

REMONTEE DES NAPPES DANS LES ANCIENS TRAVAUX MINIERES ET ACTIVITES DE DEMERGEMENT

MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE SPECIFIQUE ET EXEMPLE DE LA ZONE MINIERE DE CHERATTE

Alain Dassargues ⁽¹⁾, Samuel Wildemeersch ⁽¹⁾, Philippe Orban ⁽¹⁾, Serge Brouyère ⁽¹⁾

(1) Université de Liège, Département ArGEnCo, GEO³, Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement, Chemin des Chevreuils, 1, B52/3 Sart-Tilman, B-4000 Liège.

APPROCHES DE MODELISATION DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS EN SYSTEME MINIER

La fermeture des exploitations minières en souterrain est souvent assortie d'un arrêt des opérations de pompage qui y sont associées. Ceci peut induire une remontée significative des eaux souterraines avec des conséquences indésirables possibles. La modélisation de ces remontées peut être très utile pour comprendre, contrôler et simuler différents scénarios. Cependant, les techniques de modélisation classiques, basées sur la représentation du milieu souterrain réel par un milieu poreux équivalent ne sont pas très fiables ni réalistes dans ces contextes particuliers. En effet, les systèmes géologiques et hydrogéologiques ont été fortement perturbés par les travaux souterrains constitués de réseaux de galeries et de couches exploitées dont le toit a été foudroyé. Ces modèles « spatialement distribués » et « physiquement basés » demandent que l'hétérogénéité du milieu souterrain soit complètement décrite via des valeurs équivalentes des propriétés d'écoulement en milieu poreux (conductivités hydrauliques et coefficients d'emménagement) dans les Eléments de Volume Représentatifs (EVR) considérés. Ceci induit de grandes difficultés vu le manque général de données détaillées dans les zones perturbées par les anciens travaux miniers et la complexité des conditions géologiques et hydrogéologiques.

Excepté pour les problèmes à très grande échelle (Sherwood & Younger, 1994), la complexité et l'hétérogénéité des systèmes miniers nécessitent des techniques de modélisation spécifiques ne considérant plus le milieu souterrain comme continu et poreux. Les galeries d'exploitation et d'exhaure constituent en effet des chemins d'écoulement préférentiels où la loi de Darcy n'est plus applicable.

Trois approches de modélisation spécifiques aux problèmes miniers ont été développées ces dernières années :

- L'approche *box model* (Sherwood & Younger, 1997) : la zone exploitée est représentée par un ensemble de compartiments interconnectés (fonctionnant comme des réservoirs) ;
- L'approche *dual* (Eckart *et al.*, 2004) : la zone exploitée est représentée par un *box model* et la nappe surincombante est modélisée de façon classique sans pour autant que ces modèles soient véritablement couplés ;
- L'approche *physically-based* (Adams & Younger, 1997 ; Younger *et al.*, 2002 ; Boyaud & Therrien, 2004) : la zone exploitée est représentée par un ensemble de conduits représentant explicitement les galeries et les puits tandis que les zones non exploitées adjacentes et surincombantes sont modélisées de façon classique.

L'approche *box model* a l'avantage d'être facile à utiliser mais présente l'inconvénient de ne pas considérer les interactions entre la zone exploitée et son environnement. A l'inverse, l'approche *physically-based* prend en compte explicitement les interactions entre la zone exploitée et son environnement mais sa mise en œuvre nécessite une connaissance extrêmement précise de la zone étudiée afin de pouvoir paramétrer correctement le système.

Une méthode mixte de modélisation, appelée HFEMC pour « Hybrid Finite Element Mixing Cell », a donc été développée. Celle-ci consiste à coupler une approche *box model* (« mixing cell ») pour les zones exploitées avec une approche classique (« finite element ») pour les zones non exploitées adjacentes et surincombantes (Fig. 1). Grâce à ce couplage entre un *box model* et un modèle classique, l'approche mixte présente l'avantage de prendre en compte les interactions entre zones exploitées et non exploitées sans nécessiter une caractérisation détaillée du système minier.

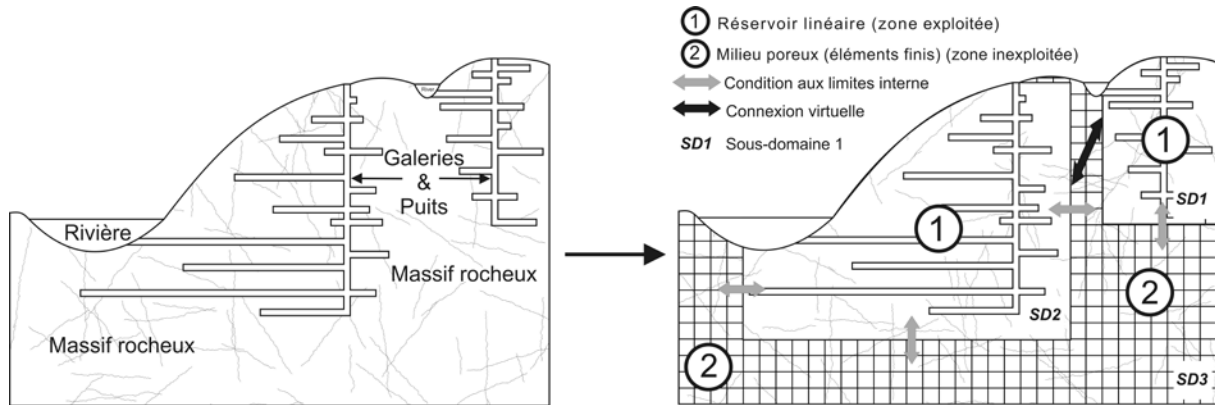


Figure 1 – Approche mixte combinant une approche box model (zones exploitées) avec une approche classique (zones non exploitées) (d'après Wildemeersch et al., 2008).

Cette approche mixte a été implémentée dans le code éléments finis SUFT3D (Saturated and Unsaturated Flow and Transport in 3D) (Carabin & Dassargues, 1999 ; Brouyère, 2001 ; Brouyère et al., 2004). Le principe fondamental de l'approche mixte consiste à subdiviser la zone à modéliser en sous-domaines représentant des unités hydrogéologiques distinctes, soit parce qu'elles sont hydrogéologiquement relativement indépendantes, soit parce que leur degré de caractérisation est différent. Au contact entre sous-domaines sont définies des interfaces permettant de simuler, sous forme de conditions aux limites internes, les échanges d'eau entre sous-domaines. L'utilisation de conditions aux limites internes permet également de calculer un bilan pour chaque sous-domaine.

Plus de détails sur les principes mathématiques et numériques utilisés, sur les conditions aux limites internes et externes, sur la prise en compte des cours d'eau, ainsi que sur les tests sur des cas synthétiques ont été publiés récemment par Wildemeersch et al., (2008, 2010) et Brouyère et al. (2009).

MODELISATION DE LA ZONE MINIERE DE CHERATTE

La zone minière de Cheratte a été décrite dans la première partie de ce chapitre. Cinq zones exploitées sont recensées, Trembleur, Argenteau, Hasard-Cheratte Nord, Hasard-Cheratte Sud, et Wandre, chacune étant composée d'un réseau de galeries (Fig. 2). Ces zones exploitées interagissent avec le réseau d'eau de surface et avec la zone inexploitée environnante.

Le principal aquifère est constitué par les craies de la Formation de Gulpen. Le gradient hydraulique régional induit des écoulements souterrains globalement vers le nord-ouest, influencés par la Meuse et par le pendage des

craies. Cependant, cette tendance générale est loin d'être confirmée à proximité des zones exploitées où l'on observe des rabattements locaux importants de la piézométrie (cfr. première partie du chapitre).

Les charbonnages de Cheratte ont été fermés à la fin des années 1970. Les derniers pompages maintenant les niveaux piézométriques à environ -64 m à Trembleur ont été arrêtés en 1982. La remontée piézométrique n'a malheureusement pas été mesurée jusqu'à l'installation d'un réseau de surveillance en 2003. Grâce à ce réseau, des mesures de niveaux piézométriques et de débits aux exutoires sont maintenant régulièrement réalisées dans une série de piézomètres forés et dans différentes galeries de drainage. Bien que la détermination d'une tendance temporelle générale sur une série tellement courte soit très délicate, la remontée des niveaux piézométriques semble encore perceptible à certains endroits (Argenteau (Pz4) et Trembleur (Pz7)). Cependant, l'essentiel du « rebond piézométrique » est antérieur à 2003.

La forte corrélation entre les débits mesurés aux exutoires et les niveaux piézométriques montre que les zones exploitées peuvent être interconnectées soit par des failles, soit par d'anciennes galeries non reprises dans les archives et les données disponibles.

Modèle conceptuel

Une condition de Fourier est imposée à la frontière externe occidentale du modèle pour permettre et simuler l'échange des flux entre l'aquifère et la Meuse. Pour le reste, une frontière imperméable est imposée au nord, à l'est et au sud correspondant soit aux limites estimées du bassin hydrogéologique, soit à une faille dont le remplissage argileux en fait une frontière peu perméable.

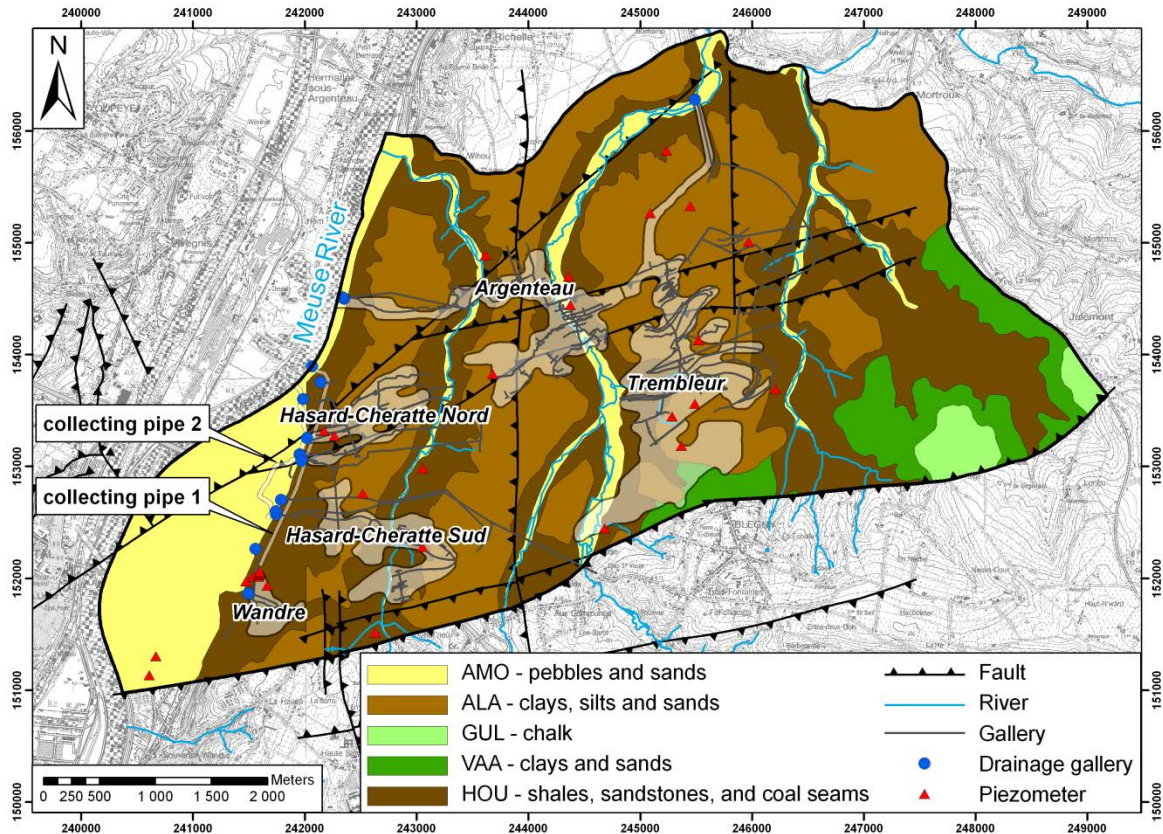


Figure 2 – Carte géologique de la région de Cheratte montrant les principales zones d'exploitation (adapté d'après Barchy & Marion, 2000).

Une recharge est imposée sur le sommet du modèle. Celui-ci correspond à la topographie tandis que la base du modèle correspond au plan horizontal à -64 m. Le maillage comporte 3 couches pour un total de 30443 noeuds et de 40976 éléments. Le modèle est subdivisé en huit sous-domaines : cinq correspondant aux zones exploitées de Trembleur, Argenteau, Hasard-Cheratte Nord, Hasard-Cheratte Sud et Wandre, deux correspondant à deux collecteurs principaux et une correspondant à la zone du sous-sol non exploitée adjacente et sus-jacente. Des conditions aux frontières internes de Fourier sont choisies entre les zones exploitées et inexploitées. Elles permettent des échanges de flux d'eaux souterraines entre sous-domaines. Dix connexions permettant des écoulements directs entre zones exploités sont considérées.

L'identification et la calibration de ces écoulements directs sont basés sur des résultats obtenus précédemment avec un *box model* (utilisant le logiciel EPANET 2.0 (Rossmann, 2000)) qui avait été calibré en régime permanent (Gardin *et al.*, 2005) sur les hauteurs piézométriques mesurées et les débits mesurés aux exutoires des zones exploitées. Les seuils hydrauliques révélés par ces mesures sont également pris en

considération. Par exemple, les connexions directes Argenteau ↔ Hasard-Cheratte Sud et Trembleur ↔ Hasard-Cheratte Sud ne sont actives que si les niveaux piézométriques à Argenteau et Trembleur sont supérieurs à 88,5 m et 102 m, respectivement.

Calibration en régime transitoire

Les conditions initiales pour la calibration en régime transitoire viennent de la calibration en régime permanent (Brouyère *et al.*, 2009). La calibration en conditions transitoires est basée sur des chroniques piézométriques et de débits mesurés de janvier 2004 à décembre 2005. Comme suggéré par Hill & Tiedeman (2007) et puisque la recharge variable imposée au modèle est mensuelle (seules données disponibles), les observations sont ramenées également à une moyenne mensuelle pour assurer une cohérence des valeurs observées et simulées. Les paramètres calibrés sont les conductivités hydrauliques des formations géologiques, les coefficients d'échange des conditions aux frontières internes et externes de Fourier, les coefficients d'échange des connexions directes entre zones exploitées, mais également les emmagasinelements et coefficients

d'emmagasinement spécifiques des zones exploitées et des formations géologiques des zones inexploitées (Wildemeersch *et al.*, 2010).

Comme montré aux figures 3 et 4, le modèle calibré peut reproduire d'une manière satisfaisante les hauteurs piézométriques et les débits mesurés. Ces derniers sont directement liés aux hauteurs piézométriques puisqu'ils sont simulés via des conditions de Fourier ou par des connexions

directes où le débit dépend de la différence des hauteurs piézométriques entre l'amont et l'aval. Le débit et la hauteur piézométrique simulés à Argenteau (E2 et Pz4) ont donc une allure similaire. La situation est plus complexe pour Hasard-Cheratte Sud (E8 et Pz8) puisque le débit simulé de cette zone exploitée est également lié aux piézométries à Argenteau (Pz4) et à Trembleur (Pz7).

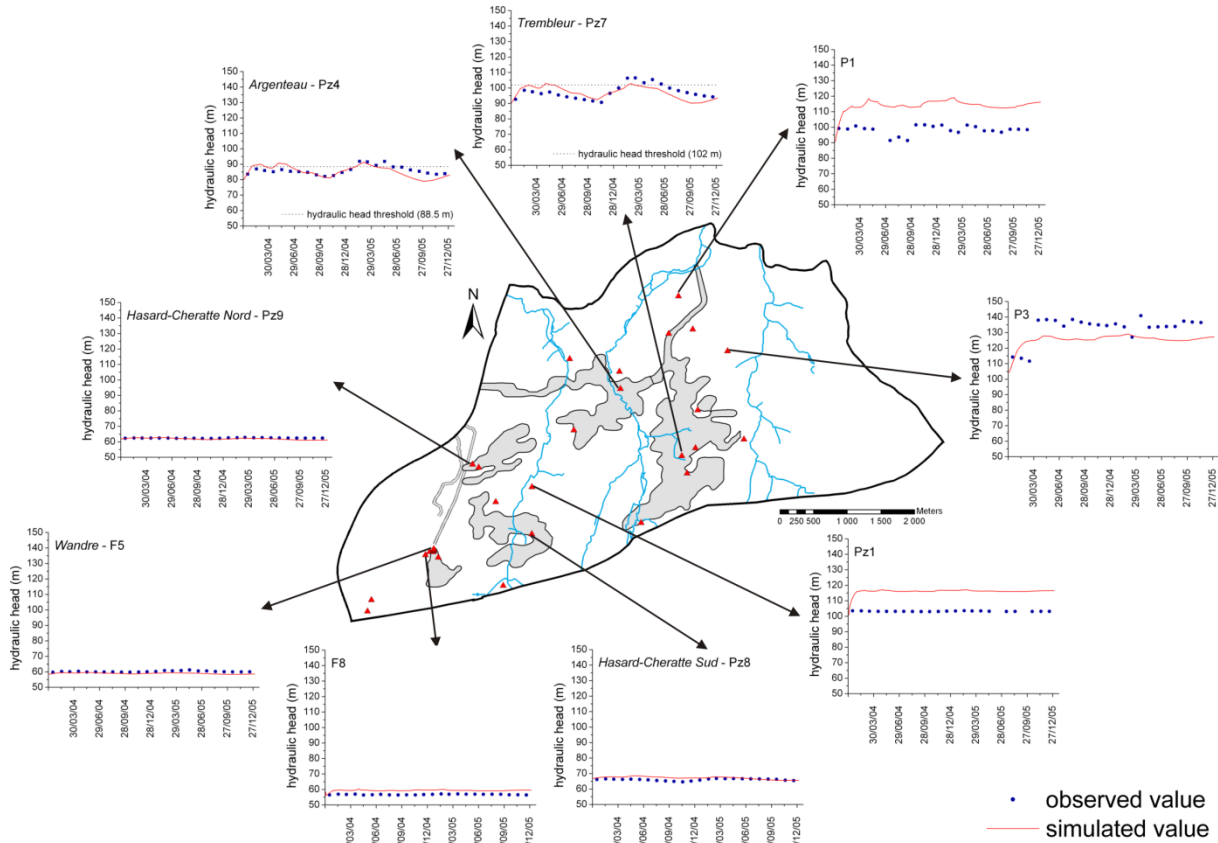


Figure 3 – Comparaison entre les hauteurs piézométriques observées et simulées pour différents piézomètres dans la zone d'étude.

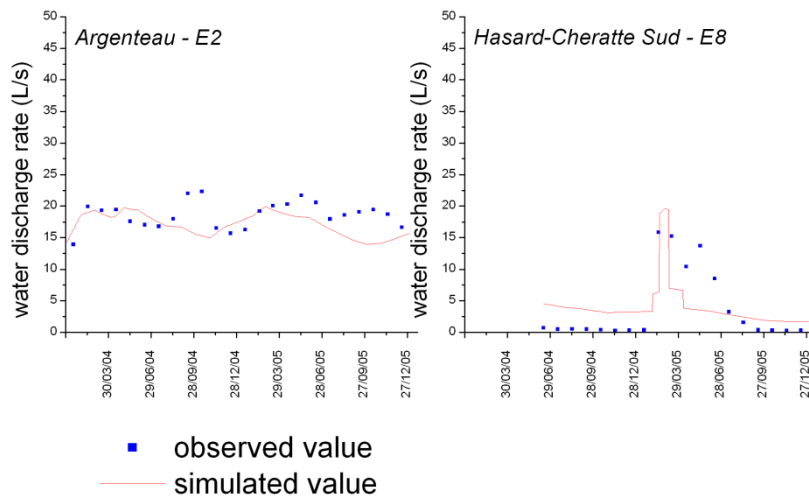


Figure 4 – Comparaison entre débits observés et simulés dans différentes galeries de drainage de la zone d'étude.

Les observations indiquent que les seuils hydrauliques principaux d'Argenteau (88,5 m) et de Trembleur (102 m) ont été dépassés de février 2005 à juin 2005 avec un pic principal en février et un pic secondaire en mai. Par conséquent, on observe deux pics de crue dans la galerie de drainage de Hasard-Cheratte Sud. Les hauteurs piézométriques simulées reproduisent les pics principaux mais pas les pics secondaires, probablement en raison de la recharge imposée par des valeurs mensuelles plutôt qu'hebdomadaires voire journalières. En conséquence, les débits simulés reproduisent seulement le premier pic de crue.

Comme suggéré par Hill & Tiedeman (2007) et en utilisant le code UCODE_2005 (Poeter *et al.*, 2005), une étude de sensibilité des différents paramètres calibrés a été réalisée (Wildemeersch *et al.*, 2010) montrant que les principaux paramètres influençant les résultats sont l'emmagasinement du secteur exploité de Trembleur et les conductances des connexions directes entre Argenteau et la Meuse et entre Trembleur et Hasard-Cheratte Nord. Ces paramètres sont liés au stockage et au drainage des plus grandes zones exploitées (Trembleur et Argenteau) et montrent leur influence prédominante sur le modèle et, par conséquent, sur l'écoulement des eaux souterraines dans la zone étudiée.

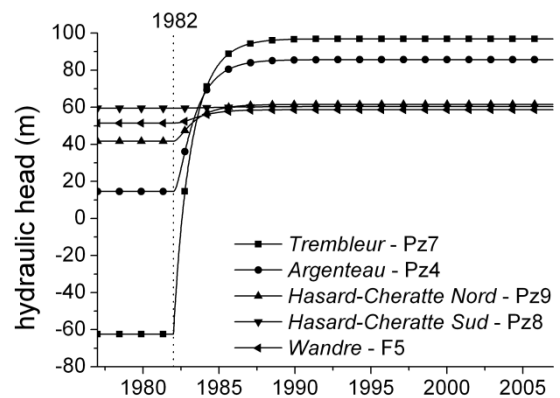
Simulation de scénarios de remontée piézométrique, de coup d'eau et d'hiver très pluvieux

L'objectif des scénarios est d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la zone de Cheratte de façon à aider à gérer les eaux souterraines et les débits aux exutoires dans ces travaux miniers abandonnés en simulant la réaction du système à des sollicitations exceptionnelles correspondant aux cas les plus défavorables.

Remontée piézométrique Comme signalé précédemment, sur base des mesures effectuées depuis 2003, il semble que la remontée piézométrique soit quasi terminée. Le but de ce scénario est donc d'essayer de reproduire cet événement passé pour confirmer cette hypothèse. Après calibration, le modèle permet ainsi de calculer les écoulements d'eaux souterraines dans l'ensemble du massif considéré, tout en reproduisant les piézométries des nappes environnantes et les niveaux d'eau moyens dans les zones exploitées.

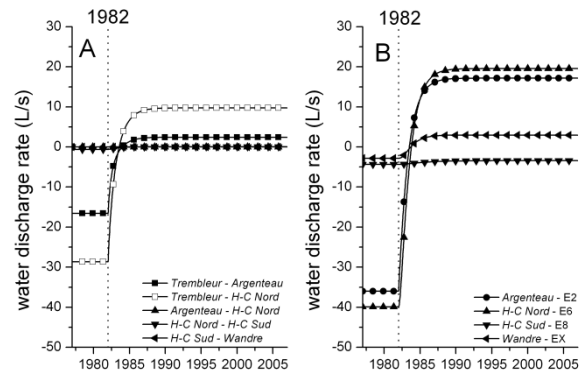
Les seules données disponibles concernant les opérations d'exhaure indiquent que le dernier pompage a été arrêté en 1982. Précédemment,

cette exhaure maintenait les niveaux d'eau à une cote de -64 m dans le secteur de Trembleur. Une simulation de trente ans est effectuée pour simuler la période 1977-2007. La première partie de la simulation (5 ans) est effectuée avec des pompages de 5000 m³/jour dans le compartiment de Trembleur. Aucune donnée au sujet des pompages n'a été retrouvée, cette valeur a été obtenue par essai-erreur jusqu'à obtenir un rabattement des niveaux piézométriques à -64 m à Trembleur. La deuxième partie (25 ans) de la simulation a été effectuée sans pompage. Une recharge constante de 189 mm/an, équivalente à la recharge annuelle moyenne entre 2003 et 2006, est imposée pendant la simulation entière (30 ans). Les hauteurs piézométriques simulées, les débits entre zones exploitées et entre les zones exploitées et les eaux de surface sont présentés aux figures 5 et 6, respectivement. Un débit négatif signifie que les écoulements d'eau ont lieu de la zone exploitée citée en premier vers la seconde.



1982: end of dewatering operations

Figure 5 – Scénario de remontée piézométrique : piézométrie simulée.



1982: end of dewatering operations

Figure 6 – Scénario de remontée piézométrique : (A) débits simulés entre zones exploitées, (B) débits

simulées entre les zones exploitées et les eaux de surface.

Comme prévu, le niveau d'eau dans le secteur de Trembleur atteint -64 m pendant les cinq premières années de la simulation. Par leurs connexions directes avec Trembleur, les niveaux d'eau dans les autres zones exploitées sont également abaissés. Comme illustré par les débits importants échangés entre zones exploitées, Argenteau et Hasard-Cheratte Nord sont les zones exploitées principales qui alimentent Trembleur pendant cette période. Les débits échangés entre les autres zones exploitées sont limités en raison de leurs bas coefficients d'échange (conductance des connexions). Il n'y a aucun débit échangé entre Argenteau et Hasard-Cheratte Sud et entre Trembleur et Hasard-Cheratte Sud car les niveaux d'eau sont inférieurs aux seuils respectifs de 88,5 m et 102 m. Les zones exploitées sont également alimentées par la Meuse puisque son niveau d'eau est plus haut.

Dès que le pompage est arrêté à Trembleur, la remontée piézométrique a lieu jusqu'à ce que le système atteigne un équilibre. La simulation indique que les débits échangés se sont inversés après deux ans et que l'essentiel de la remontée

(97 %) s'est probablement produite après environ cinq ans.

Coup d'eau La remontée des hauteurs piézométriques peut induire des phénomènes de coups d'eau (drainage important et très brusque). Ce phénomène se produit quand une galerie de drainage est obstruée, causant une augmentation des pressions hydrauliques derrière l'obstruction jusqu'à sa rupture sous la pression exercée. L'objectif ici est de simuler ce scénario via la prédiction de l'évolution des hauteurs piézométriques et des débits associés au coup d'eau observé dans la galerie de Hasard-Cheratte Sud.

Pour ce scénario, on simule une période de deux ans avec une recharge identique à cela utilisée pour la calibration. L'hypothèse d'un effondrement obstruant la galerie à la fin du premier mois est simulée par une conductance nulle dans la galerie reliant Hasard-Cheratte Sud et le conduit collecteur 1 tant que la charge hydraulique est inférieure à 72,5 m. Les hauteurs piézométriques et les débits simulés sont repris aux figures 7 et 8, respectivement.

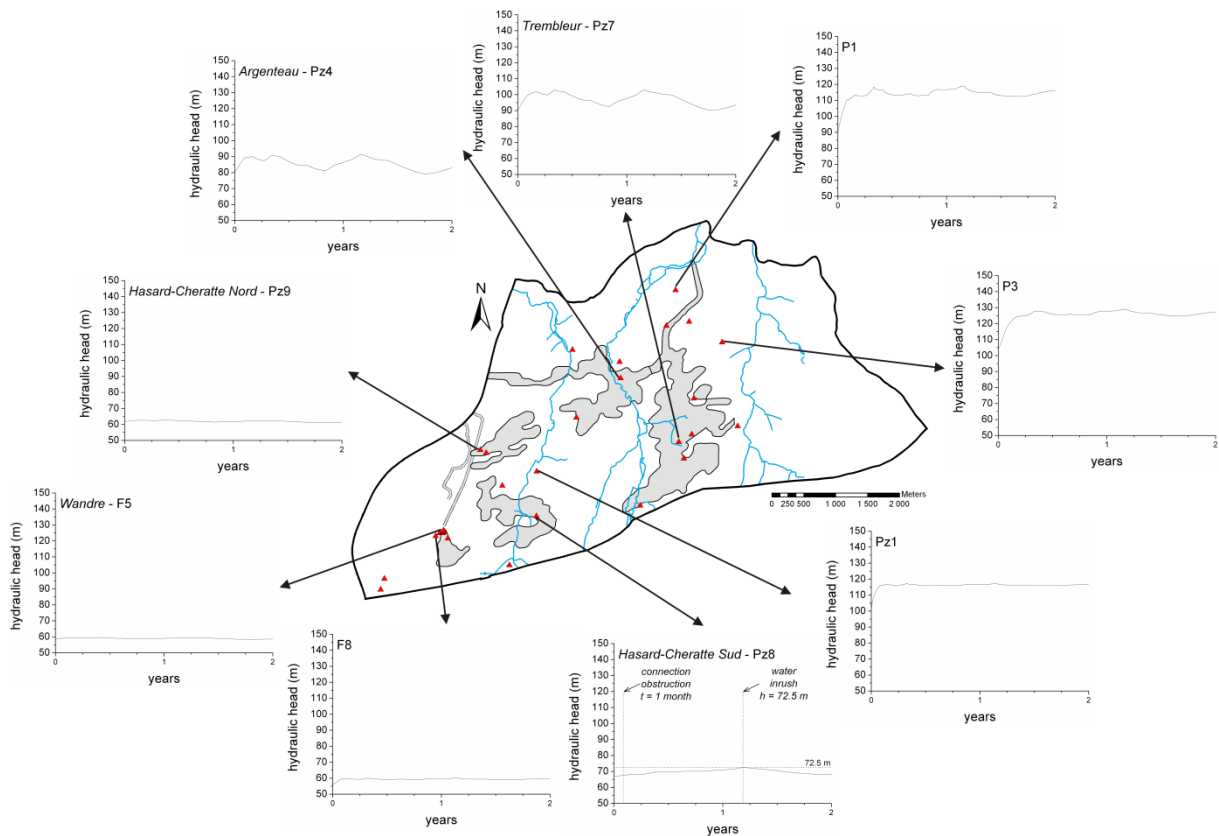


Figure 7 – Scénario du coup d'eau : hauteurs piézométriques simulées dans différents piézomètres de la zone d'étude.

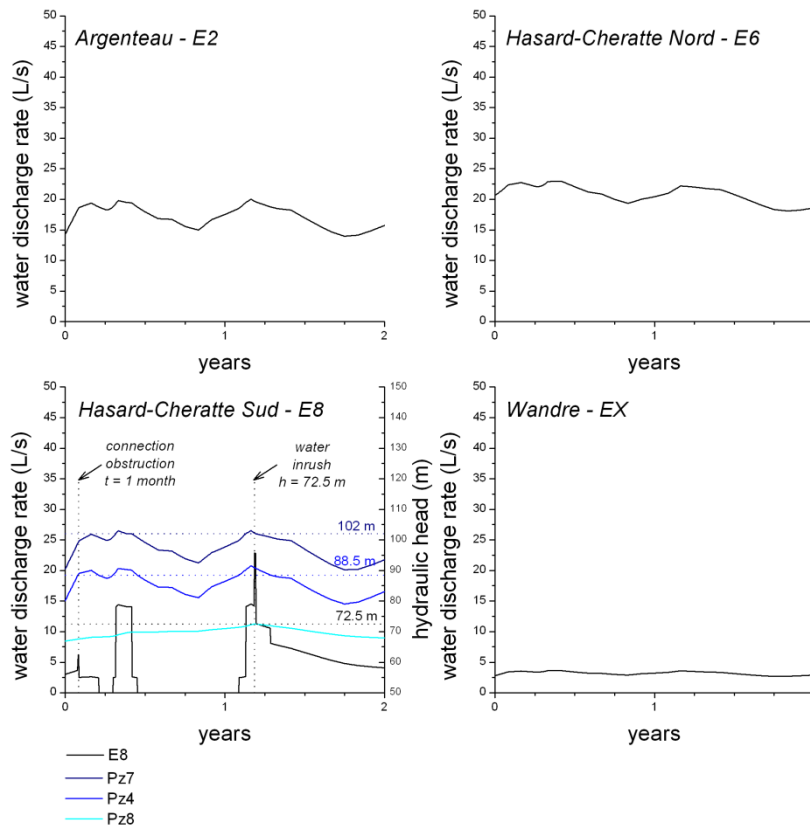


Figure 9 – Scénario du coup d'eau : débits simulés dans différents galeries de drainage de la zone d'étude.

Les hauteurs piézométriques simulées indiquent cependant une augmentation relativement lente dans le compartiment Hasard-Cheratte Sud après l'obstruction de la galerie de drainage jusqu'à sa rupture sous une charge hydraulique de 72,5 m. Les autres zones (exploitées ou inexploitées) ne montrent aucune réponse particulière à cet événement. Comme mentionné précédemment, le débit simulé de la galerie E8 est non seulement alimenté par Hasard-Cheratte Sud mais également par Trembleur et Argenteau dès que les seuils hydrauliques respectifs de 102 m et de 88,5 m sont dépassés. Par conséquent, même lorsque la galerie de drainage de Hasard-Cheratte Sud est obstruée, un débit de drainage peut se produire dans la galerie E8. C'est ce qui s'est produit par intermittence pendant la période d'obstruction. Cependant, le coup d'eau est évident puisque le débit augmente instantanément d'environ 9 L/s dès que l'obstruction est vaincue par la charge hydraulique de 72,5 m. Après cet événement, le débit en E8 diminue lentement, au vu de la diminution lente de niveau piézométrique dans le compartiment Hasard-Cheratte Sud. Les réponses des autres galeries de drainage ne montrent aucune particularité. De façon plus générale, il est évident que l'intensité du coup d'eau dépend de la

résistance de l'obstruction qui, dans ce cas-ci a été choisie arbitrairement comme correspondant à 72,5 m. Une plus haute résistance d'obstruction aurait causé un coup d'eau encore plus violent.

Hiver très pluvieux Les variations temporelles des hauteurs piézométriques et des débits, telles qu'observées depuis 2003, indiquent que les zones exploitées réagissent fortement et très rapidement aux événements pluvieux intenses. Le but de ce scénario est de prévoir la réaction du système à un hiver très pluvieux, qui correspond d'ailleurs à la période de risque principal pour les coups d'eau.

Le scénario implique la simulation d'une période de trois ans avec un hiver très pluvieux après la première année de simulation. La recharge imposée change mensuellement. Excepté pour la période de cet hiver très pluvieux, la recharge est déduite des bilans calculés entre 2004 et 2006. La recharge imposée pour simuler l'hiver très pluvieux est la suivante : 76 mm en décembre, 122 mm en janvier et 46 mm en février (environ trois fois plus que pendant un hiver moyen). Les hauteurs piézométriques simulées au droit des quelques piézomètres de la zone

d'étude, et les débits simulés sont repris aux figures 9 et 10, respectivement.

Les zones exploitées semblent davantage influencées que la zone inexploitée. C'est particulièrement le cas pour Argenteau et Trembleur puisque leurs niveaux piézométriques augmentent d'environ 25 m en seulement trois mois. Par rapport à la situation calibrée prise comme référence, environ six mois sont nécessaires pour revenir à une situation normale. Le débit simulé en E2 indique une augmentation d'environ 15 L/s en trois mois. Le débit maximum calculé est d'environ 30 L/s. Environ six mois sont également nécessaires pour revenir à une situation normale. Le débit simulé en E8 est plus complexe puisqu'il est lié aux seuils d'écoulement définis pour Argenteau (88,5 m) et Trembleur (102 m). Ces seuils sont atteints presque en même temps et ils causent une augmentation presque instantanée du débit d'environ 15 L/s. Ensuite, le débit de sortie continue à augmenter proportionnellement aux hauteurs piézométriques simulées pour Argenteau et Trembleur et atteint finalement une valeur d'environ 30 L/s. Aussi

longtemps que les hauteurs piézométriques simulées pour Argenteau et Trembleur sont supérieures aux seuils respectifs, le débit simulé en E8 reste important.

Par conséquent, le débit simulé est compris entre 20 L/s et 30 L/s pendant environ six mois. Comme illustré par les hauteurs piézométriques et débits simulés, les autres zones exploitées réagissent plus modérément à ce scénario d'hiver très pluvieux.

Comme conclusion, ce scénario prouve qu'un hiver très pluvieux pourrait causer une augmentation forte des niveaux d'eau dans les compartiments de Trembleur et Argenteau. Par conséquent, les débits dans E2 et E8 pourraient augmenter et demeurer relativement hauts jusqu'à ce que les niveaux d'eau diminuent assez. Ce scénario montre également que le compartiment de Hasard-Cheratte-Sud est la zone exploitée la plus sensible. Cependant, le modèle ne tient pas compte des vieilles réactivations et obstructions de galeries qui modifieraient l'hydrogéologie de la zone d'intérêt et ainsi de la réaction de système.

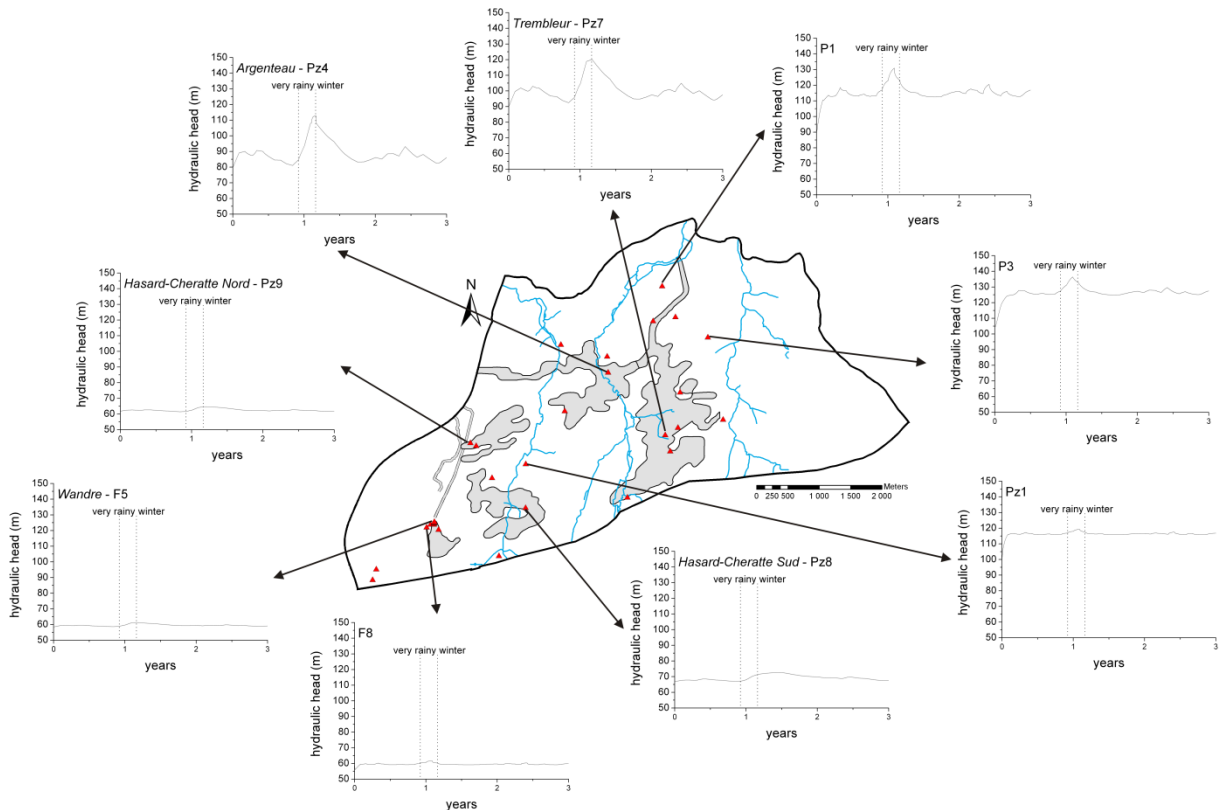


Figure 9 – Scénario d'un hiver très pluvieux : hauteurs piézométriques simulées dans différents piézomètres de la zone d'étude.

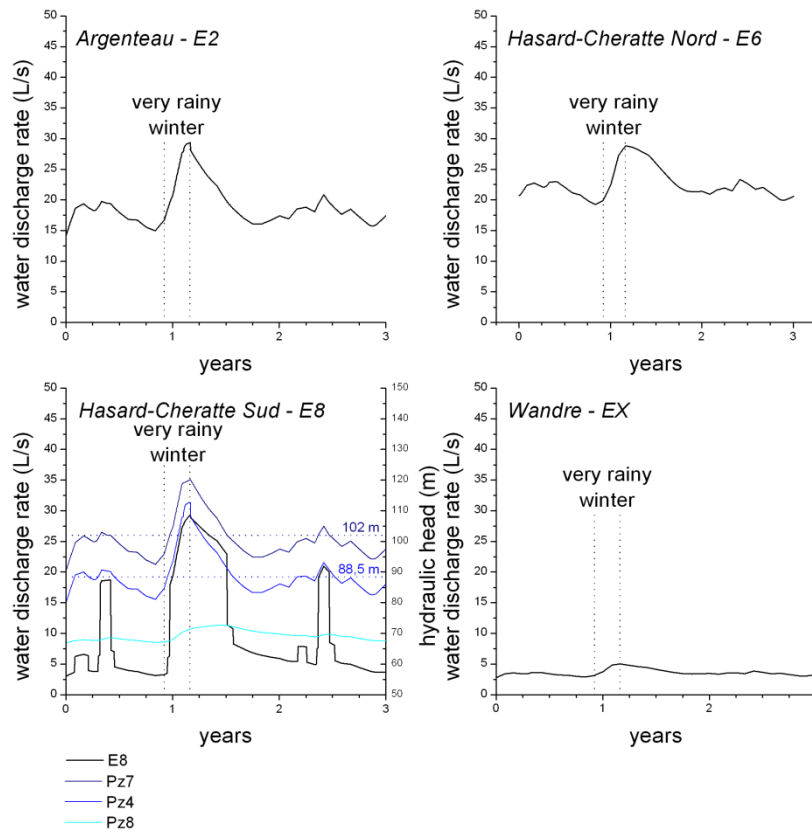


Figure 10 – Scénario d'un hiver très pluvieux : débits simulés dans différentes galeries de drainage de la zone d'étude.

CONCLUSIONS

La méthode HFEMC (Brouyère *et al.*, 2009) est une technique de modélisation flexible qui s'avère particulièrement utile dans les contextes miniers. Grâce au couplage dynamique entre les « mixing cells » représentant les zones exploitées et les « finite elements » classiques représentant la zone inexploitée, la méthode est un compromis efficace entre les techniques de type *box model* et les techniques de type *physically-based*. La méthode peut, en outre, tenir compte des connexions directes par d'anciennes galeries entre les zones exploitées.

Les écoulements souterrains dans la zone minière de Cheratte ont été simulés avec succès en utilisant la méthode HFEMC. Une série de scénarios ont également été simulés pour améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système de façon à aider à gérer les eaux souterraines et les débits dans ces travaux miniers abandonnés.

REFERENCES

Adams, R., Younger, P.L., 1997. Simulation of groundwater rebound in abandoned mines using

physically based modelling approach, Proc. of the 6th International Mine Water Association Congress, pp. 353-362, Bled.
 Barchy, L., Marion, J.-M., 2000. Carte géologique de Wallonie, Planchettes Dalhem – Herve (42/3-4), Edition: Service public de Wallonie, DGO 3 (DGARNE), Belgique.
 Boyaud, C., Therrien, R., 2004. Numerical modelling of mine water rebound in Saizerais, northeastern France, 15th International Conference on Computational Method in Water Resources, Amsterdam, The Netherlands.
 Brouyère, S., 2001. Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé, Thèse de Doctorat, Université de Liège.
 Brouyère, S., Carabin, G., Dassargues, A., 2004. Climate change impacts on ground water resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium, *Hydrogeology Journal*, 12, pp. 123-134.
 Brouyère, S., Orban, Ph., Wildemeersch, S., Couturier, J., Gardin, N., Dassargues, A., 2009. The Hybrid Finite Element Mixing Cell method: a new flexible method for modelling mine ground water problems, *Mine Water and the Environment*, 28(2), pp. 102-114.
 Carabin, G., Dassargues, A., 1999. Modeling ground water with ocean and river interaction, *Water Resources Research*, 35(8), pp. 2347-2538.
 Eckart, M., Kories, H., Rengers, R., Unland, W., 2004. Application of a numerical model to facilitate mine water management in large coalfields in Germany,

- Proc. of Mine Water 2004: Process, Policy and Progress, pp. 209-218, Newcastle-upon-Tyne.
- Gardin, N., Brouyère, S., Dassargues, A., 2005. Modélisation de la remontée des niveaux piézométriques dans les massifs affectés par des travaux miniers dans l'ancien bassin charbonnier liégeois - Site pilote de Cheratte, Université de Liège, 90 p.
- Hill, M.C., Tiedeman, C.R., 2007. Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- Poeter, E.P., Hill, M.C., Banta, E.R., Mehl, S., Christensen, S., 2005. UCODE_2005 and six other computer codes for universal sensitivity analysis, calibration, and uncertainty evaluation, U.S. Geological Survey Techniques and Methods TM 6-A11.
- Rossman, L.A., 2000. EPANET 2 - users manual, National Risk Management Research Laboratory, Office Of Research And Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 45268.
- Sherwood, J.M., Younger, P.L., 1994. Modelling groundwater rebound after coalfield closure: an example from County Durham, Proc. of the 5th International Mine Water Association Congress, vol. 2, pp. 769-777, Nottingham.
- Sherwood, J.M., Younger, P.L., 1997. Modelling groundwater rebound after coalfield closure, Proc. of the 28th Congress of the International Association of Hydrogeologists, Groundwater in the urban environment: Processes and Management, vol. 1, pp. 165-170, Rotterdam.
- Wildemeersch, S., Couturier, J., Orban, Ph., Gardin, N., Brouyère, S., Dassargues, A., 2008. Modélisation d'une partie du bassin charbonnier de Liège selon une approche mixte au moyen du logiciel SUFT3D, Rapport final, RW08/01, Université de Liège, 108 p.
- Wildemeersch, S., Brouyère, S., Orban, Ph., Couturier, J., Dingelstadt, Cl., Veschkens, M., Dassargues, A., 2010. Application of the Hybrid Finite Element Mixing Cell method to an abandoned coalfield in Belgium, *Journal of Hydrology*, 392, pp. 188-200.
- Younger, P.L., Banwart, S.A., Hedin, S.H., 2002. Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation, Kluwer Academic Publishers.