

Une méthode de modélisation hydrogéologique inverse appliquée à un problème d'ingénierie : l'abaissement du niveau d'un réservoir minier ennoyé dans le bassin ferrifère lorrain

L. VAUTE
D. NGUYEN THE
R. FABRIOL
J.-L. PINAULT
J.-C. BAUBRON

BRGM
1, av. du parc de Brabois
54500 Vandœuvre-lès-
Nancy Cedex
l.vaute@brgm.fr

Résumé

Le bassin ferrifère lorrain est un système hydrodynamique et chimique complexe, formé par la superposition de deux grands aquifères en excellente relation hydraulique : un calcaire fracturé et localement karstique (nappe du Dogger), et un aquifère artificiel constitué de grands vides anastomosés (réservoir minier). Une nouvelle galerie de débordement en cours de création à l'exutoire du réservoir Sud sera achevée en 2003, dans le but d'abaisser de façon définitive le niveau du réservoir de 3,6 m. Cette opération permettra de supprimer les nuisances (inondations chroniques) dues à l'existence de fuites du réservoir vers la plaine alluviale constituant le soubassement de la ville de Moyeuve-Grande. On présente dans cet article la méthode de modélisation mise en œuvre en 1999, dont l'objectif était de fournir les éléments chiffrés au dimensionnement du nouvel ouvrage. Les résultats de cette première modélisation sont validés par les résultats obtenus avec les nouvelles données acquises depuis lors : nouvel ajustement du modèle en 2001 avec deux années supplémentaires de données, et comparaison aux résultats de mesures obtenus lors de l'opération de pompage à gros débit en 2002. La méthode de modélisation globale inverse mise en œuvre pour résoudre ce problème pratique d'ingénierie civile s'est avérée efficace, économe en temps de calcul comme en temps de mise en œuvre, et bien adaptée au problème posé.

Mots-clés : bassin ferrifère lorrain, réservoir minier, ennoyage, abaissement, modèle inverse.

A method of hydrogeological inverse modeling applied to a problem of engineering : the lowering of the level of a mine-water reservoir in the Lorraine iron-ore basin

Abstract

The Lorraine iron-ore basin is a hydrodynamic and chemical complex system, formed by the superposition of two large aquifers in excellent hydraulic relation : a fractured and locally karstic limestone (aquifer of the Dogger), and an artificial aquifer made up of large braided vacuums (mine-water reservoir in the flooded mines). A new overflow gallery in construction at the discharge point of the Southern reservoir will be completed in 2003, with an aim of lowering in a definitive way the level of the reservoir (-3,6 m). This operation will make it possible to remove the chronic floods due to the existence of leakages from the reservoir towards the alluvial plain on which the town of Moyeuvre-Grande is settled. This publication presents the method of modeling implemented in 1999, whose objective was to allow the dimensioning of the new overflow gallery. The results of this first modeling are validated by the results obtained with the new data since then gathered : new adjustment of the model in 2001 with two additional years of data, and comparison with the results of measurement obtained at the time of a high flow pumping operation in 2002. The method of inverse modeling implemented to solve this practical problem of engineering proved to be effective, sparing in computing times as in times of implementation, and well adapted to the problem.

Key words : Lorraine iron-ore basin, mine-water reservoir, mine flooding, level lowering, inverse modeling.

1

Introduction

Pendant plus d'un siècle, les mines de fer de Lorraine ont exploité une couche minéralisée riche en minerai de fer (Aalénien) entre les vallées de la Moselle et de la Meuse (Fig. 1). Le minerai était extrait de la manière suivante : des galeries étaient percées (*tracage*), puis le minerai était extrait entre les galeries jusqu'à ne laisser que de minces piliers (*dépilage*), enfin les piliers étaient détruits à l'explosif (*foudroyage*). Au droit des zones ainsi *foudroyées*, l'effondrement des galeries abandonnées a provoqué la fracturation de l'écran imperméable qui séparait la formation ferrifère et les calcaires du Dogger sus-jacents, et a causé le rabattement progressif de la vaste nappe des calcaires du Dogger dans les galeries minières. Pendant toute la durée de l'exploitation minière, cette eau a été pompée et rejetée massivement dans les cours d'eau (exhaure).

La fermeture des exploitations minières et l'arrêt généralisé des pompes d'exhaure au niveau des parties Centre et Sud du bassin ferrifère lorrain sont à l'origine de l'ennoyage progressif des mines abandonnées (Fig. 2). La remontée du niveau de l'eau dans les

terrains s'est poursuivie jusqu'à ce qu'un équilibre soit trouvé entre les apports d'eau (la pluie), d'une part, et les débits de débordement (galeries aménagées), de fuite et de drainage (sources), d'autre part.

L'ennoyage du réservoir Sud, dont le volume est d'environ 230 millions de m³, a commencé en février 1995, date de l'arrêt des exhaures. A la fin du mois de juin 1998, le niveau d'eau s'était élevé de 205 m, à une vitesse moyenne de 15 cm/jour (Fig. 3). A partir du mois de juillet 1998 et jusqu'au débordement qui s'est produit à la fin du mois d'octobre 1998, la progression moyenne a ralenti fortement, pour atteindre une valeur de 2,5 cm/jour (Vaute, 2000).

Ce ralentissement est lié à l'apparition de fuites au-dessous de la cote de débordement de la galerie de Moyeuvre-Grande (172,43 m NGF), une galerie spécialement aménagée pour évacuer les eaux de débordement du réservoir Sud vers la rivière Orne toute proche. La création de cet exutoire naturel parasite a eu pour conséquence la montée du niveau piézométrique dans la nappe alluviale constituant le soubassement de la ville de Moyeuvre-Grande (Baubron, 1998), provoquant l'inondation des sous-sols enterrés d'une partie de la ville. La mise en place de puits de pompes à gros débit et de pompes de surface indivi-

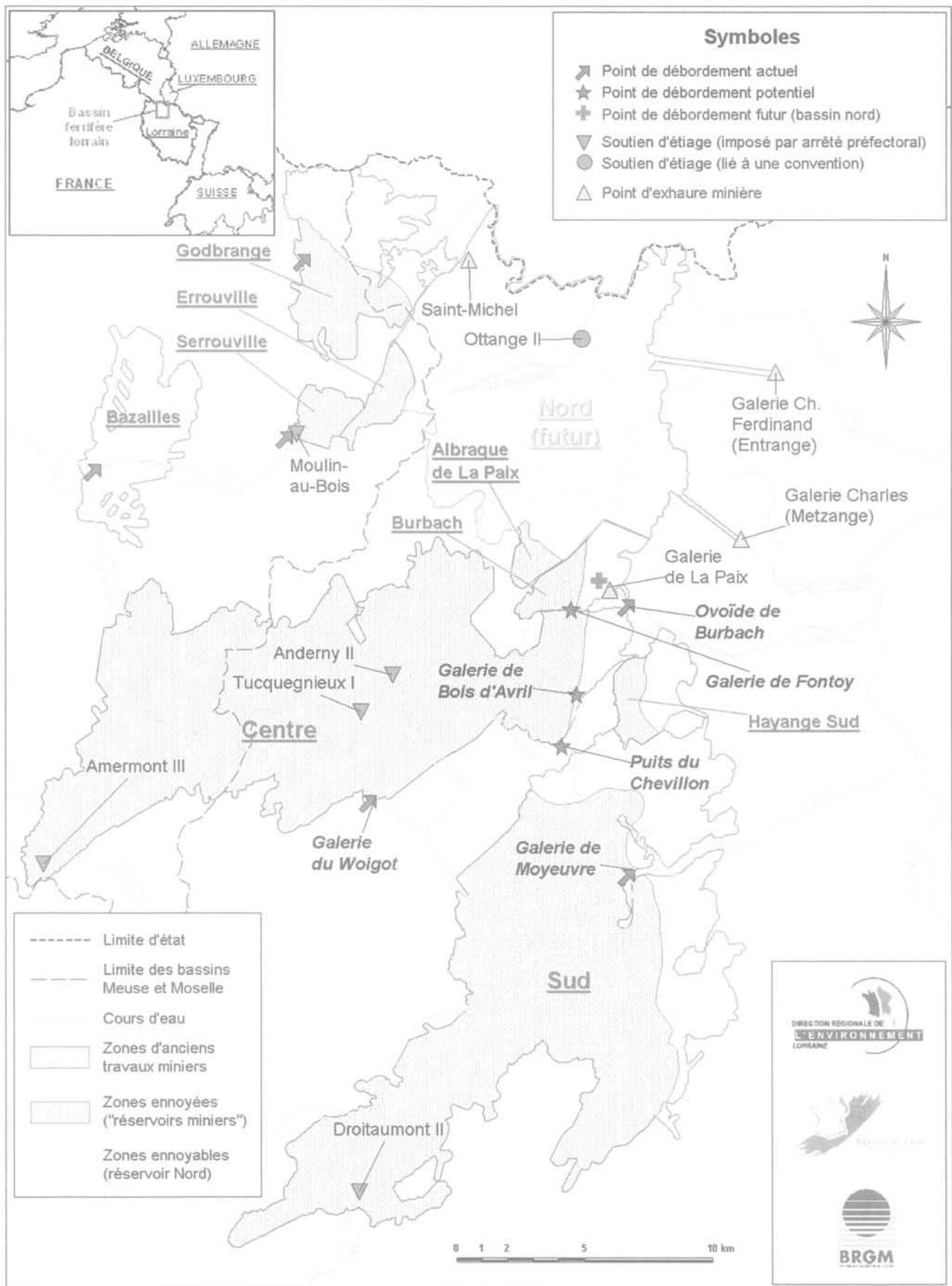


FIG. 1 Carte simplifiée du bassin ferrifère lorrain en 2002 (Vaute *et al.*, 2002).
 Simplified map of Lorraine iron-ore basin in 2002 (Vaute *et al.*, 2002).

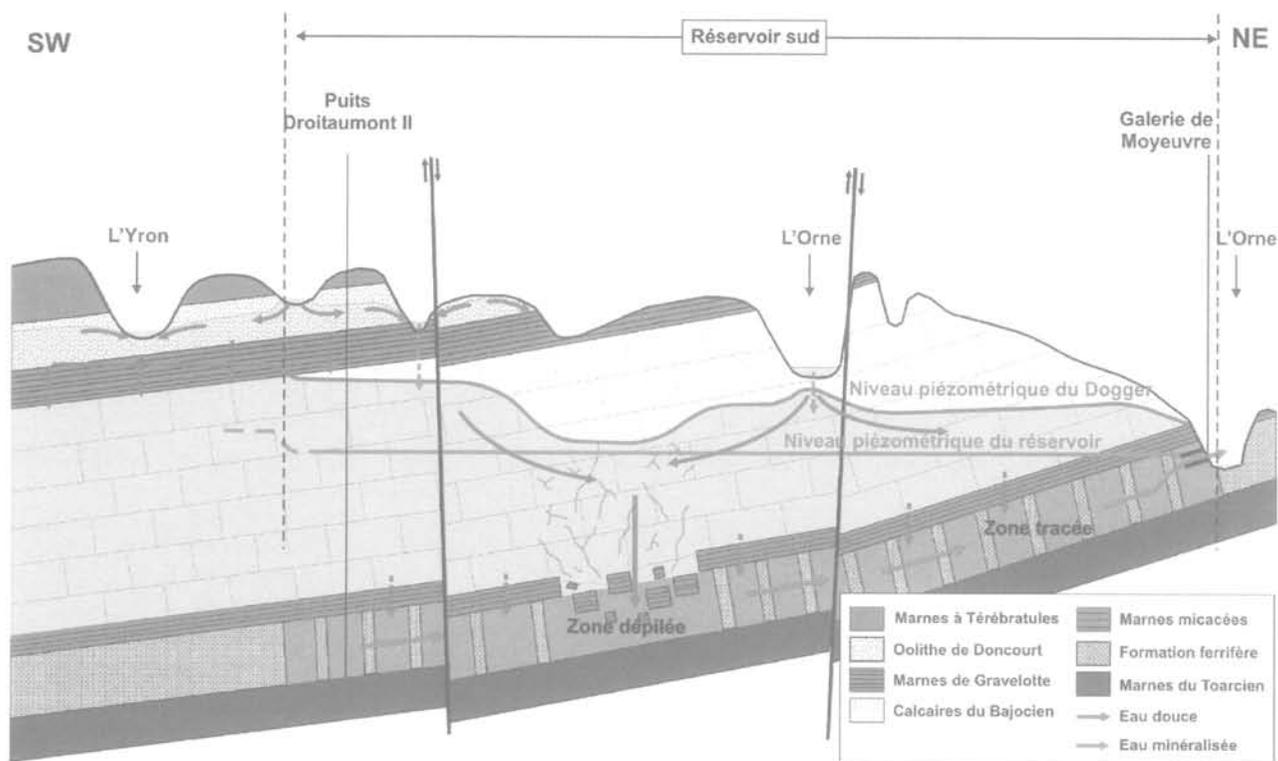


FIG. 2 Coupe hydrogéologique schématique du bassin Sud (Vaute et al., 2002).
Schematic hydrogeological cross-section of the South mine-water reservoir (Vaute et al., 2002).

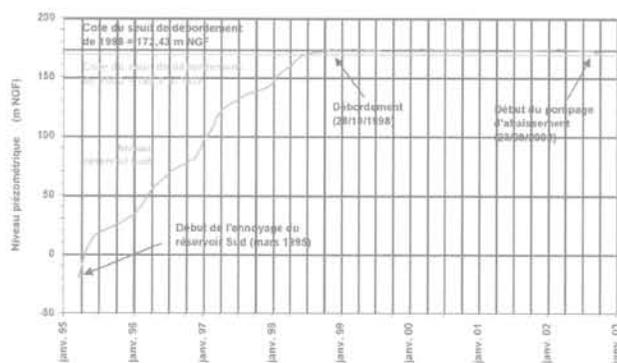


FIG. 3 Évolution du niveau piézométrique du réservoir minier Sud depuis le début de son envoi.
Evolution of the level of the South mine-water reservoir since the beginning of its flooding.

duelles dans chaque cave inondée n'a pas permis de résoudre le problème de façon satisfaisante et définitive.

Dans le but de mieux comprendre et de quantifier les phénomènes mis en jeu, plusieurs études et investigations sur le terrain ont donc été engagées par l'État dès

1998. Au vu des résultats, l'État a décidé de créer une nouvelle galerie de débordement, dont le seuil sera 3,63 m plus bas que le seuil actuel, et qui pourra laisser s'écouler un débit de débordement maximal de 10 m³/s. Ces caractéristiques permettront de maintenir hors d'eau les sous-sols des habitations concernées et ce même dans les plus sévères conditions (crue centennale).

Les travaux, en grande partie réalisés et dont l'achèvement est prévu pour le second semestre 2003, ont consisté à excaver, dans la plaine alluviale et entre parois moulées, un chenal de rejet d'une longueur totale de 450 m. La jonction entre ce chenal et les ouvrages d'infrastructure minière envoyés, eux-mêmes en bonne communication hydraulique avec l'ensemble du réservoir et préalablement confortés et calibrés, doit être assurée par un tunnel de 120 m de longueur et de 25 m² de section. Un système de fermeture automatique du chenal a été mis en service au point de jonction entre la galerie et le chenal, afin d'empêcher les crues de l'Orne de pénétrer dans la mine.

Une modélisation hydrogéologique inverse réalisée par le BRGM Lorraine avait permis de fournir les éléments chiffrés nécessaires au dimensionnement du nouvel ouvrage (Vaute et Pinault, 1999). On présente dans cet article la méthode de modélisation mise en œuvre en 1999, ainsi que la validation des résultats obtenus avec les nouvelles données acquises depuis lors (2001 et 2002).

Modélisation inverse du système réservoir minier/nappe alluviale/Orne (1999)

2.1

Choix d'une méthode de modélisation

Le système à modéliser diffère fortement de la plupart des aquifères par sa géométrie et l'organisation des écoulements. Le réseau de galeries d'exploitation est développé principalement dans trois couches superposées, légèrement inclinées, et connectées en différents points. Dans chaque réservoir, les niveaux piézométriques mesurés en différents points sont très proches (de l'ordre d'une dizaine de cm de différence pour une distance de 10 km), ce qui démontre l'excellente continuité hydraulique existant en leur sein (Fig. 2). Le battement maximal du niveau du réservoir Sud est de moins de 1 m.

D'autre part, l'ennoyage des réservoirs a provoqué une forte remontée de la nappe des calcaires du Dogger à la périphérie et au centre des bassins. Des mesures effectuées sur des doublets de piézomètres (nappe des calcaires et réservoir minier) permettent de préciser l'organisation des écoulements dans la nappe des calcaires (Vaute, 2001) : en bordure immédiate des réservoirs ennoyés, mais à l'écart des travaux miniers, on observe que le niveau de la nappe des calcaires est supérieur de 10 à 20 mètres au niveau du réservoir minier ; à l'aplomb des zones tracées, le niveau de la nappe du Dogger est supérieur de 1 à 2 m au niveau du réservoir minier ; enfin, à l'aplomb des zones dépilées, le niveau de la nappe est supérieur de quelques dizaines de cm seulement au niveau du réservoir minier (Fig. 2). Le réservoir minier ennoyé a donc un rôle de drainage général de la nappe du Dogger. Ainsi, au-dessus des travaux miniers, la surface piézométrique de la nappe principale des calcaires du Dogger est déprimée, et présente probablement un relief « bosselé » : les creux correspondraient aux zones de drainage plus important (zones dépilées ou fracturées), les bosses seraient liées aux zones de drainage moindre (zones tracées ou de perméabilité verticale plus faible). D'une manière générale, les conditions d'écoulement locales induisent une grande variabilité des niveaux de la nappe des calcaires du Dogger à l'aplomb des travaux miniers.

Les codes de calcul hydrogéologiques courants ne sont pas conçus pour traiter facilement de telles configurations hydrauliques. Le développement (ou la modification) de codes capables de simuler l'écoulement dans de tels réseaux (Lanini et Fabriol, 2000; Fabriol *et al.*, 2000; Lucas et Vaute, 2001) est un des axes de travail du GISOS. D'autre part, même si l'on avait pu disposer d'un code adapté au problème, on n'aurait pas disposé au moment de la réalisation de l'étude de suffisamment d'informations réparties dans l'espace pour le mettre en œuvre.

La complexité de la structure du système hydrologique à modéliser et l'absence de données spatialisées ont donc imposé dans un premier temps la mise en œuvre d'une modélisation *globale*, basée sur l'analyse des séries de données disponibles. L'approche choisie fut la modélisation *globale inverse* des séries chronologiques de hauteurs de pluie, d'évapotranspiration

potentielle et de débits par des méthodes dérivées du traitement du signal. Le code de calcul utilisé pour le traitement des séries de données chronologiques, TEMPO®, a été développé au BRGM et appliqué dans différents contextes (Pinault et Baubron, 1996; Pinault *et al.*, 2001a; Pinault *et al.*; 2001b).

2.2

Principe de la méthode de modélisation inverse mise en œuvre

Un réservoir minier peut être considéré comme un système de transformation d'un signal d'entrée (la pluie) en un signal de sortie (le débit de débordement). Pour chacun des réservoirs, on cherche à calculer une relation quantitative reliant la pluie mesurée et le débit de débordement observé. On souhaite cependant n'introduire aucune hypothèse à propos de la structure interne du réservoir (types d'écoulement, porosité, perméabilité, etc.), d'une part parce qu'on ne dispose pas de ces informations de manière suffisamment détaillée, d'autre part pour éliminer toute sorte d'*a priori*. On n'introduit donc aucun paramètre décrivant une propriété physique du système dans le modèle.

Du point de vue mathématique, l'opération consistant à calculer, pour un système, la relation existant entre un signal d'entrée et un signal de sortie s'appelle une déconvolution – ou plus exactement une identification de réponse impulsionnelle. Le résultat du calcul est une courbe fonction du temps, appelée *réponse impulsionnelle*. Cette courbe représente la réponse du système à une impulsion unité du signal d'entrée, lorsque le système est au repos (c'est-à-dire lorsque le signal de sortie n'est plus influencé par les impulsions que le système a reçues auparavant). Une fois que la réponse impulsionnelle a été identifiée, on peut prévoir la réponse du système à n'importe quel signal d'entrée, au moyen de l'opération mathématique inverse de la déconvolution : la convolution du signal d'entrée par la réponse impulsionnelle. On dispose alors d'un moyen de faire des prévisions.

En réalité, dans le cas de systèmes hydrologiques, la déconvolution ne peut pas être réalisée directement entre la pluie et le débit. En effet, la relation entre ces deux variables n'est pas linéaire : selon la saison, une même hauteur de pluie tombée ne provoque pas la même augmentation de débit parce qu'il y a plus d'évapotranspiration en été qu'en hiver. L'opération de déconvolution n'étant possible que sur un système linéaire, il faut au préalable déterminer la part de la pluie qui alimente réellement le système, c'est-à-dire la *pluie efficace* (pluie brute diminuée de la part qui s'évapore ou qui est transpirée par la végétation), ou plus exactement une *approximation numérique de la variable physique pluie efficace*.

Le calcul intermédiaire de la pluie efficace nécessite alors l'introduction d'une nouvelle variable en entrée du système, permettant de prendre en compte la variation saisonnière du climat. Cette nouvelle variable est l'évapotranspiration potentielle (ETP). Mais la prise en compte d'un indice des variations climatiques se fait au prix d'une complexification de la procédure de déconvolution, qui doit désormais se faire de manière itérative.

Finalement, les variables d'entrée du système sont la pluie et l'évapotranspiration potentielle. La solution du modèle global inverse obtenue par itérations est un jeu de trois réponses impulsionnelles, permettant

d'ajuster au mieux le débit observé en sortie du système, grâce à une série de convolutions à partir des variables d'entrées (Fig. 4). Dans le cas d'une modélisation pluie/débit à l'exutoire d'un bassin versant, on peut être amené à résoudre le problème en calculant un jeu de 5 réponses impulsionnelles, de manière à simuler des événements non-linéaires (par exemple un changement du régime d'écoulement lorsque les sols sont saturés, provoquant l'apparition de pics de crue exceptionnels).

2.3

Les différents modèles associés aux chroniques de données disponibles en 1999

Plusieurs modèles ont été construits de manière à répondre aux diverses questions liées à la création du nouvel ouvrage : pour différentes périodes de retour, quels seront le débit de débordement et le niveau du réservoir ? Quelles seront les valeurs correspondantes du débit et du niveau de l'Orne au droit du futur seuil de débordement ? Comment évolueront dans le temps ces différents niveaux et débits ? Faut-il prévoir un système de fermeture du futur ouvrage, empêchant les crues de l'Orne de pénétrer dans la mine ? Quel serait l'impact du fonctionnement du système de fermeture sur le niveau dans le réservoir ? Comment évoluera le niveau de la nappe alluviale dans ces périodes de crue ?

a) Modèle inverse *pluie/ETP - débit de débordement du réservoir Sud* : ajusté sur 1 an seulement (1998-1999), il permet la prévision du débit de débordement de l'ouvrage actuel à partir de la pluie et de l'ETP. La réponse impulsionnelle calculée et l'ajustement de ce modèle aux mesures sont présentés sur les figures 5 et 6 (modèle 1999).

b) Relation *débit de débordement - niveau du réservoir minier* : la conversion du débit en niveau est effectuée grâce à des hypothèses de relation débit-niveau (courbes de tarage), liées au dimensionnement du futur ouvrage.

c) Modèle inverse *pluie/ETP - débit de l'Orne* : ajusté sur 10 ans (1989-1999), il permet la prévision du débit de l'Orne à partir de la pluie et de l'ETP.

d) Relation *débit de l'Orne - niveau de l'Orne* : la conversion du débit de l'Orne en niveau au droit du futur ouvrage est réalisée grâce aux résultats de la modélisation hydraulique du lit de l'Orne effectuée par ANTEA (Chevalier, 1999).

Il n'a pas été possible de construire un modèle de prévision du niveau de la nappe alluviale en raison de l'absence de mesure avant l'apparition des inondations dans les sous-sols des habitations. Cependant, il est apparu qu'il suffisait que le niveau de l'eau dans le réservoir minier ne dépasse pas - ou pas longtemps - la cote 170,5 m NGF pour supprimer la nuisance.

2.4

Principaux résultats des simulations de 1999

L'étude des pluies ayant provoqué des crues de l'Orne de 1980 à 1999 a permis d'identifier les séquences de pluie nécessaires et suffisantes pour provoquer une crue de période de retour donnée. Ces séquences de pluie définies de manière semi-empirique constituent alors les entrées du modèle inverse *pluie/ETP - débit de l'Orne*, et permettent de reconstituer les débits moyens journaliers de l'Orne de même période de retour. On vérifie que les débits ainsi calculés s'écartent de moins de 10 % des valeurs théoriques issues d'un ajustement à une loi de Gumbel des débits moyens journaliers observés de 1980 à 1999.

En appliquant les mêmes séquences de pluie en entrée du modèle inverse *pluie/ETP - débit de débordement du réservoir Sud*, on peut calculer les débits de débordement de l'ouvrage actuel pour chaque période de retour. Les débits de débordement de période de retour 1/2, 1/10, 1/25 et 1/100 ainsi calculés sont respectivement de 6,6 ; 8,4 ; 9,3 et 10,7 m³/s.

La conversion du débit de débordement du nouvel ouvrage en niveau piézométrique dans le réservoir est

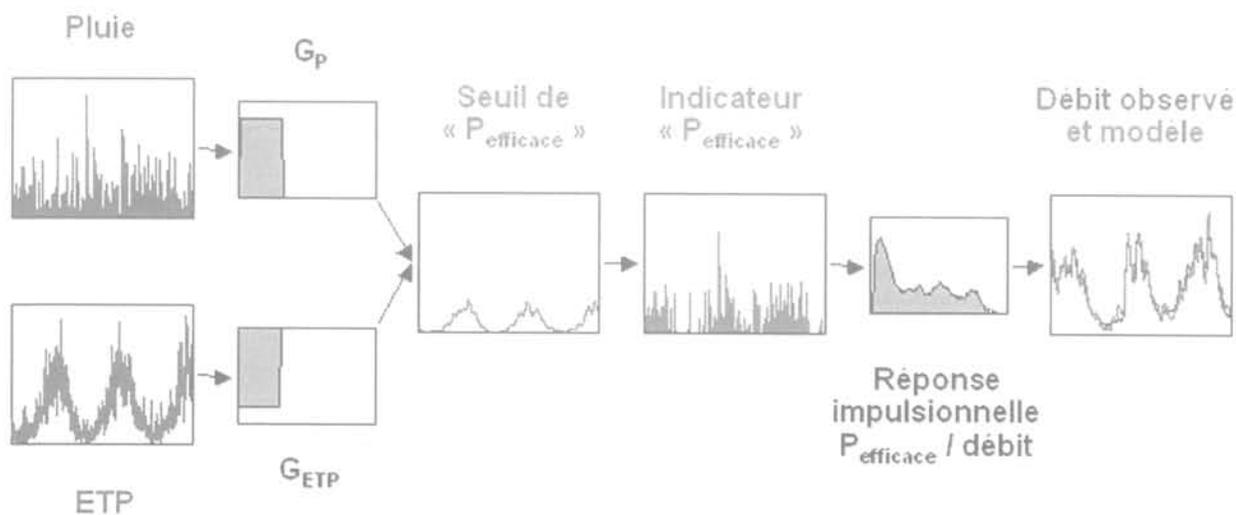


FIG. 4 Schéma de calcul du modèle inverse du débit de débordement du réservoir Sud. Diagram of calculation for the inverse model of the South mine-water reservoir overflow.

réalisée grâce à une hypothèse de relation débit-niveau (courbe de tarage) liée au dimensionnement du futur ouvrage. L'hypothèse retenue correspond à un ouvrage plus fortement dimensionné que la galerie de débordement initialement en service : pour un débit de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, le niveau d'eau se situera à 1,45 m au-dessus du seuil.

Enfin, la conversion du débit de l'Orne en niveau au droit du futur ouvrage est réalisée grâce aux résultats de la modélisation hydraulique du lit de l'Orne.

Les résultats sont illustrés sur la figure 7, pour une crue centennale. Dès que le niveau de l'Orne dépasse la cote du niveau dans le réservoir minier, on simule la fermeture de l'ouvrage de débordement : le débit n'est plus évacué, et le volume stocké provoque une surcote du niveau. Dès que le niveau de la mine redevient supérieur à celui de l'Orne, l'ouvrage de débordement est rouvert, mais le débit ne peut être évacué qu'à un débit limité à $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (limite de dimensionnement du canal d'évacuation des eaux de débordement vers l'Orne). Le volume stocké lors de la fermeture de l'ouvrage est donc éliminé progressivement, à un débit qui est le complément à $10 \text{ m}^3/\text{s}$ de celui du débordement normal (débit provoqué par la pluie et évacué en totalité).

Il apparaît ainsi que la surcote imposée par le fonctionnement de la vanne de fermeture de l'ouvrage de débordement est pénalisante. Mais il reste exclu de ne pas installer de dispositif de fermeture : en cas d'invasissement du réservoir minier par les eaux de l'Orne à un débit incontrôlable (le débit de l'Orne peut atteindre près de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ en très forte crue), le niveau dans la mine s'élèverait de plusieurs mètres, ce qui entraînerait à nouveau l'inondation des sous-sols. De plus, un tel envahissement provoquerait une contamination périodique du réservoir.

La durée de dépassement de la cote 170,5 m dans le réservoir minier pour l'hypothèse de dimensionnement retenue est de 37 jours en crue centennale (événement extrêmement rare), et de 13 jours en crue décennale (durée jugée acceptable).

2.5

Limitations de la méthode

La principale limitation de la méthode utilisée est liée au fait que l'identification d'une réponse impulsionnelle est d'autant plus précise que les séries chronologiques qui constituent l'entrée et la sortie du système à modéliser sont de longue durée (plusieurs cycles hydrologiques) et de bonne qualité. Si ces séries sont trop courtes, certains événements extrêmes risquent de ne pas avoir été observés dans les séries disponibles (par exemple crues et étiages exceptionnels). Ces événements ne sont alors pas pris en compte dans le calcul, et les prévisions peuvent s'en trouver affectées, d'une manière qu'il est difficile de prévoir.

Une incertitude pesait donc sur le sous-modèle pluie/ETP - débit de débordement du réservoir Sud, ajusté sur un cycle hydrologique seulement au moment de l'étude de 1999. C'est pourquoi il était nécessaire de vérifier les résultats fournis par ce sous-modèle, tous les autres résultats étant pris égaux par ailleurs, afin de valider les conclusions de l'étude de 1999 concernant le dimensionnement du futur ouvrage.

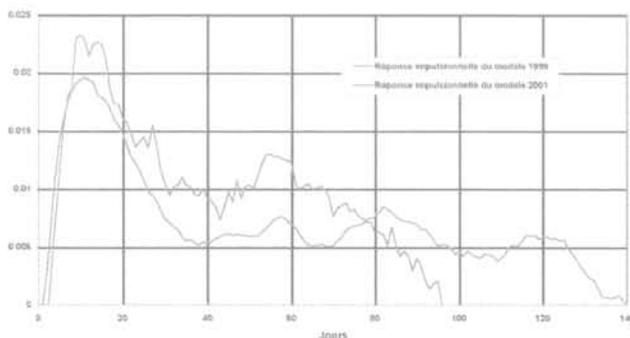


FIG. 5 Comparaison des réponses impulsionnelles normalisées de modèles 1999-2001. Comparison of the normalized impulse responses of the 1999 and 2001 models.

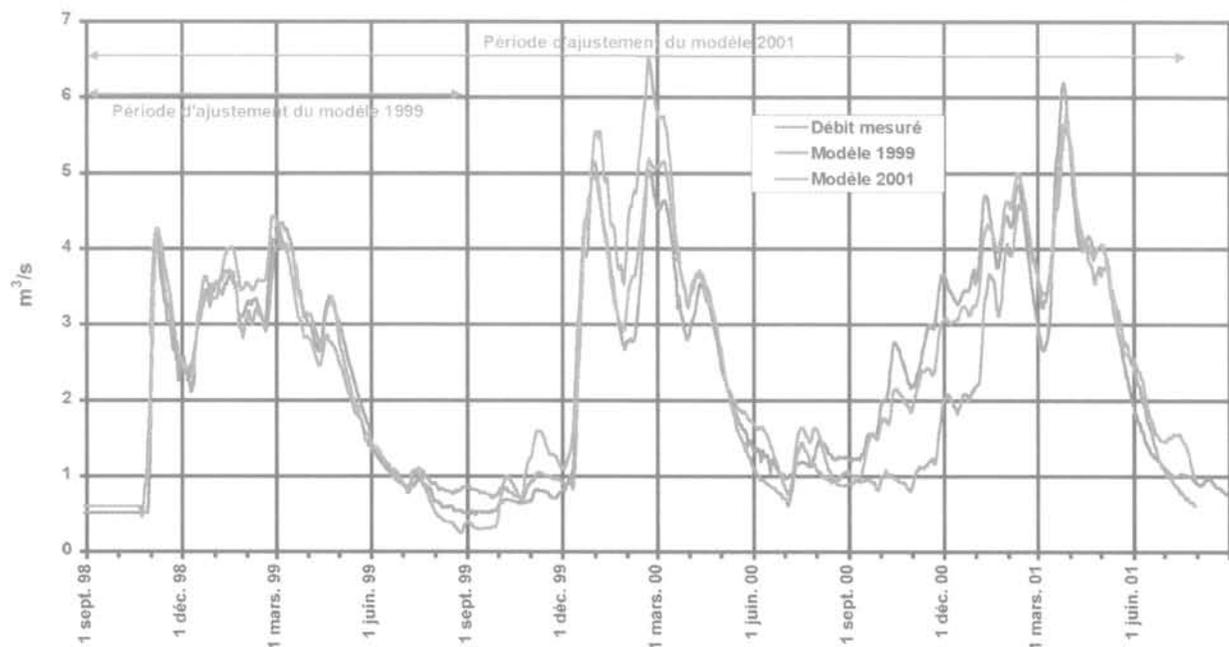


FIG. 6 Comparaison des ajustements des modèles 1999 et 2001. Comparison of the fitting of the 1999 and 2001 models with the data.

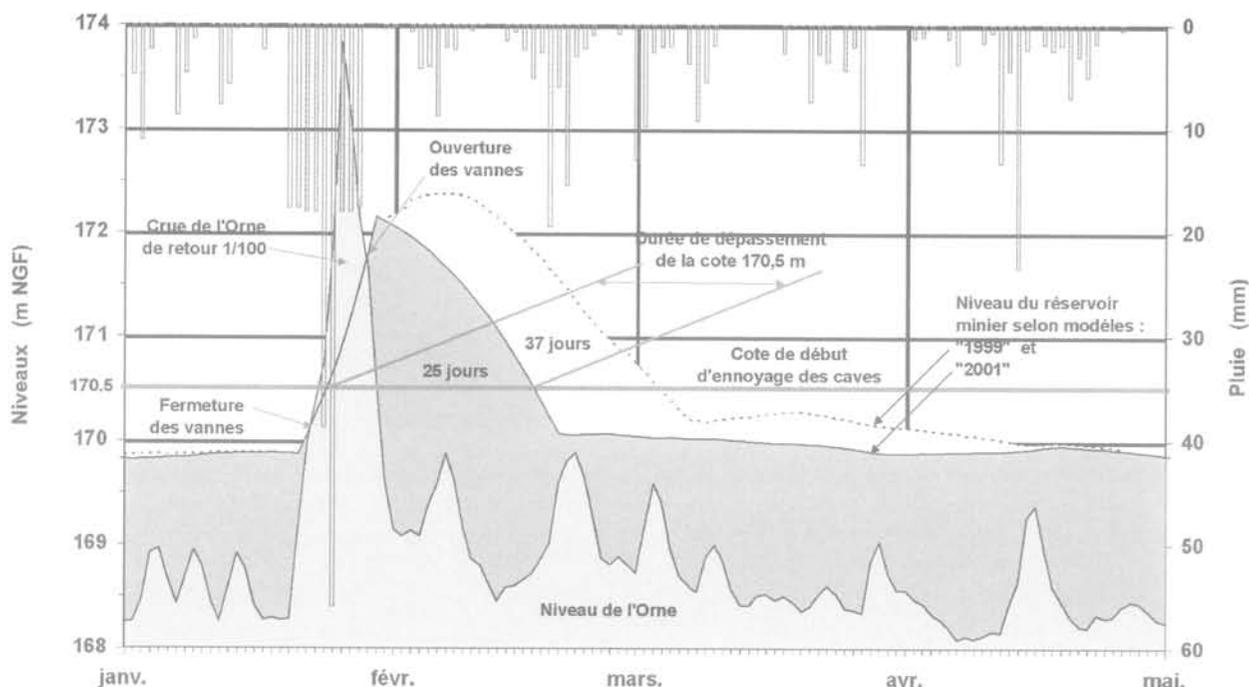


FIG. 7 Simulation des niveaux pour une crue centennale selon les modèles 1999-2001.
Simulation of levels for one-in-a-hundred-years flood from the 1999 and 2001 models.

3

Vérification des prévisions du modèle de l'étude de 1999 et nouvel ajustement (2001)

3.1

Vérification du modèle pluie/ETP – débit de débordement du réservoir Sud

Les nouvelles données de pluie et d'ETP acquises du 1^{er} juillet 1999 au 31 juillet 2001 ont constitué les entrées du modèle de l'étude de 1999, et ont permis de simuler le débit de débordement de l'ouvrage actuel. La comparaison du débit simulé et du débit réellement mesuré sur la même période à la galerie de Moyeuve (Fig. 6) montre que le modèle 1999, qui était parfaitement ajusté sur le cycle hydrologique 1998-1999, prévoit assez mal les débits extrêmes ultérieurs.

3.2

Nouvel ajustement du modèle avec deux années de données supplémentaires

Afin de déterminer l'impact de ces prévisions peu précises sur les conclusions de l'étude, nous avons modélisé à nouveau le débit de débordement de la galerie de Moyeuve, en utilisant les deux années de données supplémentaires disponibles. L'ajustement du nouveau modèle est bon (écart type moyen = 0,35 m³/s; coefficient de corrélation R² = 96,8). On observe en particulier que tous les pics de crue sont cette fois-ci

correctement ajustés (Fig. 6), ce qui est notre critère de *bon modèle* compte tenu de l'objectif de l'étude: + 0,55 m³/s début mars 2000 pour une valeur mesurée à 4,5 m³/s (soit + 12 % d'écart), et - 0,6 m³/s à fin mars 2001 pour une valeur mesurée à 6 m³/s (soit - 10 % d'écart).

La forme générale des réponses impulsionnelles des modèles 1999 et 2001 reste semblable (Fig. 5). On constate néanmoins que la réponse du nouveau modèle est plus lisse, présente un pic entre 9 et 13 jours moins long (3 jours de moins) et moins élevé d'environ 20 %, et possède une queue plus longue (140 jours au lieu de 95 jours) comportant 3 petits pics au lieu d'un seul pic plus important. On peut aussi remarquer que la réponse impulsionnelle du modèle 1999 était très caractéristique d'un milieu à double perméabilité, indiquant nettement l'existence de deux types d'écoulements dans deux types de porosité seulement (telles que des conduits karstiques et des fractures très conductrices d'une part, et des fissures plus fines dans le reste de la masse calcaire d'autre part), tandis que la réponse impulsionnelle du modèle 2001 semble indiquer l'existence de plusieurs classes de porosité secondaire.

3.3

Conséquences sur les prévisions réalisées en 1999

Selon le modèle 2001, les débits de débordement de période de retour 1/10 et 1/100 sont respectivement de 7 et 8,4 m³/s, contre 8,4 et 10,7 m³/s selon le modèle 1999. Toutes choses étant égales par ailleurs, le modèle 1999 surestime donc les débits de pointe de crue de 20 % pour la crue décennale, et de 27 % pour la crue centennale (c'est l'ordre de grandeur de l'écart entre les hauteurs des pics des réponses impulsionnelles).

L'impact de cette surestimation du débit de débordement sur la prévision du niveau du réservoir est illustré par la figure 7, qui permet de comparer les simulations fournies par les deux modèles.

On peut constater que l'abaissement du seuil de débordement à 169 m NGF du nouvel ouvrage retenu aura selon le modèle 2001 un meilleur impact que celui prévu par le modèle 1999. Ainsi, la durée de dépassement de la cote 170,5 m passe de 13 à 9 jours pour la crue décennale, et de 37 à 25 jours pour la crue centennale, pour plusieurs raisons :

- le débit de débordement est moins élevé, donc le volume stocké dans le réservoir pendant la période de fermeture de la mine est moins important ;
- ce plus petit volume stocké est évacué plus rapidement (rappelons que le débit de débordement est limité à $10 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui est pénalisant en termes de durée de vidange du volume stocké, puisque l'ouvrage doit évacuer à la fois le débit de la crue et le volume stocké).

4

Début de l'abaissement du niveau du réservoir et premières validations des calculs (2002)

Le 23 août 2002 s'est produit un événement très particulier dans l'histoire du réservoir Sud : le pompage d'abaissement du niveau de ce réservoir a débuté, à l'aide d'une pompe immergée pouvant débiter jusqu'à $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce pompage était destiné à abaisser rapidement le niveau du réservoir de manière à poursuivre les travaux de construction de la nouvelle galerie de débordement. En réaction à ce pompage, le débit de débordement à la galerie de Moyeuivre a baissé très rapidement jusqu'à s'annuler le 25 août. Le niveau du réservoir a lui aussi commencé à chuter dans les heures qui ont suivi le début du pompage. Le niveau a baissé de 2,4 m en 45 jours, pour atteindre la cote 170,3 m NGF au début du mois d'octobre 2003 (Fig. 8). Le pompage et les travaux ont ensuite été interrompus à l'approche des hautes eaux d'hiver, et l'évolution du niveau a retrouvé sa dynamique habituelle.

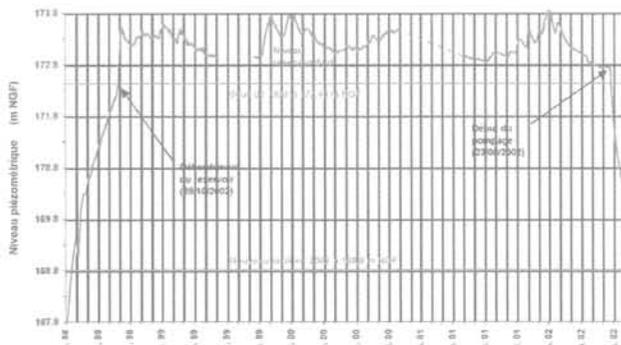


FIG. 8 Début du pompage d'abaissement du niveau piézométrique du réservoir Sud. Beginning of the dewatering pumping of the South mine-water reservoir.

Une campagne d'équipement et de suivi des différents niveaux et débits sur le chantier de construction du nouvel ouvrage ainsi que sur le réservoir Sud est en cours de réalisation. Les données recueillies pendant les 45 jours de pompage permettent dès à présent de valider l'une des conclusions issues de l'étude de modélisation de 1999.

Pour estimer le temps nécessaire à l'abaissement du niveau du réservoir au cours des travaux, il était en effet nécessaire de connaître le volume d'eau à évacuer du réservoir, c'est-à-dire le volume stocké dans les vides du réservoir – auquel il fallait bien entendu ajouter ensuite le volume de la recharge estimée du réservoir, et retrancher le volume estimé des fuites du réservoir vers la plaine de Moyeuivre et le volume des prélèvements destinés à la production d'eau potable et industrielle.

Le modèle pluie/ETP – débit de débordement du réservoir Sud avait permis de simuler le débit d'alimentation du réservoir pour la période précédant le débordement, par l'introduction des chroniques de pluie et d'ETP passées. Le calcul du volume d'eau stocké dans les vides du réservoir – pour chaque hauteur d'eau depuis le début de l'ennoyage jusqu'au débordement – avait donc été effectué en 1999, en mettant en relation le débit cumulé stocké dans le réservoir et le niveau piézométrique correspondant (Fig. 9). De la cote 169 m à la cote 173 m, la relation entre le volume d'eau stocké dans le réservoir et le niveau piézométrique est linéaire, et on peut estimer à 2,3 millions de m^3 le volume d'eau stocké par mètre d'eau selon le modèle 1999. Le calcul prenait comme hypothèse que la somme des débits de prélèvement et de fuite était constante et égale à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (meilleure estimation possible à l'époque du calcul).

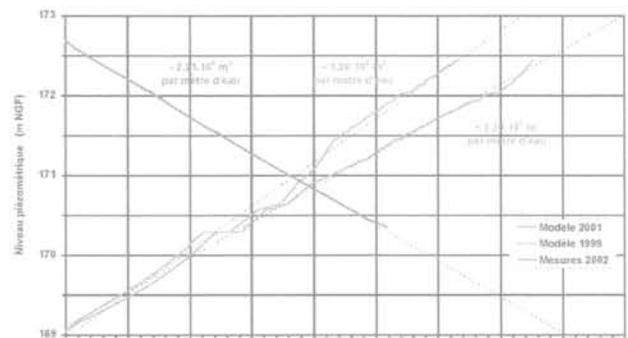


FIG. 9 Évolution du volume déstocké au cours du pompage d'abaissement. Evolution of the dewatering volume of water due to pumping.

Le même calcul a été fait à l'aide de la recharge calculée par le modèle 2001 – et avec les mêmes hypothèses concernant les prélèvements et les fuites –, on calcule cette fois-ci un volume de 1,8 million de m^3 par mètre d'eau de la cote 169 m à la cote 173 m (Fig. 9). Le modèle 1999 prédit ainsi un volume stocké près de 28 % plus faible que celui du modèle 2001, alors que les pics de crue du modèle 1999 peuvent être jusqu'à 27 % plus élevés que ceux du modèle 2001.

Ces prévisions ont été comparées aux mesures réalisées en 2002. On peut calculer le débit déstocké du

réservoir par l'opération de pompage en effectuant un bilan des débits :

$$Q_{\text{déstocké}} = Q_{\text{pompage}} + Q_{\text{prélèvements}} + Q_{\text{fuites}} - Q_{\text{recharge}} \quad (1)$$

Il faut ainsi prendre en compte, en plus du débit de pompage (débit sortant), les prélèvements AEP/AEI et les fuites dans la plaine alluviale (débit sortant), ainsi que le débit de la recharge naturelle du réservoir (débit entrant). Le débit de fuite dans la plaine alluviale est une fonction linéaire du niveau piézométrique du réservoir (Vaute *et al.*, 2002) : sa valeur est de 0,5 m³/s au-dessus de la cote 172,8 m, et nulle au-dessous de la cote 169,7 m environ.

Tant que le réservoir déborde, le débit de la recharge peut être estimé de la manière suivante :

$$Q_{\text{recharge}} = Q_{\text{débordement}} + Q_{\text{prélèvements}} + Q_{\text{fuites maximales}} \quad (2)$$

En période de tarissement, le débit de la recharge peut être considéré comme constant, ce qui permet de reporter son expression dans la formule (1) après l'arrêt du débordement et de calculer finalement :

$$Q_{\text{déstocké}} = Q_{\text{pompage}} + Q_{\text{fuites}} - Q_{\text{débordement}} - Q_{\text{fuites maximales}} \quad (3)$$

Le volume cumulé déstocké peut alors être mis en relation avec le niveau piézométrique du réservoir (Fig. 9). La courbe d'évolution du volume déstocké s'ajuste parfaitement à une relation linéaire du volume en fonction du niveau piézométrique du réservoir. On retrouve là les résultats issus des modélisations de 1999 et 2001. Le volume d'eau déstocké du réservoir par l'opération de pompage est de 2,21 millions de m³ par mètre d'eau. Cette valeur est encadrée par les valeurs déduites des modèles (1,8 et 2,3 millions de m³), avec des écarts variant de + 4 % (modèle 1999) à - 18,5 % (modèle 2001). Rappelons que ces dernières ont été calculées en simulant la recharge du réservoir Sud à partir des chroniques de pluie et d'ETP passées. Compte tenu des incertitudes liées à la courte durée des chroniques de données utilisées pour l'ajustement des modèles, on peut considérer que les premiers résultats de l'opération de pompage valident la méthode et les résultats de la modélisation de 1999, actualisée en 2001.

Conclusion

La méthode de modélisation globale inverse mise en œuvre en 1999 pour résoudre un problème pratique d'ingénierie s'est avérée efficace, économe en temps de calcul comme en temps de mise en œuvre, et bien adaptée au problème posé. Malgré la très courte durée (un an) de la chronique de débit utilisée lors de la première modélisation de 1999, les écarts de prévisions entre le modèle 1999 et le modèle actualisé 2001 ne dépassent pas 20 à 27 % au terme de la chaîne de calcul, tandis que les écarts entre les résultats déduits des deux modèles et les premiers résultats issus des mesures réalisées en 2002 restent inférieurs à 18,5 %. Initialement développée dans le cadre des activités de recherche-développement du BRGM, cette méthode peut donc aussi être appliquée avec succès dans le cadre d'opérations d'ingénierie appliquée ou de service public, dans les nombreux cas où les méthodes plus traditionnelles sont inopérantes, soit en raison de la complexité du milieu à étudier (anciennes mines, karsts, etc.), soit à cause du manque de données distribuées dans l'espace.

REMERCIEMENTS

La description du contexte hydrogéologique de l'étude (§ 2) s'appuie essentiellement sur les résultats acquis grâce aux études de surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain, réalisées depuis 1993 par le BRGM Lorraine en collaboration avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et la DIREN Lorraine.

La première modélisation de 1999 (§ 3) a été réalisée par le BRGM Lorraine pour la DRIRE Lorraine, sous le contrôle scientifique d'un comité de pilotage composé d'experts de l'École des mines de Paris, de l'École des mines de Nancy et de l'INERIS.

La validation des résultats de l'étude de 1999 (§ 4 et 5) a été réalisée dans le cadre des travaux de recherche-développement du GISOS (Groupement d'intérêt scientifique sur l'impact et la sécurité des ouvrages souterrains, structure regroupant des équipes de recherche du BRGM, de l'INERIS, de l'Institut national polytechnique de Lorraine et de l'École des mines de Paris), en collaboration avec la DRIRE Lorraine, maître d'ouvrage des travaux d'abaissement du niveau du réservoir minier Sud.

Bibliographie

- Baubron J.C. – *Avis sur les infiltrations d'eau observées dans la partie basse de la ville de Moyeuvre-Grande (Moselle)*. Rapport BRGM R40271, 1998, 27 p., 12 fig., 1 tabl., 3 ann.
- Chevalier J. – *Projet d'abaissement du seuil de débordement du bassin sud dans l'Orne à Moyeuvre-Grande (57) : étude hydraulique et statistique des périodes d'arrêt prévisibles du dispositif*. Rapport ANTEA A 16996/A, 1999, 15 p., 4 tabl., 9 ann.
- Fabriol R., Pinault J.L., Vaute L. – *Traitement du signal et réacteurs en réseaux. Application à la simulation de l'évolution de la concentration en sulfate dans l'eau du bassin ferrifère lorrain*. Rapport BRGM/RP-50153-FR, 2000, 48 p., 25 fig., 2 tabl.
- Lanini S., Fabriol R. – *Différentes approches de modélisation des écoulements et du transport dans un réseau de tubes, comparaison avec des résultats expérimentaux*. Rapport BRGM/RP-50154-FR, 2000, 48 p., 10 fig., 1 tabl., 3 ann.
- Lucas Y., Vaute L. – *Modélisation hydrodynamique de l'ancienne mine de fer de Saizerais. Faisabilité d'une approche spatialisée*. Rapport BRGM/RP-51132-FR, 2001, 69 p., 36 fig., 5 tabl., 11 ann.
- Pinault J.L., Baubron J.-C. – *Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture, and soil temperature data: a new approach for radon concentration modeling*. *Journal of geophysical research*, vol. 101, n° B2, 1996, p. 3157-3171.
- Pinault J.L., Pauwels H., Cann C. – *Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems. Application to nitrate transport and denitrification*. *Water Resources Research*, vol. 37, n° 8, 2001a.
- Pinault J.L., Plagnes V., Aquilina L., Bakalowicz M. – *Inverse modeling of the hydrological and hydrochemical behavior of hydrosystems. Characterization of karst system functioning*. *Water Resources Research*, vol. 37, n° 8, 2001b.
- Vaute L. – *Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 1999*. Rapport BRGM R50215, 2000, 79 p., 31 fig., 4 ann.
- Vaute L. – *Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2000*. Rapport BRGM R50820, 2001, 81 p., 33 fig., 4 ann.
- Vaute L., Bastien F., Douche A., Jozefiak M. – *Surveillance des eaux souterraines du bassin ferrifère lorrain en 2001*. Rapport BRGM/RP-51616-FR, 2002, 100 p., 42 fig., 7 ann.
- Vaute L., Pinault J.L. – *Modélisation inverse du système hydrologique « réservoir minier-nappe alluviale-Orne » à Moyeuvre-Grande*. Rapport BRGM R 40860, 1999, 23 p., 7 ann.