

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE L'AÉROPORT DE HAVRE-SAINT-PIERRE

David Morin, TechnoRem Inc., Québec, Canada
Annie Morin, TechnoRem Inc., Québec, Canada
Caroline Scalzo, TechnoRem Inc., Québec, Canada
Isabelle Desjardins, TechnoRem Inc., Québec, Canada
Jean-Marc Lauzon, TechnoRem Inc., Québec, Canada
Frédéric Valcin, Transports Canada, Québec, Canada
Adriana G. Peisajovich, Transports Canada, Québec, Canada

ABSTRACT

Environmental site characterization work at a site in Havre-Saint-Pierre, Quebec, revealed a plume of lead-impacted groundwater with a total area of approximately 700 m². Groundwater impact takes its source within the soil but reach the underlying bedrock aquifer. The modeling of lead transport shows that the plume would stabilize in less than 10 years and that maximum lead concentrations < 1 µg/L could reach a drinking water well located in the vicinity of the impacted zone.

RÉSUMÉ

Des travaux de caractérisation environnementale sur un site de Havre-Saint-Pierre au Québec ont permis de délimiter une enclave de contamination de l'eau souterraine en plomb d'une superficie totale d'environ 700 m². La contamination, qui prend sa source dans les sols de surface, atteint l'aquifère du roc. La simulation numérique du transport du plomb montre que l'enclave se stabiliserait en moins de 10 ans et que des concentrations maximales en plomb < 1 µg/L pourraient atteindre un puits d'alimentation en eau potable situé à proximité de la zone affectée.

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en situation

Des travaux d'investigation environnementale réalisés de 1998 à 2001 dans le cadre de la cession de l'aéroport de Havre-Saint-Pierre ont révélé des concentrations supérieures aux critères d'eau de consommation pour les hydrocarbures pétroliers et le plomb dans le secteur des anciens réservoirs d'une compagnie aérienne qui étaient situés au coin sud-ouest du tablier de l'aéroport (figures 1 et 2). Le programme de suivi environnemental mis en place a permis de mesurer des concentrations maximales en hydrocarbures pétroliers de 42 000 µg/L et en plomb de 773 µg/L à l'extrémité sud-ouest du tablier. La contamination en hydrocarbures proviendrait d'anciens déversements ou de l'écoulement de produits pétroliers à partir de sources différentes alors que l'origine de la contamination en plomb est incertaine.

On retrouve 6 puits d'eau potable au sud de l'aérogare : 5 approvisionnent la municipalité de Havre-Saint-Pierre tandis que l'autre approvisionne l'aérogare. Le puits de pompage de l'aérogare se trouve à 110 mètres au sud-est de l'aérogare. Les puits de la municipalité sont situés de 400 à 2 500 m au sud de l'aéroport (figure 1).

À l'été 2002, une firme d'ingénieurs conseils, a mis en route un système d'extraction à double phase avec rabattement de la nappe d'eau souterraine, couplé à une unité d'aération/filtration, afin de traiter les eaux souterraines. Après une saison de traitement, les résultats

démontrent que les concentrations en hydrocarbures sont redevenues conformes aux critères applicables.

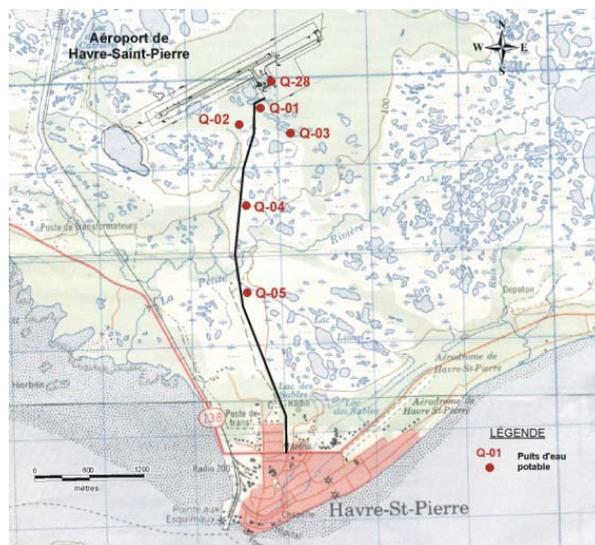


Figure 1. Localisation de l'aéroport et des puits de captage d'eau potable de la ville de Havre-Saint-Pierre

Toutefois, les concentrations en plomb n'ont pas diminué et le panache de contamination a plutôt augmenté de volume. On constate que la zone la plus affectée demeure le secteur sud-ouest du tablier, où la concentration en plomb est de 573 µg/L alors que la norme pour le plomb dans l'eau potable est de 10 µg/L.

Des piézomètres sont situés à la limite de la propriété de Transports Canada (TC), afin de détecter toute anomalie pouvant migrer à l'extérieur de l'aéroport. L'un des piézomètres indique des concentrations en plomb à 53,1 µg/L alors qu'il y a 2 ans, le plomb y était détecté à l'état trace.

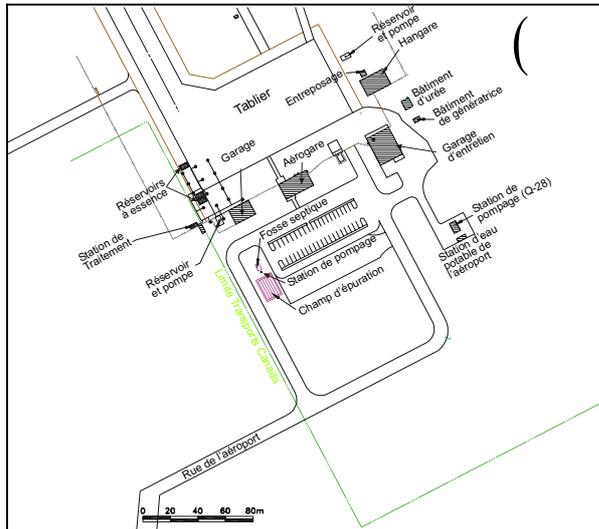


Figure 2. Localisation détaillée du site des travaux environnementaux

Suite à ce constat, TC désirait procéder à une caractérisation complémentaire approfondie afin de circonscrire la contamination en plomb retrouvée en phase dissoute dans les eaux souterraines et, par le recours à la modélisation mathématique, contribuer à la compréhension des processus de transport et d'atténuation naturelle de ce contaminant dans l'aquifère de surface ainsi que dans la formation rocheuse.

1.2 Objectifs de l'étude

Les travaux proposés visaient l'atteinte des objectifs suivants :

- La détermination précise de l'étendue de la contamination en plomb, tant dans l'unité hydrostratigraphique de surface composée de sable silteux que dans la formation rocheuse sous-jacente.
- L'identification des sources de contamination en plomb sur le site de l'aéroport et en aval.
- L'évaluation et la vérification d'une contamination des sols en plomb et son impact sur la qualité des eaux souterraines. Le cas échéant, évaluer l'ampleur et l'importance de la contamination des sols.
- La détermination, par modélisation mathématique, du risque de contamination du puits d'eau potable de l'aéroport ainsi que ceux de la municipalité de Havre-Saint-Pierre, situés à proximité de l'aéroport.
- La détermination du potentiel d'atténuation naturelle de la contamination en plomb dans l'eau souterraine.
- L'estimation, par modélisation mathématique, de la durée approximative de réduction des concentrations

en plomb sous le critère d'eau potable par les processus d'atténuation.

- L'évaluation, par modélisation mathématique, des impacts du pompage sur les puits d'eau potable et sur la migration des contaminants.
- La réalisation des analyses chimiques, physiques et microbiologiques ainsi que d'essais en laboratoire (essais d'absorption, essais de fixation par un minéral, essais d'applicabilité en milieu réducteur, etc.) de manière à procurer les données précises au modèle de transport de contaminants en plus de fournir une base scientifique et concrète à la sélection des alternatives de gestion environnementale en fonction de critères de faisabilité, de performance et de coûts.

2. DESCRIPTION ET HISTORIQUE DU SITE

L'aéroport de Havre-Saint-Pierre est localisé à 5 km au nord de la municipalité de Havre-Saint-Pierre, sur la Basse-Côte-Nord au Québec. Le site s'étend sur une superficie de près de 1 km², à une élévation d'environ 32 m au-dessus du niveau de la mer. Le site comprend une piste d'atterrissage orientée est-ouest de 1,3 km de longueur, une voie de circulation, un tablier (7 200 m²), une aérogare (256 m²), un stationnement et divers bâtiments, infrastructures et équipements. Les terrains entourant l'aéroport sont marécageux et on y retrouve de nombreux lacs et tourbières (figures 1 et 2).

Les eaux de surface sont partiellement drainées par un réseau d'égouts pluviaux bordant la piste, le tablier et les voies d'accès. Les eaux usées sont recueillies par un égout sanitaire qui les dirige vers une fosse septique et un champ d'épuration.

L'eau potable est fournie par le puits Q-28, situé à environ 110 m au sud-est de l'aérogare. La municipalité est de plus approvisionnée en eau potable par les cinq puits Q-01 à Q-05, qui ont été forés au printemps 1988 le long de la route d'accès à l'aéroport (figure 1).

La nappe d'eau souterraine est rencontrée à une profondeur de 0,05 à 5,0 m et s'écoule généralement vers le sud, le sud-est ou le sud-ouest. La géologie du site comprend des dépôts de sable recouvrant le socle rocheux dolomitique à une profondeur de 0,6 à 6,0 m.

3. SOMMAIRE DES TRAVAUX RÉALISÉS

Les principaux travaux effectués dans le cadre de cette étude ont inclus :

- la réalisation de 10 forages dans le roc à une profondeur approximative de 5 mètres et de 15 mètres incluant l'installation de puits d'observation dans chacun des forages ;
- la réalisation de 9 forages transformés en puits d'observation dans les sols de surface ;
- l'arpentage et le nivellement des travaux environnementaux ;

- le prélèvement de 45 échantillons de sols ;
- le prélèvement d'environ 40 litres de sol, 5 litres de roche broyée et 75 litres d'eau souterraine pour la réalisation d'essais de laboratoire ;
- l'analyse de 16 échantillons de sols (incluant les duplicata) ;
- l'analyse granulométrique de 2 échantillons de sol ;
- la réalisation de 10 essais hydrauliques dont 7 par essai de pompage de courte durée et trois 3 par essai de perméabilité ;
- la mesure des niveaux d'eau et des paramètres physico-chimiques dans les puits disponibles, anciens et nouveaux ;
- le prélèvement et l'analyse de 40 échantillons d'eau souterraine ;
- la réalisation d'une étude par modélisation mathématique permettant de simuler l'écoulement de l'eau souterraine et le comportement de la contamination en plomb ;
- l'identification des récepteurs potentiels et une étude d'évaluation du risque ; et,
- l'évaluation des alternatives de gestion environnementale et/ou de décontamination du site.

La localisation des puits d'observation existants ainsi que ceux réalisés par TechnoRem est montrée à la figure 3.

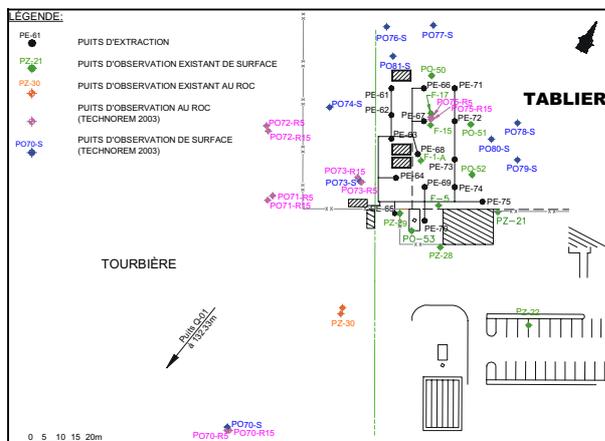


Figure 3. Localisation des travaux environnementaux réalisés par TechnoRem (2003) dans le secteur sud-ouest du tablier

4. GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

4.1

4.2 Géologie

Les dépôts de surface sur le site de l'aéroport sont constitués de sable fin à moyen. Le remblai de surface et le sable naturel sont souvent difficiles à distinguer en raison de leur composition similaire et de l'absence générale de débris. Une analyse granulométrique réalisée sur deux échantillons composites indique une composition de sable (80,3 à 92,2%), avec traces de gravier (3,9 à

4,8%) et de silt (3,0 à 9,2%), et d'argile (6,6%) dans un des deux cas. Des couches silteuses à argileuses ou de terre végétale inférieures à 70 cm d'épaisseur sont présentes localement. Les dépôts de surface ont une épaisseur totale de 0,2 m à 6,0 m. Celle-ci augmente généralement du nord vers le sud.

Le roc rencontré dans les forages est une dolomie ou un calcaire dolomitique à grain fin, plus ou moins fracturé. La géologie du site est illustrée, sous forme de coupe géologique, à la figure 4.

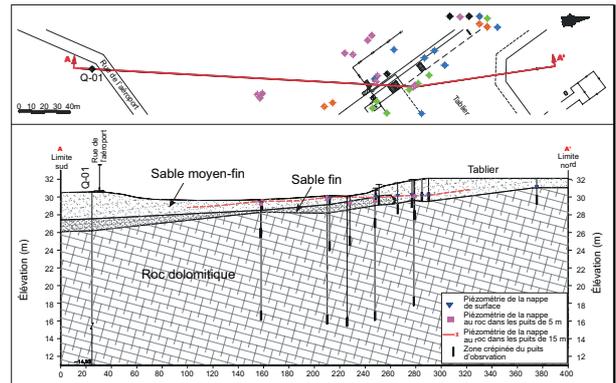


Figure 4. Coupe géologique A-A'

4.3 Hydrogéologie

Deux unités hydrographiques ont été identifiées sur le site. L'unité supérieure est formée de la portion saturée des dépôts de sable. Cette unité constitue l'aquifère de surface. L'unité sous-jacente est le socle rocheux dolomitique, plus ou moins fracturé et poreux.

En novembre 2003, la nappe d'eau de surface a été rencontrée à une profondeur de 0,3 à 1,9 m, alors que la nappe d'eau du roc a été rencontrée à une profondeur de 0,05 à 2,5 m. Les résultats des essais de perméabilité indiquent une conductivité hydraulique moyenne dans les dépôts de sable de $6,1 \times 10^{-6}$ m/s. La vitesse de migration de l'eau souterraine dans l'unité de sable serait de l'ordre de 27 m/an.

Les résultats des essais de pompage de courte durée et de remontée indiquent des transmissivités dans l'aquifère de roc de faible profondeur (5 m) plus élevées que celles calculées pour l'aquifère du roc profond (15 m). Les transmissivités pour l'aquifère du roc de faible profondeur varient de $7,7 \times 10^{-6}$ à $1,2 \times 10^{-4}$ m²/s. Les transmissivités pour l'aquifère du roc plus profond varient de $5,8 \times 10^{-7}$ à $3,4 \times 10^{-6}$ m²/s. La moyenne géométrique de la transmissivité pour l'aquifère du roc dans son ensemble est de $7,6 \times 10^{-6}$ m²/s.

Le relevé piézométrique des dépôts de surface indique que l'eau souterraine s'écoule généralement vers le sud en fonction d'un gradient horizontal moyen de l'ordre de 0,035 m/m. Les lignes isopièzes semblent s'incurver autour de la bordure du tablier de l'aéroport et on observe un dôme au sud-est du tablier (puits PZ-31 et PZ-32), qui

pourrait suivre la surface topographique et/ou résulter de la présence d'un fossé de drainage longeant la route d'accès à l'aéroport (figure 5).

Le relevé piézométrique basé sur les puits forés à 5 m de profondeur indique un écoulement vers l'ouest-sud-ouest, soit en direction de la tourbière qui forme un creux topographique au sud-ouest du tablier de l'aéroport. Le gradient hydraulique moyen est de 0,048 m/m. Le relevé basé sur les puits forés à 15 m de profondeur indique un écoulement vers le sud-ouest en fonction d'un gradient hydraulique moyen de 0,011 m/m (figure 6).

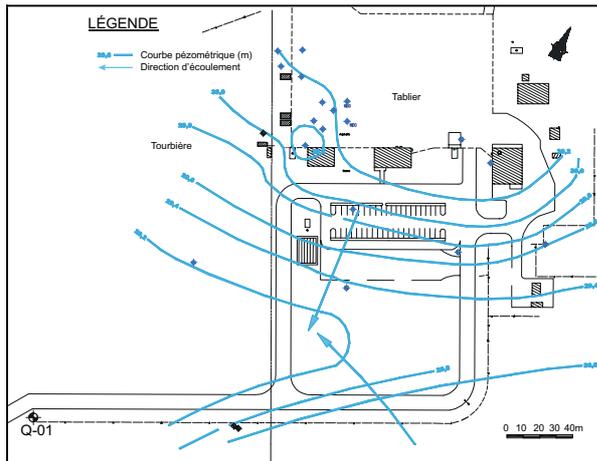


Figure 5. Piézométrie de l'aquifère de surface

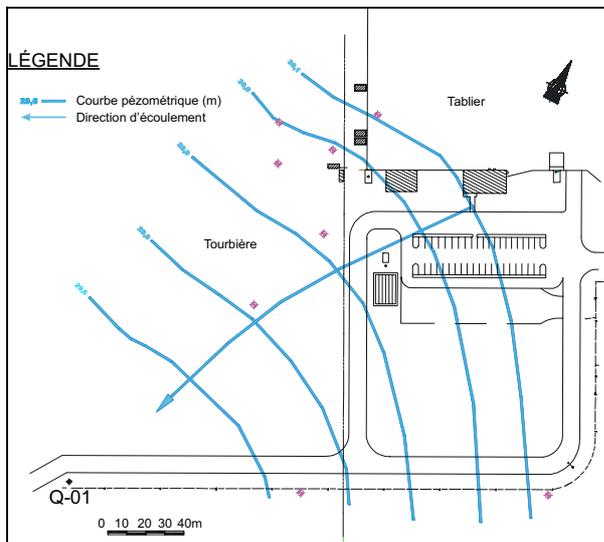


Figure 6. Piézométrie de l'aquifère rocheux

5. QUALITÉ DES SOLS ET DES EAUX SOUTERRAINES

5.1 Qualité des sols

Au Québec, la qualité des sols et des eaux souterraines est évaluée en fonction de critères génériques proposés dans la *Politique de protection des sols et de réhabilitation*

des terrains contaminés (la Politique), publiée par le MENV (1998).

En fonction de l'usage du site de l'aéroport de Havre-Saint-Pierre, la qualité des sols a été évaluée en fonction des critères C de la Politique.

À partir des 45 échantillons de sol prélevés lors des travaux de terrain, 16 ont été sélectionnés pour l'analyse des hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀ des HAM, des HAP, des métaux, du carbone organique total, de l'azote ammoniacal et de l'orthophosphate. Aucun des paramètres analysés ne dépassait les critères C (limite maximale acceptable pour des terrains à vocation commerciale et industrielle) du MENV. Les concentrations étaient en fait toutes sous les critères B (limite maximale acceptable pour des terrains à vocation résidentielle).

5.2 Qualité des eaux souterraines et étendue de l'enclave de contamination en plomb

5.2.1 Qualité des eaux souterraines

Les résultats d'analyses d'eaux souterraines sont habituellement évalués, dans la Politique, en relation avec deux critères génériques d'usage. Il s'agit 1) de l'eau pour fin de consommation (eau de consommation) et 2) de l'eau pouvant faire résurgence dans les eaux de surface ou s'infiltrer dans les égouts (eau de surface et égouts).

L'aéroport de Havre-Saint-Pierre est approvisionné en eau potable par un puits implanté dans le roc à l'est de l'aéroport. De plus, la ville de Havre-Saint-Pierre tire son eau potable de plusieurs puits situés au sud de l'aéroport (figure 1). En raison de la présence de ces puits, l'eau souterraine dans le secteur de l'aéroport est évaluée relativement aux critères d'eau de consommation de la Politique.

Quarante échantillons d'eau souterraine ont fait l'objet d'une analyse pour un ou plusieurs paramètres organiques et bactériologiques (hydrocarbures pétroliers C₁₀-C₅₀, HAM, HAP, carbone organique total et dissous, tétraéthyle de plomb, dénombrement bactérien total et bactéries réductrices du soufre) et paramètres inorganiques (métaux, dureté, alcalinité, nitrites, nitrates, sulfures, chlorures, sulfures, orthophosphate, azote ammoniacal, carbonates et bicarbonates, matières solides en suspension et solides dissous totaux).

En novembre 2003, les paramètres dépassant les critères d'eau de consommation dans l'eau des puits échantillonnés étaient le benzo(a)pyrène (0,15 µg/L au puits F-15) et le plomb dans les puits F-1, F-15, F-17, PO-53 et PO75-R5, avec des concentrations de 11 à 180 µg/L.

5.2.2 Étendue des enclaves de contamination en plomb

Les figures 7 et 8 illustrent l'étendue approximative des enclaves de contamination de l'eau souterraine en plomb

dissous dans les aquifères de surface et du roc, respectivement. Deux enclaves sont dessinées sur chaque figure, soit une enclave regroupant les concentrations en plomb supérieures au critère d'eau de consommation du MENV (10 µg/L) et une enclave montrant des concentrations en plomb dissous inférieures à ce critère.

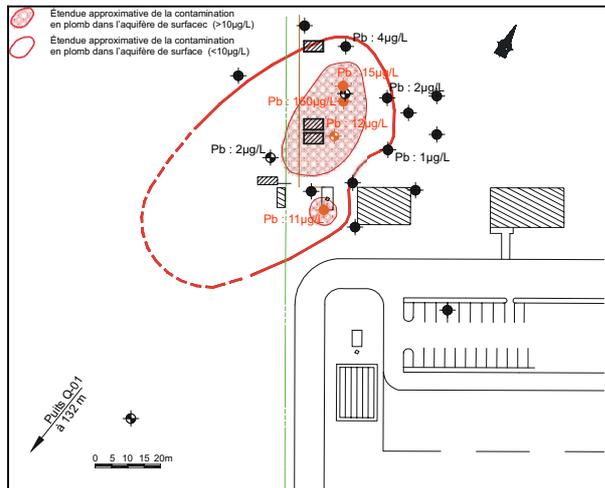


Figure 7. Étendue approximative de la contamination en plomb de l'aquifère de surface

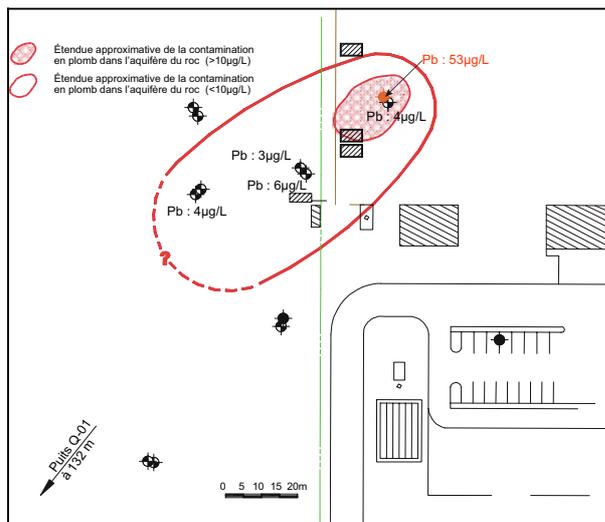


Figure 8. Étendue approximative de la contamination en plomb de l'aquifère rocheux

En novembre 2003, les concentrations en plomb excédant le critère d'eau de consommation formaient deux enclaves incluant les puits F-1, F-15 et F-17 d'une part (650 m²) et le puits PO-53 (60 m²) d'autre part. Le plomb était également détecté, mais en concentrations inférieures au critère d'eau de consommation (1 à 4 µg/L), dans les puits PO-50, PO-51, PO-52 et PO73-S. La superficie de cette enclave était estimée à environ 3 800 m², mais elle était moins bien définie, particulièrement au sud-ouest.

Dans l'aquifère du roc, les concentrations en plomb excédant le critère d'eau de consommation formaient une enclave d'environ 280 m² centrée sur le puits PO75-R5. Plusieurs autres puits contenaient de faibles concentrations en plomb (3 à 6 µg/L), formant une enclave d'environ 3 200 m². Comme dans le cas de l'enclave de surface, l'étendue de cette dernière est moins bien définie à son extrémité sud-ouest.

Ainsi, les données analytiques indiquent que la source de contamination est située dans le secteur du puits F-15 (F-17, PO75) et que la contamination en phase dissoute s'étend vers le sud-ouest, dans la direction générale de l'écoulement de l'eau souterraine.

La forme et l'étendue de l'enclave de contamination en plomb peut-être expliquée par l'action des processus d'advection, de dispersion et d'adsorption. En plus de la présence de bactéries réductrices des sulfates, des concentrations plus faibles en oxygène dissous, en sulfate et en carbone organique total, et une valeur plus faible du potentiel d'oxydo-réduction, dans l'eau des puits situés à l'intérieur de l'enclave de contamination, pourraient être les marqueurs de conditions plus réductrices et d'une activité bactérienne plus importante dans l'enclave.

De nombreux processus physiques, chimiques et biologiques jouent un rôle prépondérant sur l'évolution de la contamination en plomb dans l'aquifère. La mobilité du plomb est grandement influencée par la présence de matière organique, de particules argileuses ou colloïdales, de même que les conditions d'oxydo-réduction et de pH. Le plomb ne peut être dégradé par les processus de biodégradation. Par contre, il peut être stabilisé lors de réactions d'adsorption (argiles, matière organique, etc.) ou de précipitation (carbonate, sulfate, phosphate, hydroxyde, etc.).

6. ESSAIS DE LABORATOIRE

Des essais de laboratoire ont été entrepris à l'aide des sols et de l'eau souterraine prélevés sur le site afin de déterminer certains paramètres qui entrent dans la modélisation du transport du plomb (coefficient de distribution et facteur de retard), et d'évaluer l'applicabilité de technologies de fixation du plomb en zones réactives.

Les résultats analytiques sur les sols prélevés du forage PO75 ont montré une concentration en plomb inférieure à la limite de détection (5 mg/kg). Toutefois, des concentrations en plomb de 11 à 24 µg/L ont été mesurées dans l'eau laissée en contact avec ce sol pendant 1 à 6 jours. Ces résultats indiquent que le plomb contenu en faible concentration dans le sol peut être solubilisé rapidement.

Le coefficient de distribution (0,112 ml/g) et le facteur de retard (1,58) calculés à partir des résultats des essais d'adsorption en colonne sont beaucoup plus faibles que les valeurs tirées de la littérature pour des conditions comparables. Cet écart résulte vraisemblablement des différences dans les méthodes expérimentales (essai en

colonne versus essais d'adsorption simples) et dans la composition des sols utilisés (sols pauvres en argile et en matière organique dans nos essais).

L'ajout de nutriments dans le but de favoriser l'atteinte de conditions réductrices n'a pas permis de fixer le plomb par la réduction des sulfates en sulfures. La durée insuffisante pourrait être en cause.

L'ajout de phosphate de calcium a montré une efficacité supérieure à 99% pour la fixation du plomb dans le sable provenant du site. Toutefois, la durée de l'essai a été insuffisante pour déterminer le point de rupture, c'est-à-dire le volume d'eau contaminée à partir duquel le phosphate devient saturé en métaux. Des essais antérieurs ont montré une efficacité équivalente à 0,9 à 1,4 mg de plomb retenu par gramme de phosphate ajouté à du sable de silice.

7. MODELISATION NUMERIQUE

Les modèles MODFLOW (McDonald et Harbaugh, 1988) et MT3D (Zheng, 1992), et l'interface GMS, ont été utilisés pour simuler le comportement de l'eau souterraine et du transport réactif de la contamination en plomb sous le site de l'aéroport. La figure 9 illustre le maillage tridimensionnel et la distribution des conditions limites. L'écoulement modélisé de l'eau souterraine se fait vers le sud, mais on note une influence des puits de captage dans l'aquifère du roc. La piézométrie de l'aquifère rocheux obtenue par modélisation numérique est illustrée à la figure 10. Le gradient hydraulique horizontal moyen simulé est de 0,006 m/m sur l'ensemble du site de l'aéroport.

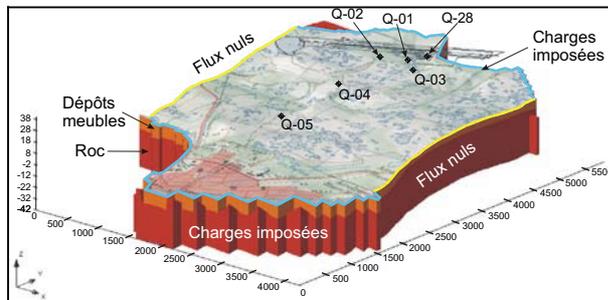


Figure 9. Vue tridimensionnelle du maillage et distribution des conditions aux limites

La simulation du transport du plomb a été faite, pour une durée de 30 ans, suivant deux scénarios, soient : 1) une simulation considérant un apport constant de contaminant et une concentration en plomb de 1000 µg/L correspondant à la concentration maximale mesurée au site, et 2) une simulation considérant l'enlèvement de la source de la contamination. Le résultat de la première simulation indique que l'enclave se stabiliserait en 6 à 10 ans. Les concentrations atteindraient leurs valeurs maximales après 3 à 5 ans au cœur de l'enclave et après 20 à 25 ans en bordure de celle-ci. La contamination atteindrait le puits Q-01 mais les concentrations seraient inférieures au critère d'eau de consommation. Les

résultats du premier scénario sont illustrés aux figures 11 et 12. Le résultat de la seconde simulation montre qu'il faudrait plus de 10 ans pour que les aquifères de surface et du roc soient exempts de plomb.

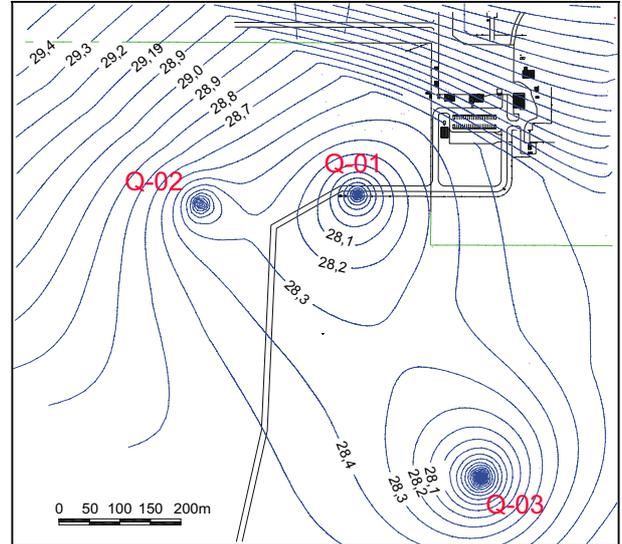


Figure 10. Distribution des charges hydrauliques (mètres) simulées de l'aquifère rocheux

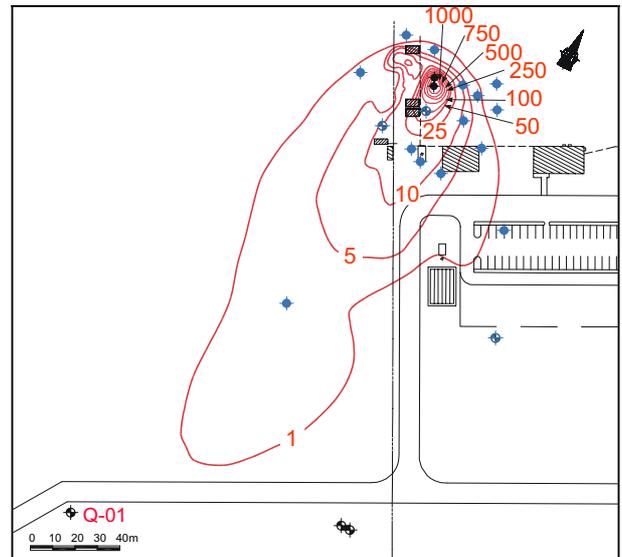


Figure 11. Enclave de contamination en plomb (µg/L) simulée après 30 ans (sans diminution des sources - aquifère de surface)

8. PRÉSENTATION, ÉLABORATION ET ANALYSE DES ALTERNATIVES DE GESTION ET/OU DE DÉCONTAMINATION ENVIRONNEMENTALE

Sur la base des travaux de caractérisation environnementale et hydrogéologique, de l'analyse des données, des résultats de la modélisation mathématique, de l'évaluation des risques à la santé et à l'environnement ainsi que de l'examen des technologies de traitement, des

alternatives de gestion et/ou de décontamination environnementale ont été élaborées pour satisfaire à l'objectif de réhabilitation suivant :

« Mettre en place des mesures correctives et des modes d'intervention pour la réduction des risques à la santé en fonction des critères d'eau potable et/ou recourir à des alternatives de gestion environnementale (surveillance environnementale, atténuation naturelle, confinement et suivi) permettant d'assurer la sécurité des usagers du site et des résidents de Havre-Saint-Pierre ainsi que la protection de l'environnement. »

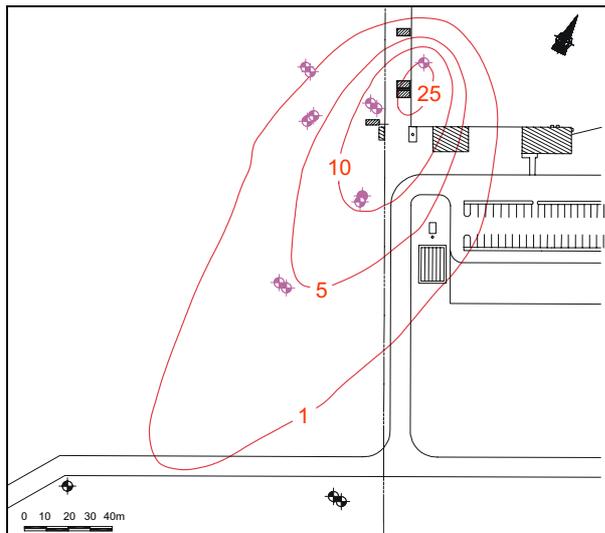


Figure 12. Enclave de contamination en plomb ($\mu\text{g/L}$) simulée après 30 ans (sans diminution des sources – aquifère rocheux)

Les 4 alternatives retenues pour la gestion/décontamination environnementale des sols et des eaux souterraines ont été confrontées à une analyse comparative et une appréciation en fonction de critères techniques, environnementaux et socio-économiques et discutées sous les thèmes de l'efficacité, de l'implantation et des coûts. Ces alternatives sont les suivantes : 1) excavation transport et traitement hors-site, 2) stabilisation du plomb par ajout de phosphate de calcium, 3) extraction du plomb par l'injection d'une solution acide et le pompage et traitement de l'eau contaminée et 4) stabilisation du plomb par précipitation en milieu anaérobie.

Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 1998. Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés, juin 1998.

Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 2001. Critères de qualité de l'eau de surface au Québec.

McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988. *A Modular 3-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model*. U.S. Geological Survey, Denver, CO, Survey Open-File Report 83-875, Book 6.

Zheng, C. 1992. *MT3D version 1.8 Documentation and User's Guide*. S.S. Papadopoulos & Associates, Inc., Bethesda, MD.