

**Estimation par modélisation numérique du débit
d'eau d'exfiltration du parc à résidus de flottation
(float tails) vers les eaux souterraines du roc**

MÉMORANDUM TECHNIQUE

DATE : 9 décembre 2011
À : Hugo Latulippe, ing., Mine Arnaud inc.
CC : Serge Tourangeau et Guy Saucier
DE : Léonard Agassounon et Martin Stapinsky

MINE ARNAUD – ESTIMATION PAR MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU DÉBIT D'EAU D'EXFILTRATION DU PARC À RÉSIDUS DE FLOTTATION (FLOAT TAILS) VERS LES EAUX SOUTERRAINES DU ROC

1. INTRODUCTION

La propriété minière de Mine Arnaud est localisée dans la région de la Côte-Nord (Québec), à environ 15 km à l'ouest du centre-ville de Sept-Îles, dans le canton Arnaud. Le projet comprend la construction et l'exploitation du site minier incluant une fosse à ciel ouvert. Une zone d'entreposage des résidus miniers ainsi que des haldes à stériles et de mort terrain font également partie du projet minier (Figure 1).

La coentreprise Roche/Ausenco Sandwell a obtenu le mandat de Mine Arnaud Inc. de réaliser l'étude de faisabilité et l'étude d'impact environnemental et social du projet Arnaud. Dans le cadre de ce mandat, l'estimation par modélisation numérique du débit d'eau d'exfiltration de l'aire d'entreposage des résidus a été effectuée par Roche limitée, Groupe-conseil en complément des travaux d'étude hydrogéologique réalisés par Ausenco/Vector (2011) et des résultats des travaux géotechniques réalisés par Journeaux et Associés (2011). En raison du volume de résidus à accumuler, des digues d'une hauteur pouvant dépasser 30 m seront requises pour fermer le périmètre. Le détail de conception des infrastructures se trouve dans le rapport Roche/Ausenco Sandwell (2011).

La présente étude vise donc à évaluer le taux d'exfiltration de l'eau du parc à résidus de type "float tails" vers l'aquifère du roc à l'aide d'un modèle numérique simulant en coupe le futur parc à résidus à la fin du projet. Ces évaluations ont été réalisées à partir de deux modèles en coupe et selon les exigences de la Directive 019 du MDDEP (2005). La méthode employée, les résultats obtenus et les conclusions de cette étude sont présentés dans ce document, suivi des conditions générales et limitations de l'étude.

2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Le contexte hydrogéologique de la propriété de Mine Arnaud est décrit en détail dans le rapport d'Ausenco/Vector (2011). Dans ce secteur de la baie des Sept-Îles, la stratigraphie générale dans le secteur du parc à résidus montre des dépôts de surface essentiellement constitués d'une

couche d'argile plus ou moins épaisse en surface, sus-jacente à une moraine (till) de plus en plus épaisse en se rapprochant de la baie (Cogemat inc., 1997). Ces dépôts sont recouverts de tourbe dans les zones de topographie inférieure à 70 m. Les dépôts de surface recouvrent des formations rocheuses d'âge paléozoïque et précambrien de nature ignée (intrusif mafique) comprenant quatre séries rocheuses superposées. Les données sur la stratigraphie à l'endroit prévu pour le parc à résidus sont toutefois limitées et il est recommandé, avant l'installation du parc, de compléter la documentation de la stratigraphie de ce secteur.

La région montre de fortes précipitations et une topographie modérée à faible avec une profondeur de l'eau souterraine souvent proche de la surface du sol. La topographie du terrain ainsi que les données de précipitation, et d'évapotranspiration ont été utilisées par Ausenco/Vector (2011) pour estimer la recharge de l'aquifère à 43 mm/an. L'écoulement des eaux souterraines dans les dépôts meubles glaciaires est généralement variable en raison de la nature très hétérogène du matériau. Les unités du substratum rocheux (Paléozoïque et Précambrien) ne favorisent généralement pas un écoulement important des eaux souterraines en raison de l'imbrication et de la recristallisation minérales. L'écoulement se fait généralement à travers les fractures, joints, failles et zones de cisaillement.

Selon les différents résultats d'essais hydrauliques réalisés sur le site (Cogemat inc., 1997; Ausenco Vector, 2011) la conductivité hydraulique moyenne des dépôts de surface se situerait autour de 3×10^{-8} et 1×10^{-7} m/s, respectivement pour l'argile et le till. Pour le roc, la conductivité hydraulique serait comprise entre 1×10^{-10} et 8×10^{-6} m/s avec une moyenne géométrique de $2,9 \times 10^{-8}$ m/s (Tableau 1).

Tableau 1 Sommaire des valeurs de conductivité hydraulique et de recharge

Unité		Minimum (m/s)	Maximum (m/s)	Moyenne géométrique (m/s)	Modèle Ausenco Vector (m/s)	Recharge (mm/an)
Dépôts de surface	Argile	8×10^{-10}	1×10^{-6}	$3,3 \times 10^{-8}$	$3,5 \times 10^{-8}$	43
	Till			$1,0 \times 10^{-7}$		
Roc		1×10^{-10}	8×10^{-6}	$2,9 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-7}$	
Résidus : type "float tails"		1×10^{-8}	3×10^{-7}	$7,7 \times 10^{-8}$	-	

* Les conductivités hydrauliques des résidus ont été estimées à partir des essais granulométriques réalisés sur les résidus (Roche/Ausenco, 2011)

3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La modélisation a été réalisée en utilisant deux coupes à travers le parc à résidus de type "float tails" pour mettre en évidence la variabilité des épaisseurs de dépôts de surface et la topographie du roc. Les modèles sont construits avec le logiciel Visual Modflow 2011.1 comme dans l'étude hydrogéologique d'Ausenco/Vector (2011). Le choix des paramètres hydrauliques des modèles, ainsi que la valeur de la recharge sur le terrain naturel sont similaires à ceux du modèle hydrogéologique d'Ausenco/Vector (2011).

Le choix de la position des coupes (Figure 1) a été fait en fonction des données stratigraphiques disponibles dans le secteur des parcs et des données géotechniques de Journeaux et Associés

(2011). Les deux modèles, en coupes parallèles à la direction de l'écoulement, sont les suivants et considèrent le profil final du parc à résidus dès le début de la simulation :

- ✓ **Modèle #1** (Figure 2): Il simule les conditions d'écoulement de l'eau souterraine dans le parc à résidus en considérant l'épaisseur moyenne des dépôts de surface indiquée dans le rapport de Journeaux et Associés (2011). Les dépôts d'une épaisseur moyenne de 5 m sont ainsi constitués d'une argile silteuse en surface ($\approx 2,75$ m) et d'un till sablo-silteux en contact avec le roc ($\approx 2,25$ m).
- ✓ **Modèle #2** (Figure 3): Il simule les conditions d'écoulement d'eau souterraine à travers une coupe qui longe les sondages T-4, T-8 et T-9. Cette dernière montre une épaisseur variable de la couche d'argile mais considérable par endroit, et semble donc être la moins susceptible de permettre l'exfiltration des eaux vers l'aquifère de roc dans les endroits où cette couche d'argile est épaisse mais où l'exfiltration est susceptible d'être la plus élevée dans les secteurs des dépôts d'épaisseur faible. Dans ce scénario, il serait possible de mettre en évidence le maximum possible du débit d'eau d'exfiltration vers le roc aux endroits où les dépôts sont moins épais.

Les simulations ont été réalisées en régime permanent, sans fluctuations saisonnières du niveau de la nappe. Le choix des conditions telles que profil anticipé des résidus, écoulement en régime permanent, condition post-ennoiement de la fosse, permet de rester conservateur dans la détermination des débits d'eau d'exfiltration vers le roc.

3.1 Maillage des modèles, conditions aux limites et paramètres hydrauliques

Modèle #1 et Modèle #2 : Les deux coupes nord-ouest/sud-est ont près de 1 700 m de longueur et sont caractérisées par un maillage dont la taille minimale des colonnes est de 1 m. Les conditions de charge hydraulique qui ont été imposées aux limites du modèle sont :

- ✓ Charge hydraulique imposée au roc à une élévation de 95 m à la limite nord-ouest de la coupe. Cette valeur de charge provient de la piézométrie du secteur établie à partir des données de Journeaux et Assoc. (2011) et de Ausenco/Vector (2011);
- ✓ Charge hydraulique imposée au roc à une élévation de 74,2 m la limite sud-est de la coupe. Cette valeur de charge provient comme précédemment des données de Journeaux et Associés (2011);
- ✓ Des conditions de flux estimé à 43 mm/an ont été imposées au sommet des modèles pour simuler la recharge estimée dans le rapport d'Ausenco/Vector (2011). Cette valeur a été calculée à partir du bilan hydrologique simplifié où la recharge est le résultat de la précipitation moins l'évapotranspiration et le ruissellement;
- ✓ La conception des digues du parc à résidus prévoit une revanche de 1,5 m. Par conséquent, le niveau d'eau dans le parc sera maintenu à une élévation correspondant à au moins 1,5 m sous l'élévation de la crête de la digue.

3.2 Résultats

3.2.1 Cas de base

Les résultats des débits d'eau d'exfiltration quotidiens vers le roc sont résumés au tableau 2 pour les deux coupes. Ces débits correspondent à la quantité d'eau provenant des résidus et qui atteint les eaux souterraines du roc. Les débits moyens d'eau d'exfiltration estimés sont de 0,25 et 0,28 L/m² par jour. Ces valeurs sont largement inférieures à la valeur maximale quotidienne de

3,3 L/m² par jour correspondant aux mesures d'étanchéité de niveau A pour la protection des eaux souterraines indiquées à la section 2.9.4 de la Directive 019 sur l'industrie minière.

Tableau 2 Débit unitaire d'eau d'exfiltration du parc à résidus vers les eaux souterraines du roc

Coupe	Débit quotidien (L/m ²)		
	Maximum recommandé (Mesures d'étanchéité de niveau A de la Directive 019)	Moyen	Maximum
Modèle # 1	3,3	0,25	-
Modèle # 2		0,28	1,35*

*Cette valeur correspond à la région de la coupe où le mort terrain est le moins épais. Il n'y a pas de valeur maximum pour le modèle 1 car ce dernier considère l'épaisseur moyenne des dépôts d'après Journeaux et Assoc. (2011).

3.2.2 Analyses de sensibilité

Une étude de sensibilité des deux modèles a été réalisée pour s'assurer que l'erreur est minimale avec les paramètres d'entrée sélectionnés. De plus, cette analyse de sensibilité permet de déterminer quels sont les paramètres d'entrée qui sont les plus sensibles au modèle d'écoulement. Deux paramètres ont été utilisés pour cette analyse : la recharge et la conductivité hydraulique de chacune des unités stratigraphique. Les simulations du tableau 3 ont ainsi été réalisées.

Tableau 3 Description des cas de figures de l'analyse de sensibilité

Analyses	Descriptions
AS1	Augmentation d'au moins 50% (de 43 à 65 mm/an) de la recharge au niveau des résidus
AS2	Augmentation d'un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique de la couche d'argile ou argile silteuse ($3,3 \times 10^{-7}$ m/s)
AS3	Diminution d'un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique de la couche d'argile ou argile silteuse ($3,3 \times 10^{-9}$ m/s)
AS4	Diminution d'un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique des résidus ($7,74 \times 10^{-9}$ m/s)
AS5	Augmentation d'un ordre de grandeur de la conductivité hydraulique des résidus ($7,74 \times 10^{-7}$ m/s)

Le tableau 4 montre les résultats lors de l'étude de sensibilité des deux modèles. Dans tous les cas de figures étudiés, le débit d'eau d'exfiltration est toujours inférieur d'au moins un ordre de grandeur par rapport au débit quotidien maximum recommandé par la Directive 019 (i.e., 3,3 l/m²).

Tableau 4 Débit d'eau d'exfiltration pour les cas de figures de l'analyse de sensibilité

Unités	Débit quotidien moyen (L/m ²)						
	Maximum recommandé Directive 019	Cas de base	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5
Modèle #1	3,3	0,26	0,29	0,28	0,19	0,18	0,31
Modèle #2		0,28	0,32	0,30	-	-	0,34

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La présente étude a permis d'évaluer le taux quotidien d'exfiltration de l'eau du parc à résidus de flottation vers l'aquifère du roc à l'aide d'un modèle numérique simulant en coupe le futur parc à résidus. Les valeurs moyennes obtenues se situent autour de 0,25 et 0,28 L/m². En considérant les variations d'épaisseurs dans les dépôts de surface et suite à une analyse de sensibilité des paramètres hydrauliques critiques (recharge et conductivité hydraulique), les valeurs estimées sont toutes inférieures au critère de 3,3 L/m² par jour imposé par la Directive 019 du MDDEP pour l'industrie minière.

L'analyse des données disponibles a démontré que les propriétés hydrogéologiques dans certains secteurs du parc à résidus demanderaient à être mieux documentées. Des sondages et forages, ainsi que des essais granulométriques et hydrauliques pourraient y être réalisés dans les phases ultérieures du projet.

ROCHE Ltée

Préparé par :

Vérifié par :

Léonard Agassounon, M.Sc., Ph.D.
Hydrogéologue

Martin Stapinsky, M.Sc., Ph.D.
Hydrogéologue sénior

RÉFÉRENCE

Ausenco/Vector, 2011. Mine Arnaud, Hydrogeologic investigation report, USVC-0004605, July 2011.

Cogemat inc., 1997. Investigations géotechniques préliminaires, SOQUEM / NORSE-HYDRO, Canton Arnaud, CEP Duplessis, juin 1997.

Journeaux et Assoc., 2011. Mine Infrastructure, Relocated Rail ARNAUD MINE, Sept-Îles, Quebec, Geotechnical and Hydrogeological investigation. Report No. L101411, August 2011.

MDDEP, 2005. Directive 019 sur l'industrie minière.

Roche/Ausenco Sandwell, 2011. Mine Arnaud Feasibility study, Preliminary report, Mine Arnaud Apatite Project, Sept-Iles, QC, Project No. 121848 / 59858. November, 2011.

CONDITIONS GÉNÉRALES ET LIMITATIONS

Ce document fait état de l'opinion professionnelle de ROCHE Itée Groupe-conseil quant aux sujets qui y sont abordés et a été préparé pour l'usage exclusif de MINE ARNAUD inc. ou de ses agents. Les données factuelles, les interprétations, les commentaires ainsi que les recommandations qu'il contient sont spécifiques à l'étude qu'il couvre et ne s'appliquent à aucun autre projet ou autre site. L'opinion professionnelle de ROCHE Itée groupe-conseil a été formulée en se basant sur ses compétences professionnelles en la matière et avec les précautions qui s'imposent. Ce rapport doit être lu dans son ensemble puisque des sections pourraient être faussement interprétées lorsqu'elles sont prises individuellement ou hors contexte. Ce document n'a pour raison d'être que l'objectif défini dans le Contrat, et est au seul usage du Client, dont les recours sont limités à ceux prévus dans le Contrat.

Le présent document est confidentiel et à l'usage privilégié de Mine Arnaud inc. dans le but d'évaluer par modélisation le débit d'eau d'exfiltration vers le roc du future parc à résidus. L'utilisation de ce rapport par une tierce partie ne peut en être faite, sans le consentement de la partie ci-haut mentionnée. Dans le cas contraire, son utilisation est la responsabilité de cette tierce partie. Roche Itée, Groupe-conseil, n'accepte aucune responsabilité pour les dommages causés par cette tierce partie, lesquels résulteraient d'une décision ou d'une action basée sur ce document. Roche Itée, Groupe-conseil ne pourra être tenue responsable de dommages résultant de conditions souterraines imprévisibles, de conditions qui lui seraient inconnues, de l'inexactitude de données provenant d'autres sources que celles de Roche Itée et de changements ultérieurs aux conditions du site, à moins d'avoir été prévenue par Mine Arnaud inc. de tout événement, activité, information, découverte passée ou future susceptible de modifier les conditions souterraines décrites dans ce rapport, et d'avoir eu la possibilité de réviser les interprétations, les commentaires et les recommandations formulés dans ce rapport.

À moins d'avis contraires, les interprétations, les commentaires et les recommandations présentés dans ce rapport ont été formulés suite à une évaluation des conditions souterraines du site, conformément à la portée de l'étude et aux limitations générales décrites sur cette page, de même qu'à la lumière de nos connaissances concernant l'utilisation courante et/ou prévue du site, les règlements, les normes et les critères environnementaux en vigueur ainsi que les règles et les pratiques professionnelles reconnues et acceptées au moment de l'étude, en tenant compte de l'emplacement du site. Les références aux lois et aux règlements contenues dans ce rapport sont fournies à titre indicatif, sur une base technique, comme les lois et les règlements sont sujets à interprétation.

Le principe de base de la modélisation numérique est de reproduire de façon simplifiée le milieu naturel, en l'occurrence un système aquifère, par un ensemble de lois scientifiques, d'équations et d'hypothèses qui permettent de reproduire plus ou moins fidèlement l'écoulement naturel en fonction des données disponibles. La précision de la modélisation s'appuie donc sur la quantité des données de terrain disponibles en relation avec le degré d'hétérogénéité des formations géologiques, de même que du degré de précision des données considérées dans le modèle et des hypothèses simplificatrices. Les travaux de modélisation effectués par Roche Itée groupe-conseil et décrits dans ce rapport ont été réalisés conformément aux règles et aux pratiques professionnelles reconnues et acceptées au moment de leur réalisation. À moins d'avis contraires, les résultats de travaux antérieurs ou simultanés, provenant d'autres sources que celles de Roche Itée groupe-conseil, cités et/ou utilisés dans ce rapport sont considérés comme ayant été obtenus en respectant les règles et les pratiques professionnelles reconnues et acceptées et, par conséquent, comme étant valides.

Le modèle numérique représentant les conditions hydrogéologiques du secteur d'étude constitue un outil scientifique qui a permis de simuler l'écoulement et d'estimer le débit d'eau souterraine d'exfiltration au roc. Cependant, la précision des simulations est reliée aux incertitudes normales associées à la modélisation hydrogéologique. Et les commentaires et la conclusion de la présente étude sont fondés sur l'information pertinente colligée et disponible dans le cadre du présent mandat et ne représentent aucune garantie directe ou indirecte.

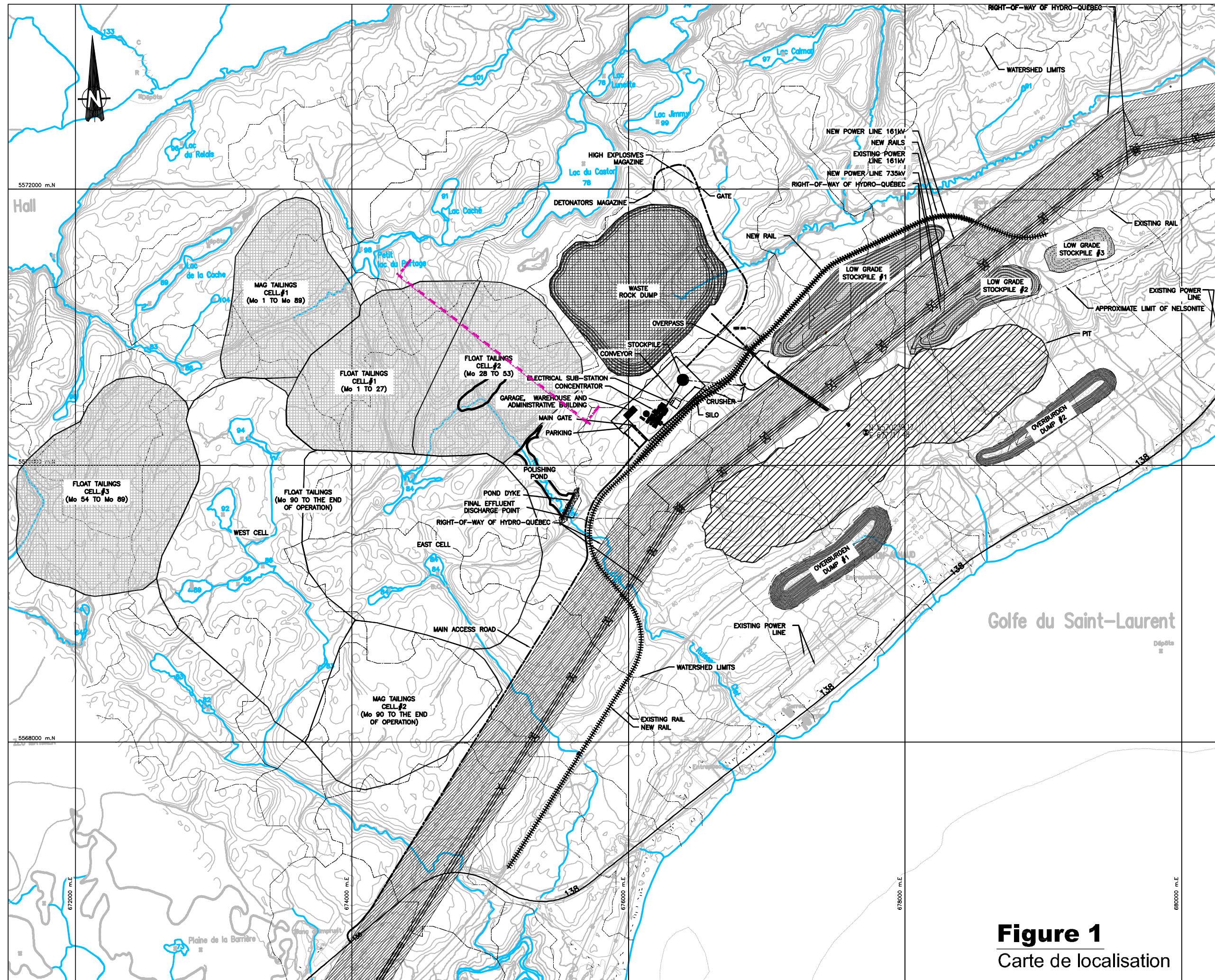
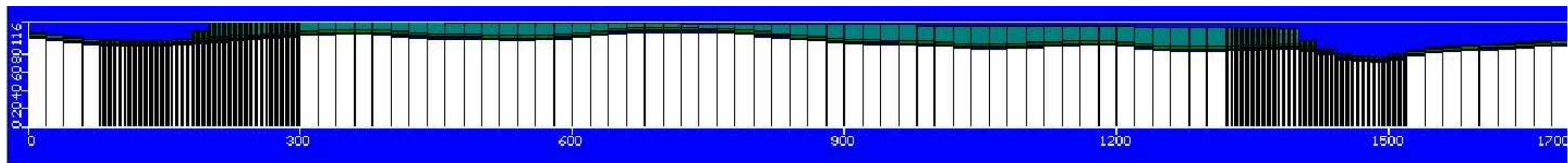
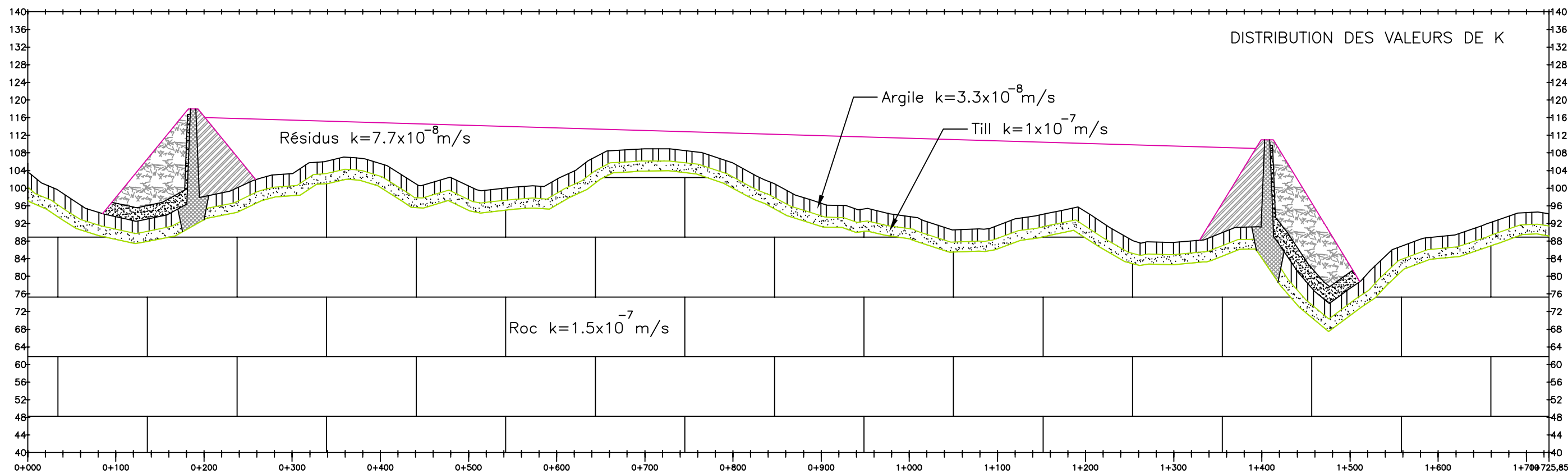


Figure 1
Carte de localisation



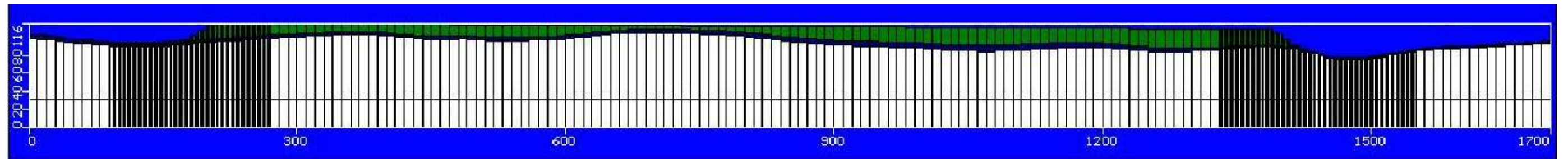
Exagération verticale = x1



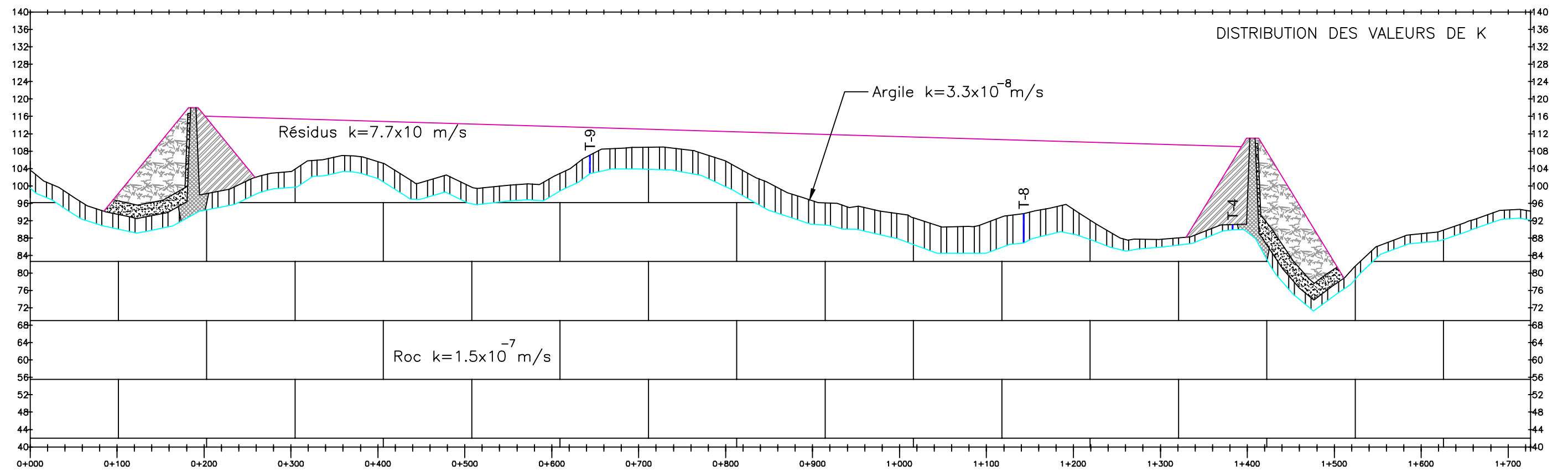
Exagération verticale = x5

Figure 2

Coupe stratigraphique et maillage - Modèle 1



Exagération verticale = x1



Exagération verticale = x5

Figure 3

Coupe stratigraphique et maillage - Modèle 2

