



Utilisation de la modélisation pour l'analyse des données de prospection hydrogéologique en vue du projet de drainage de la mine de fer de Yakovleva – Russie

Traoré Ibrahima Amadou¹, Evguéni Alexeïvitch Lomakine², Alexandre Vassilievitch Pospelov³

¹Expert Hydrogéologue

²Maître de Conférences, Université des Mines de Saint Pétersbourg, Russie

³Maître-assistant, Université des Mines de Saint Pétersbourg, Russie

Résumé

La mine de fer de Yakovleva, située en Russie, fait partie d'une région minière parmi les plus riches et les plus étendues au monde, l'Anomalie Magnétique de Kursk. Cette mine se trouve dans des conditions hydrogéologiques très complexes mais sa richesse exceptionnelle en fer a permis de mobiliser les financements nécessaires pour sa prospection très détaillée en vue de son drainage. Une information abondante sur la structure hydrogéologique de la région a été obtenue durant les différentes étapes de cette prospection, y compris grâce à la géophysique, aux essais de pompage sans piézomètre, aux essais de pompage avec piézomètres et aux essais de drainage de la mine grandeur nature, sur une durée de plus de deux ans. Les impacts de ces essais ont été suivis sur 86 piézomètres répartis entre toutes les nappes existantes. Il a été établi une forte incidence de l'échelle de l'expérimentation sur la valeur des transmissivités déterminées. Les modèles numériques conçus sur la base des informations recueillies ont permis la correction du schéma de drainage initialement prévu. Les simulations réalisées ont également permis d'analyser l'incidence de l'hétérogénéité des nappes sur les résultats des essais de pompage, notamment ceux obtenus à partir des courbes de Jacob -Theis. Il a été illustré que dans l'hypothèse d'une distribution en fonction aléatoire stationnaire des transmissivités efficaces, les résultats des essais de pompage donnent des valeurs en relation inverse du coefficient de variation.

Mots clé : hydrogéologie, essais de pompage, modélisation, hétérogénéité.

Use of modeling for hydrogeological survey data analysis for the Yakovleva iron mine drainage project – Russia

Abstract:

The Yakovleva iron mine, in Russia, is part of one of the richest and most extensive mining regions in the world, the Kursk Magnetic Anomaly in Russia. This mine is located among very complex hydrogeological conditions but the density of its exceptional iron resources allowed to raise the necessary funds for its very detailed prospection with the perspective of its drainage. During the various stages of this prospecting abundant data on the hydrogeological structure of the region was procured, as well through geophysics, pumping tests without piezometer, pumping tests with piezometers as by large, real size, mine drainage tests over a period of two years. The impacts of these tests were monitored on 86 piezometers distributed among all the existing aquifers. A strong impact of the scale of the experiment on the value of the defined transmissivities has been established. Numerical models designed on the basis of the collected data allowed us to correct the drainage scheme initially planned. The simulations allowed us as well to analyze the impact of the heterogeneity of the aquifers on the results of the pumping tests, in particular those obtained from the Jacob-Theis curves. It has been illustrated that, in the hypothesis of a random stationary distribution of the effective transmissivities, the results of the pumping tests give values inversely related to the coefficient of variation.

Key words: hydrogeology, pumping tests, modeling, heterogeneity.

¹ Corresponding author: poulo.sinde@gmail.com

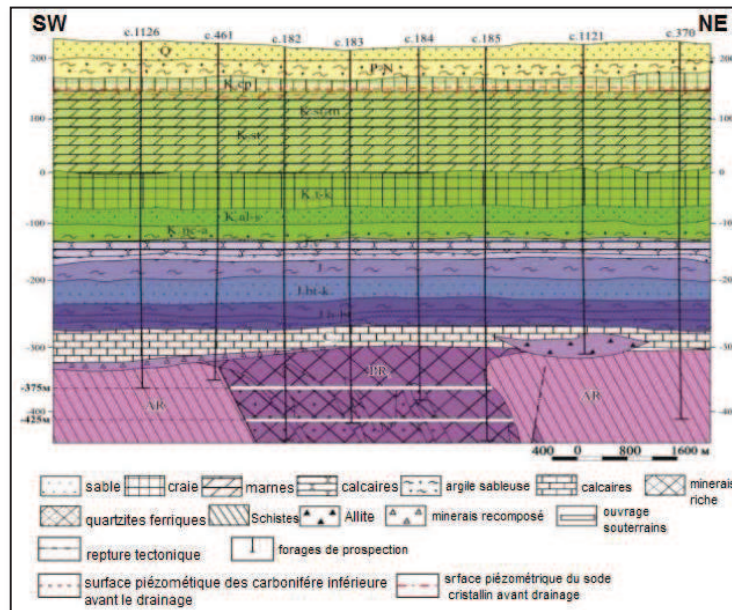
INTRODUCTION

L'augmentation constante des besoins de l'industrie en minerais de fer pousse vers l'exploitation de nouveaux gisements, notamment ceux qui se trouvent dans des conditions géologiques et hydrogéologiques de plus en plus complexes. La prospection de ces gisements engloble d'importants moyens matériels et financiers. Parmi les principaux facteurs de difficulté d'exploitation de ces mines, on note la profondeur et la submersion d'eau du minerai et des roches encaissantes. La conception d'un schéma de drainage approprié nécessite une étude hydrogéologique détaillée, permettant d'assurer la sécurité des travaux préparatoires et des travaux d'exploitation de ces mines. Cela est difficile à atteindre sans l'aide de la modélisation. En effet, les multiples facteurs, parmi lesquels l'hétérogénéité des nappes, leurs grands débits ainsi que le cloisonnement entre les hydrogéologues et les miniers, conduisent souvent à des travaux de prospection insuffisants ou inappropriés. Le recours à la modélisation permet de corriger les erreurs commises et d'orienter les futurs travaux de prospection. En outre, cet outil permet de mieux appréhender l'incidence de chaque facteur de complexité, notamment l'hétérogénéité des nappes sur la méthodologie de la prospection hydrogéologique et le choix du schéma de drainage optimal.

DONNEES ET METHODE

Contexte

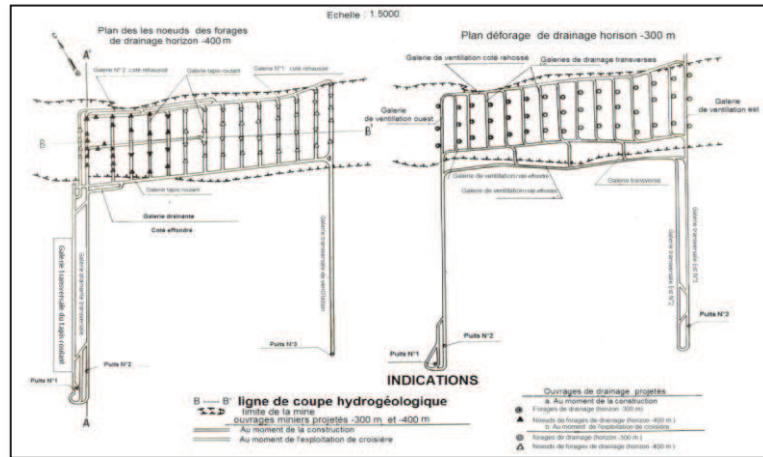
La Russie occupe la première place au monde pour les gisements de fer confirmés. L'Anomalie Magnétique de Kursk (KMA), qui s'étend sur environ 120 000 km², est le principal bastion de ces gisements. Elle s'étend sur les Régions de Kursk, Belgorod et Voronej. La mine de fer de Yakovleva est située au Nord de KMA. C'est une structure synclinale de direction NW 320°, de 70 km de longueur et de 1200 m à 1600 m de largeur. Sa structure géologique comprend deux étages géologiques : le socle cristallin du précambrien (AR – PR) recouvert par le complexe sédimentaire (C, J, K, P-N et Q).



Les gisements sont constitués de quartzites magnétiques, disséminés entre des roches métamorphiques et des granitoïdes du Précambrien sur les flancs (25% à 37% de concentration en fer) et les minerais riches issus de l'altération des granitoïdes (52% à 66% de concentration en fer), situés à une profondeur d'environ 600 m au cœur des granitoïdes altérés.

Les conditions hydrogéologiques sont complexes : six nappes superposées contribuent à divers degrés à la submersion du gisement. Ces nappes sont les suivantes : (i) la nappe du socle cristallin ; (ii) celle du carbonifère inférieur ; (iii) celle du kimméridgien-oxfordien ; (iv) celle du Cénomaniens-albien ; (v) celle des calcaires du Crétacé supérieur ; et (vi) celle du Paléogène – Néogène et Quaternaire. Les paramètres de filtration des différentes nappes sont très variables et la plupart d'entre elles sont caractérisées par une hétérogénéité très marquée.

Le projet de drainage de la mine de fer de Yakovleva prévoyait un système mixte, à savoir : (i) le drainage provisoire de la nappe calcaire du carbonifère inférieur pour en rabattre les charges hydrostatiques grâce à un système superficiel de forages centraux ; et (ii) le drainage permanent de la mine grâce à un système souterrain autour de deux galeries drainantes aux horizons - 300 m et - 400 m. Cela permettra de sécuriser la construction de la mine et son exploitation à un rythme de 40 millions de tonnes de minerai de fer riche pendant au moins 60 ans.



Travaux De Terrain

Du fait de la complexité des conditions de gisement, la prospection hydrogéologique de la mine de fer de Yakovleva s'est déroulée en trois principales phases : (i) la prospection préliminaire de l'ensemble des six nappes ; (ii) la prospection détaillée des nappes du socle cristallin, du carbonifère inférieur et du kimméridgien-oxfordien ; et (iii) des essais de drainage superficiel de la nappe du carbonifère inférieur et du Kimméridgien-oxfordien en grandeur nature.

Lors de la prospection préliminaire, outre les travaux de géologie et de géophysique réalisés, 43 pompages d'essai sans piézomètre répartis sur l'ensemble des nappes, ont été effectués et suivis pour estimer les paramètres hydrodynamiques de chacune de ces nappes. La durée de ces essais de pompage a varié entre 2 jours et 5 jours. La prospection détaillée s'est concentrée sur les nappes ayant le plus d'impact sur la submersion du gisement, en l'occurrence les trois nappes inférieures. Une dizaine de pompages d'essai avec des piézomètres répartis entre les trois nappes ont été réalisés. Leur durée a varié entre 15 jours et 2 mois. Un premier essai de drainage, d'une durée de 20 jours a été effectué dans la nappe du Kimméridgien-oxfordien à partir d'un forage avec un débit de 690 m³/j. Un second essai de drainage, d'une durée de 11 mois, a été effectué dans la nappe du carbonifère inférieur à partir de deux forages centraux, d'un débit cumulé de 5 000 m³/j.

Enfin, pour tester le comportement des nappes face aux rabattements prévus par l'exploitation de la mine, un troisième essai de drainage de la mine d'une durée de 28 mois, a été effectué. Ainsi, 12 forages à grand diamètre (1 m) ont été réalisés, dont dix (10) équipés dans la nappe du carbonifère inférieur, un (01) dans la nappe du socle cristallin et un (01) autre dans la nappe du kimméridgien-oxfordien, sur une parcelle de 1000 m x 550 m, où les transmissivités du carbonifère inférieur sont les plus importantes. Le débit cumulé des forages est de 168 000 m³/j ; les rabattements ont été suivis à partir de 86 piézomètres, répartis entre toutes les nappes.

Modélisation

Un paquet de programmes basés sur les différences finies, STIMUL, conçu au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université des Mines de St Pétersbourg, a été utilisé pour la modélisation. L'utilisation de STIMUL permet de faire appel, selon les besoins, à différents schémas de résolution parmi lesquels : (i) un schéma implicite localement unidimensionnel, caractérisé par sa fiabilité ; et (ii) un schéma implicite aux directions alternées, caractérisé par sa rapidité de calcul et sa précision. En outre, STIMUL comporte différents autres sous-programmes, parmi lesquels celui permettant de générer le champ d'une fonction aléatoire stationnaire dont l'espérance mathématique et la dispersion sont connues.

Le paquet de programmes STIMUL a été utilisé pour le traitement et l'analyse des données de terrain recueillies avec deux principaux objectifs : (i) la conception d'un modèle hydrodynamique permettant de vérifier l'efficacité et l'optimalité du système de drainage projeté ; et (ii) l'étude de l'impact du degré d'hétérogénéité de la nappe du carbonifère inférieur sur les résultats des essais de pompage simulés sur cette nappe. La réalisation de ce second objectif a nécessité la définition d'un maillage espace-temps particulier, permettant une meilleure simulation des essais de pompage.

RESULTATS ET DISCUSSION

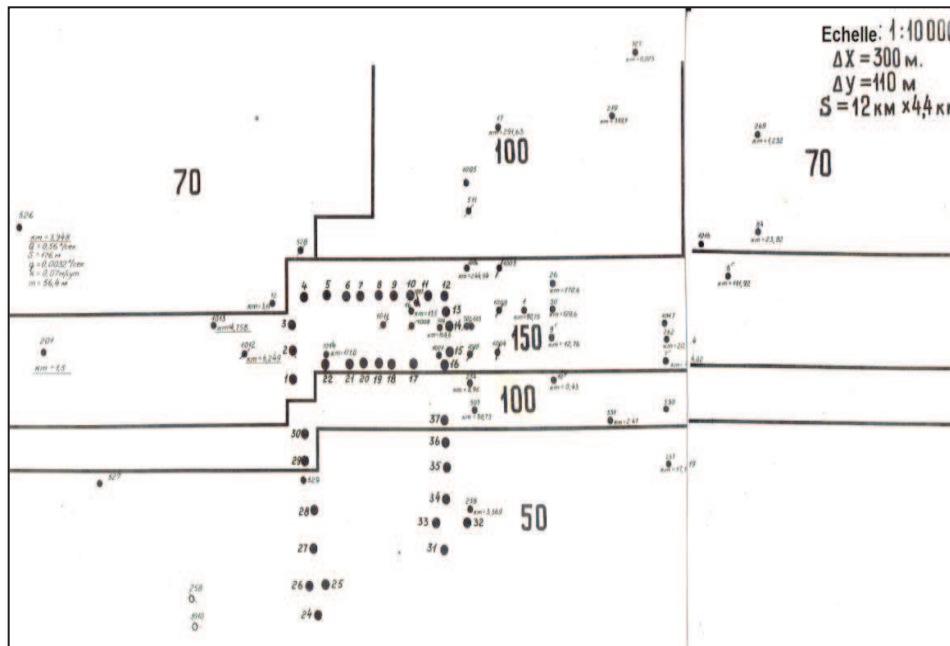
Analyse Manuelle Des Données De Terrain

Le traitement des essais de pompage et de drainage de la mine ainsi que les cartes piézométriques réalisées sur la base des mesures de terrains ont conduit aux constats suivants :

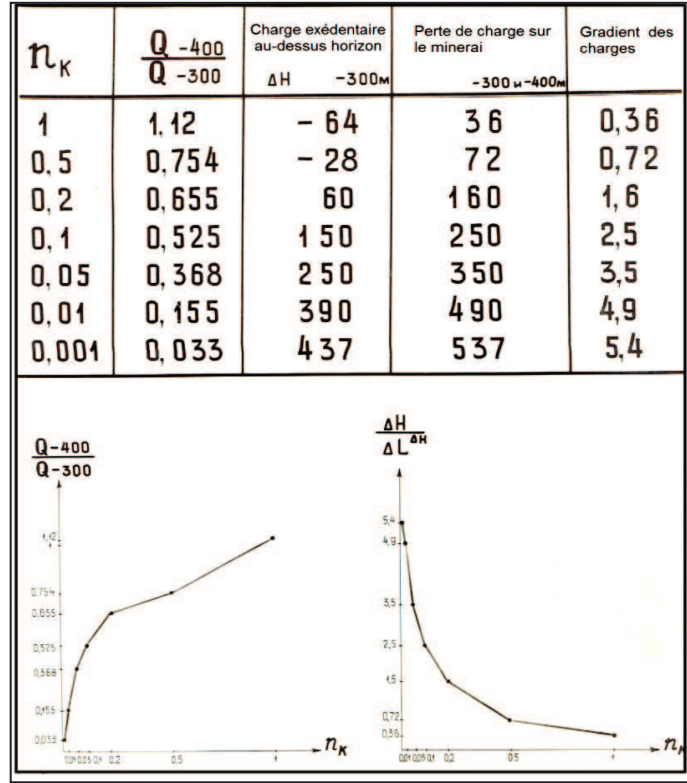
- (i) La nappe du kimméridgien-oxfordien ainsi que toutes celles disposées au-dessus de cette nappe, ont un rôle très limité dans la submersion de la mine de fer de Yakovleva. On estime à environ 8% du débit total des pompages, celui dû à l'écoulement piézo-sensible de toutes ces nappes superficielles vers la mine ;
- (ii) Les nappes du socle cristallin et du carbonifère inférieur ont réagi de façon synchrone aux sollicitations des essais de drainage et ont fonctionné comme un seul et même système aquifère ;
- (iii) La surface de dépression du carbonifère inférieur est une ellipse allongée suivant l'axe de la structure synclinale, preuve d'une anisotropie marquée pour cette nappe ; cette anisotropie est moins marquée pour la nappe du socle cristallin. Néanmoins, les deux nappes, parfaitement liées, peuvent être assimilées à un et seul système aquifère, avec une grande transmissivité et une hétérogénéité spatiale forte. Ainsi, quatre différentes zones de transmissivité ont été dégagées au niveau de ce système.

Modelisation Du Drainage De La Mine

La modélisation concerne uniquement le système aquifère inférieur, à savoir celui constitué par la nappe du carbonifère inférieur et du socle cristallin. Le traitement des données de terrain avec le programme STIMUL a permis de préciser les principaux paramètres hydrodynamiques de ce système, notamment les transmissivités et le coefficient d'emmagasinement.



Malgré tous les essais in situ, l'optimalité du système de drainage permanent projeté, à savoir des ouvrages de drainage aux horizons – 300 m et – 400 m, n'a pu être confirmée. En effet, après le drainage superficiel, le système de drainage souterrain fonctionnerait, au niveau de la zone assainie, tel un système d'écoulement monodimensionnel, conditionné par les surfaces piézométriques des deux nappes (carbonifère inférieur et socle cristallin) et la perméabilité verticale de la partie minière séparant les deux galeries drainantes. Ce dernier paramètre n'a pas été déterminé lors des travaux de terrain. Cette erreur est due au cloisonnement des services de prospection hydrogéologique et des exploitants miniers. Pour pallier cette insuffisance l'on a eu recours aux tests de sensibilité de l'efficacité du système de drainage projeté, par rapport aux valeurs du coefficient de perméabilité verticale de la couche minière. Les différents scénarii considèrent différents rapports n_k entre la perméabilité verticale et horizontale de cette couche. Ces rapports n_k ont varié comme suit : 1 ; 0,5 ; 0,1 ; 0,01 ; et 0,001, ce qui permet d'embrasser les différents cas réalistes allant du milieu isotrope à un milieu fortement anisotrope.



Les résultats de la modélisation montrent que pour des valeurs de $n_k > 0,1 - 0,2$ il est possible d'assurer le drainage du système aquifère considéré uniquement grâce aux ouvrages situés à l'horizon - 400 m. Au vu des essais de perméabilité de laboratoire, ce scénario a été jugé réaliste. Il a été conclu que le système de drainage souterrain à l'horizon - 300 m n'était pas nécessaire.

Simulation Des Pompages D'essai D'une Nappe Heterogene

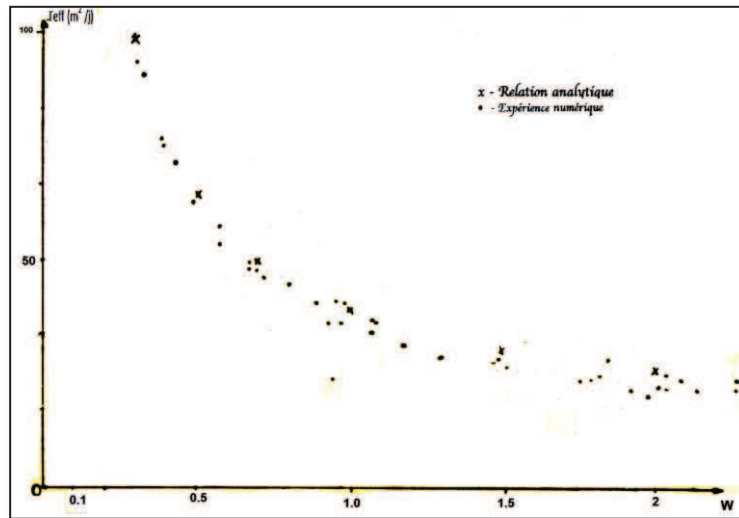
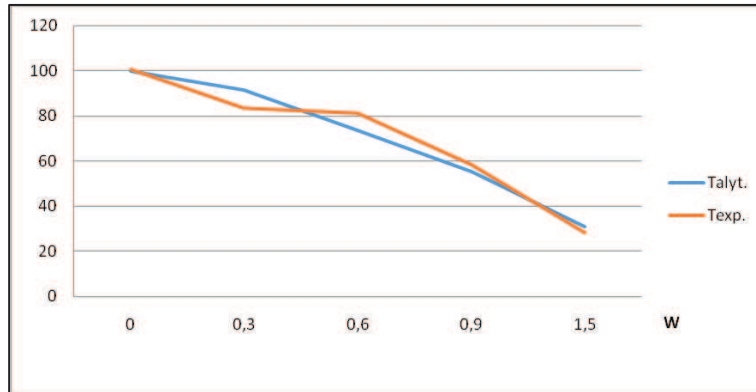
La grande quantité de données de terrain disponibles a encouragé les auteurs à chercher à mieux comprendre l'incidence du degré d'hétérogénéité d'une nappe assimilable à celle des calcaires fissurés et karstifiés du carbonifère inférieur, sur les résultats d'essais de pompage sur cette nappe. Les résultats de l'analyse bibliographique préliminaire et des simulations réalisées grâce au programme STIMUL sont décrits ci-dessous.

Une large analyse bibliographique montre que plusieurs auteurs (hydrogéologues, pétroliers, géotechniciens, etc.) penchent pour une distribution log normale des transmissivités et que certains pensent que cette distribution devient plus symétrique et tend vers une distribution normale, lorsque les essais de pompage réalisés sont de plus longue durée et à débits suffisants. Dans le cadre des simulations réalisées, il a été considéré une fonction aléatoire stationnaire, de distribution log-normale, avec une espérance mathématique de $100 \text{ m}^2/\text{J}$ et un coefficient de variation prenant différentes valeurs suivant les tests, de 0 à 1,5. Les résultats des tests sont les suivants :

- (i) Les transmissivités calculées par la méthode de Jacob-Theis ont les mêmes valeurs au niveau de tous les piézomètres situés dans la zone quasi-stationnaire. Ces valeurs ne dépendent pas des valeurs des transmissivités des mailles sur lesquelles les différents piézomètres sont situés ;
- (ii) Les tests de sensibilité ont montré que les transmissivités déterminées par les courbes du temps et celles de l'espace par la méthode de Jacob-Theis, correspondent respectivement aux paramètres des zones externes et internes de la limite de la zone quasi-stationnaire. En conséquence un écart entre ces valeurs est une preuve d'hétérogénéité spatiale dans le plan;
- (iii) Le traitement des essais de pompage de longue durée dans une nappe hétérogène dans le plan donne des résultats presque identiques à ceux de la relation analytique suivante :

$$T_{eff} = \frac{T_{moy}}{1 + \frac{W^2}{2}}$$

- Où : T_{eff} - valeur de la transmissivité efficace de la nappe
 T_{moy} - moyenne géométrique des résultats des essais de pompage pour les simulations et espérance mathématique pour la courbe analytique
 W- coefficient de variation.
 T_{eff} (m²/j)



CONCLUSION

L'étude réalisée a permis d'illustrer ce qui suit :

- (i) Le cloisonnement des services de prospection hydrogéologique et d'aménagement liés aux eaux souterraines peut conduire à des erreurs dans la conception des projets d'eau ;
- (ii) La souplesse de l'outil de modélisation permet de prendre des décisions même dans certains cas où l'information n'est pas suffisante ;
- (iii) La disponibilité d'une riche information de terrain a permis, grâce à la modélisation, de mieux comprendre l'impact du degré d'hétérogénéité d'une nappe sur la valeur de sa transmissivité efficace.