficient d'emmagasinement du Dogger (nappe libre) sur la charge hydraulique dans l'ancien puits de la mine (a) et sur les volumes débordés cumulés (b).

Sensitivity analysis of the influence of the Dogger storage coefficient (unconfined) on the old mine well hydraulic head (a) and on overflowing volumes (b).

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGENCE DE BASSIN RHIN-MEUSE (1981). *Bassins versants souterrains dans les calcaires de Lorraine*. Document N° 7850, Moulins-les-Metz, France, 17 p.
- ANDERSON M.P. et W.W. WOESSNER (1992). Applied groundwater modelling; Simulating Flow and Advective Transport, *Academic Press, Inc.*, San Diego, California, 381 p.
- BOULY S. et L. DEMASSIEUX (1984). *Rapport géologique relatif à la détermination des périmètres de protection du captage dit de la Mine de Saizerais*. Rapport ENSG-INPL, Laboratoire d'hydrogéologie et d'hydraulique appliquée 431-54-2-84, France, 11 p.
- BUBENICEK L. (1970). *Géologie des gisements de fer de Lorraine*. Thèse Sciences, Univ. de Nancy, France, Publ. I.R.S.I.D., 146 p.
- COLLON P., R. FABRIOL et M. BUÈS (2005). *Evolution of water quality in the abandoned iron mines of Lorraine: towards a semi-distributed modelling approach*. *CR Geosci.*, 337, 1492-1499.
- COLLON P., R. FABRIOL et L. VAUTE (2000). *Simulation de l'évolution de la concentration en sulfate dans l'eau de la mine de fer de Saizerais (Lorraine)*. Rapport BRGM/RP-50456-F, France, 81 p.
- DEMASSIEUX L. (1977). *Étude géologique et hydrogéologique des calcaires du Dogger dans l'Est toulousain*. Rapport Agence Financière du Bassin Rhin-Meuse-Direction Départementale de l'Équipement-INPL. Document N° 4926, Moulins-les-Metz, France, 31 p.
- FREEZE R.A. et J.A. CHERRY (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 pp.
- LE NIR M. (1973). *Exhaure des mines de fer du bassin lorrain*. Rapport BRGM 73 SGN 320 NES , 21 p.
- LE ROUX J. et J. SALADO (1980). *Fonctionnement des aquifères calcaires lorrains déduit des expériences de traçages colorimétriques*. Service Régional de l'Aménagement des Eaux de Lorraine Centralisateur du Bassin Rhin-Meuse. Document N° 7447, Metz, France, pp. 85-93.
- PETIT V. (1995). *Dossier préparatoire à la mise en place des périmètres de protection du captage de la mine de Saizerais*. Rapport ANTEA A 03039, commune de Pont-à-Mousson, France, 21 p.
- SPITZ K. et J. MORENO (1996). *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. ISBN: 978-0-471-13687-3, JOHN WILEY & SONS (Éditeurs), New York, NY, USA, 460 p.
- TESSIER D. (2000). *Étude du bilan de l'eau dans le Dogger lorrain, importance du sol et de son usage*. Rapport du contrat B01492 INRA-Agence de l'eau Rhin-Meuse, Versailles, France, 43 p.
- THIERY D. (1990). *Logiciel MARTHE, version 4.3, notice d'utilisation*. Rapport BRGM R 32 210, Orléans, France, 356 p.
- VAUTE L. et G. FRAPPIER (2004). *Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2003*. Rapport BRGM/RP-53276-FR, France, 108 p.