

Onde de rupture et stabilité des digues



Rapport

Onde de rupture et stabilité des digues pour le projet Mine Arnaud

Numéro de référence de Roche:

059858.001-224

Soumis à:



Préparé par :

Vincent Blanchet, ing. jr.
Claude M. Poirier, ing., C.E.(MIT), Ph.D.

Date: 22 mars 2012

Projet Mine Arnaud

ONDE DE RUPTURE ET STABILITÉ DES DIGUES

Préparé par :

Vincent Blanchet, ing. jr
(#OIQ 146574)
Géologie

Claude M. Poirier, ing., C.E.(MIT), Ph.D.
(#OIQ 39869)
Structures, Géotechnique et Géo-mécanique

Vérifié par :

Claude M. Poirier, ing., C.E.(MIT), Ph.D.
(#OIQ 39869)
Directeur Technique Principal
Structures, Géotechnique et Géo-mécanique
Mines et Traitement de minerai

Approuvé par :

Guy Saucier, ing.
(#OIQ 37711)
Vice-président,
Mines et traitement de minerai



Table des matières

1.0	INTRODUCTION.....	1
2.0	RUPTURE DE DIGUE.....	3
2.1	Généralités	3
2.2	Réseau Hydrographique	3
2.3	Sections de calcul	4
2.4	Loi surface de retenue – élévation	6
2.5	Simulation de référence avec résidu minier.....	7
2.6	Simulation en considérant de l’eau	8
2.7	Simulation en rehaussant la digue bornant le réservoir à polissage	9
2.8	Simulation avec digue a résidu à 108 m et dérivation.....	10
3.0	STABILITÉ DES DIGUES DE TYPE 1 ET 2.....	14
3.1	Généralités	14
3.2	Calculs effectués par la firme Journeaux et Associés	16
3.2.1	GÉNÉRALITÉS.....	16
3.2.2	ANALYSE DE STABILITÉ – DIGUES DE TYPE 1 ET DE TYPE 2.....	16
3.3	Observations	23
4.0	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	24
4.1	Conclusions	24
4.2	Recommandations et mesures préventives et atténuantes.....	24
4.2.1	GÉNÉRALITÉS.....	24
4.2.2	REHAUSSE DE LA DIGUE DU RÉSERVOIR À POLISSAGE.....	24
4.2.3	AJOUT D’UNE DIGUE DE DÉRIVATION	26
4.2.4	AUGMENTATION DE LA STABILITÉ DE LA DIGUE DU RÉSERVOIR À RÉSIDU	27
4.2.5	PROTECTION DU CHEMIN DE FER	27
4.2.6	FOSSE D’EXTRACTION	27
5.0	RÉFÉRENCES.....	28

Table des matières (suite)

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 - Réseau hydrographique et ouvrages de retenu	4
Figure 2.2 - Distribution des sections de calcul.....	5
Figure 2.3 - Contour d’immersion avec digues et fosse d’extraction.....	12
Figure 3.1 - Vue d’ensemble du projet et localisation des digues type 1 et 2	15
Figure 3.2 - Fondation sur argile - F.S. = 1.3 Statique à court terme.....	18
Figure 3.3 - Fondation sur argile - F.S. = 1.8 Statique à long terme	19
Figure 3.4 - Fondation sur argile - F.S. = 1.4 Séismique à long terme	20
Figure 3.5 - Fondation sur moraine ou roc - F.S. = 1.5 Statique	21
Figure 3.6 - Fondation sur moraine ou roc - F.S. = 1.2 Séismique	22
Figure 4.1 - Exemple de digue à crête déversante.....	25
Figure 4.2 - Section type proposée pour la digue bornant le réservoir de polissage.....	26
Figure 4.3 - Section type de la digue de dérivation.....	26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Sections de calcul importante	6
Tableau 2.2- Loi Surface de retenu – Élévation du contenu du réservoir à résidu	6
Tableau 2.3 - Résultats Boue plastique et aucune digue ou fosse	8
Tableau 2.4 - Résultats Eau limpide et aucune digue ou fosse	9
Tableau 2.5 - Digue à résidu a 102 m et Digue de polissage à 85 m	10
Tableau 2.6 - Digue à résidu a 108 m Digue de polissage à 85 m et Digue de dérivation	11

1.0 INTRODUCTION

Dans le cadre de l'Étude d'impact sur l'environnement du projet Mine Arnaud, la section 15.5.4.6 – Risques associés aux aires d'accumulation des résidus miniers et stériles, fait mention de deux risques pouvant conduire à des accidents majeurs soit :

- Rupture de digue aux aires d'accumulation des résidus miniers ;
- Écoulement des eaux de surface.

De plus, la rupture d'une digue aux aires d'accumulation des résidus miniers pourrait être causée par :

- Des phénomènes météorologiques (Crues, pluies de très forte intensité, glace, vent fort, etc.) ;
- Des événements sismiques ;
- Des erreurs ou omissions lors de la construction des digues ;
- Le vieillissement de l'ouvrage ;
- Le déversement en crête de digue ;
- Une brèche dans la digue.

Les conséquences potentielles d'une telle rupture de digue sont diverses, mentionnons :

- Écoulement d'eau suivi de boues de concentrations faibles à élevées ;
- Impact sur les habitations situées le long de la route 138 près du ruisseau Clet ;
- Impact sur des structures en aval des digues ;
- Impact sur les lignes électriques haute tension d'Hydro-Québec ;
- Impact au chemin de fer Arnaud.

Plusieurs des mesures de prévention et d'atténuation suivantes sont envisagées, mentionnons :

- Aire de confinement des résidus miniers optimisée ;
- Études géologiques / hydrogéologiques y incluant une analyse de stabilité des résidus pour déterminer la pente de la digue ;
- Procédure de construction pour assurer la stabilité de la digue ;
- Prise en compte des données sismiques du secteur pour la conception des digues ;
- Procédures de surveillance pour repérer et atténuer à temps les conditions qui pourraient menacer la sécurité des digues ;
- Procédure d'entretien ;
- Règle de fonctionnement en cas de crue, hauteur minimale de la revanche de la crête de digue à 1,5 m ;
- Instrumentation de surveillance ;
- Moyens d'alerte en cas de bris de digues ;
- Conception et exploitation selon les critères de l'Association canadienne des barrages (CDA/ACB 2007) et de la Loi sur la sécurité des barrages (L.R.Q., chapitre S-3.1.01) et de son règlement (c. S-3.1.01, r.1) ;
- Plan de mesures d'urgence avec formation.

Ce rapport présente les conclusions et nos recommandations pour les études suivantes :

- Réseau hydrographique;
- Simulation de référence avec résidu minier ;
- Simulation en considérant de l'eau
- Simulation en rehaussant la digue du réservoir de polissage
- Simulation avec digue à résidu et dérivation;
- Stabilité des digues type 1 et 2;
- Conclusions et mesures préventives et atténuantes.

Les autres thèmes associés à la campagne d'investigation géotechnique, à la conception des digues, au plan de mesure d'urgence, etc. ne sont pas traité par le présent rapport.

Nous devons aussi exprimer toute notre reconnaissance pour la participation exceptionnelle du Professeur Claude Marche, ing., Ph.D. de l'École Polytechnique de Montréal à ce mandat. En effet, le Professeur Marche a effectué les calculs unidimensionnels de l'onde de rupture et les hauteurs d'immersion du chapitre 2 tout en nous donnant de précieux conseils pour la rédaction du présent rapport.

2.0 RUPTURE DE DIGUE

2.1 Généralités

Dans le but de déterminer l'impact d'une rupture de la digue à résidu sur la trajectoire suivie par le ruisseau Clet, nous avons utilisé une approche de calcul qui est largement répandue dans la pratique, soit la méthode unidimensionnelle. En résumé, il s'agit de décrire un ensemble de sections le long du ruisseau Clet et de faire le bilan mathématiquement, du flux énergétique et la conservation de la masse, entre les apports en fluides, la capacité de retenue de la section amont et la sortie.

Le logiciel de simulation hydrologique FLDWAV est employé pour l'ensemble des simulations effectuées. Ce logiciel a été développé pour le National Weather Service américain à la fin des années 90. Il s'agit d'un logiciel de simulation des fluides de type Newtonien (de l'eau) et Non-Newtonien (boues, résidus miniers, etc.) pour des écoulements unidimensionnels à surface libre (bris de digues, rivières, etc.) ou pressurisés (ponceaux, conduites, etc.).

Le logiciel FLDWAV propose une solution originale aux équations unidimensionnelles de Saint-Venant décrivant le comportement d'un fluide en mode turbulent. Ce logiciel est utilisé dans la pratique pour simuler les écoulements rapidement changeant observés en cas de bris de barrages, crue de rivières, fleuve, etc.

Le professeur Claude Marche, ing., Ph.D. qui a participé au développement de ce logiciel, a effectué ces calculs.

Pour nous guider à établir la méthodologie d'étude d'un bris de digues à résidus miniers, nous avons consulté et suivi les recommandations mentionnées dans les documents suivants, soit :

- Stabilité à long terme des haldes de stériles et de parcs à résidus miniers, article 4.3.4, Gouvernement du Canada, 2012 ;
- Directives pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet minier, Gouvernement du Québec, 2012 ;
- Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec – Annexe 1 Critères de stabilité, Gouvernement du Québec, 1997.
- Conception et exploitation selon les critères de l'Association canadienne des barrages (CDA/ACB 2007) ;
- La Loi sur la sécurité des barrages (L.R.Q., chapitre S-3.1.01) et de son règlement (c. S-3.1.01, r.1), Gouvernement du Québec.

Les sections suivantes décrivent les résultats obtenus pour chacune des approches envisagées pour déterminer les cartes d'immersion sur la distance parcourue par l'onde de rupture.

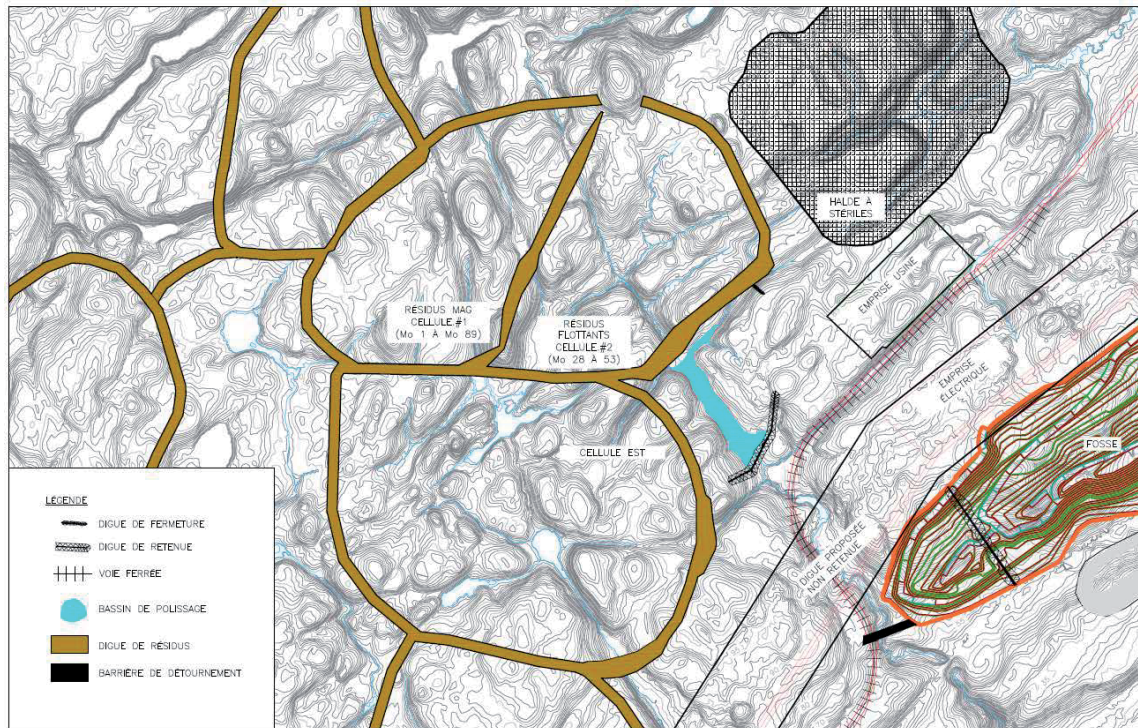
2.2 Réseau Hydrographique

Le système couvert part de la digue à résidu de la cellule 2 et rejoint le fleuve par la vallée par laquelle passe la voie ferrée. En plus de la digue de retenue, on peut retrouver sur le cours du ruisseau Clet deux (2) autres ouvrages, l'un de rétention et l'autre de dérivation vers la fosse d'extraction.

Le premier ouvrage correspond à la digue de retenue du réservoir à polissage déjà envisagée dans le projet. Le deuxième ouvrage, i.e. la dérivation, fait partie des mesures préventives et atténuantes en cas de rupture de la digue de retenu des résidus.

La figure 2.1 présente le réseau hydrographique analysé ainsi que la position des deux ouvrages principaux.

Figure 2.1 - Réseau hydrographique et ouvrages de retenu



2.3 Sections de calcul

Le système couvert comporte le réservoir à résidu et 21 sections transversales dont les plus importantes pour l'analyse sont données au tableau 2.1 et la figure 2.2 présente les sections de calcul selon leur position le long du ruisseau Clet.

Ces sections sont en fait des plans verticaux qui épousent la topographie du terrain et sur lesquelles nous effectuons les calculs de débit et de hauteur de boue fluide. À titre d'exemple les sections 1, 6, 8, 10, 12 et 19 correspondent à :

- Le pied aval de la digue à résidu (section 1) ;
- La digue bornant le réservoir de polissage (section 6) ;
- La voie ferrée projetée (section 8) ;
- La digue de dérivation projetée juste en amont de la fosse (section 10) ;
- La fosse d'extraction du minerai (section 12) ;
- L'embouchure du ruisseau Clet (section 19).

Figure 2.2 - Distribution des sections de calcul

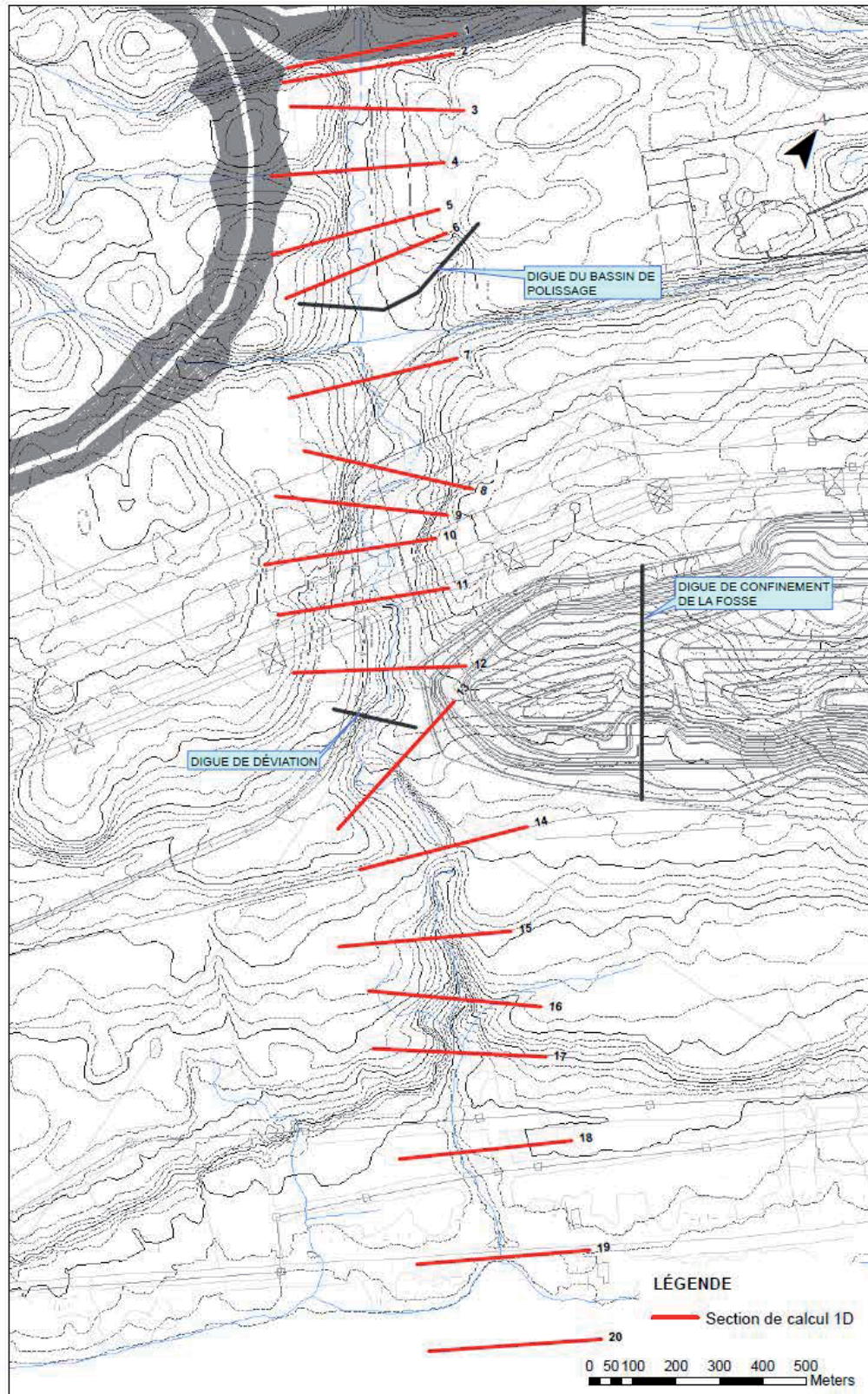


Tableau 2.1 - Sections de calcul importante

Identification de la section	Distance de la digue (km)
1 – Digue à résidu	0,00
6 – Digue bornant le bassin de polissage	0,53
8 – Voie ferrée	0,73
10 – Amont fosse d'extraction et dérivation	1,04
12 – Proximité du site d'extraction (Fosse)	1,33
19 – Embouchure du ruisseau Clet	2,62

2.4 Loi surface de retenue – élévation

Le contenu qui peut s'écouler du réservoir à résidu, i.e. de la cellule 2, est décrit par une fonction de type « Surface de retenue vs. élévation », donnée au tableau 2.2. Le volume contenu influence significativement toutes les simulations de rupture éventuelle et dépend des hypothèses de comportement des résidus une fois dans le réservoir à résidu. Sans présence d'un accélérateur de décantation (amidon, etc.) le volume (fluide) pouvant s'écouler représente 41 % du volume total contenu.

Tableau 2.2- Loi Surface de retenu – Élévation du contenu du réservoir à résidu

Élévation des boues liquides (m)	Surface du plan d'eau (10 ⁶ m ²)
78,0	0,001
80,0	0,050
84,0	0,100
88,0	0,200
96,0	0,540
99,0	0,660
102,0	0,843
105,0	0,904
108,5	1,450

Pour effectuer les simulations numériques, les propriétés rhéologiques du contenu décanté, dans la digue à résidu de la cellule 2, est une boue plastique ayant les particularités suivantes :

- Un poids volumique de 27 000 N/m³;

- Une viscosité dynamique de 4 800 N.sec/m² ;
- Une contrainte initiale de 7 200 N/m² (limite élastique).

De plus, en amont du système, nous avons considéré un apport de 30 m³/s qui représente le drainage naturel passant dans le réseau hydrographique pendant une période humide afin de tenir en compte des aléas météorologiques.

Finalement, en aval de la digue à résidu de la cellule 2, un niveau du fleuve de +0,5 m est imposé pour représenter une marée haute de faible amplitude pour tenir compte de la situation géographique du projet minier Arnaud.

2.5 Simulation de référence avec résidu minier

La simulation de référence, qui permet de **calibrer** le modèle mathématique, correspond à la rupture de la digue à résidu en considérant **qu'aucun autre barrage (polissage et de dérivation) et aucun autre réservoir (fosse d'extraction) n'existe sur la trajectoire d'écoulement des boues liquéfiées.**

Il s'agit d'un **scénario théorique** puisque la digue limitant le bassin de polissage sera en place dès le début des opérations ainsi que la fosse d'extraction du minerai. Même si cette **situation extrême n'existe jamais**, cette simulation théorique nous permet de calibrer le modèle mathématique et d'envisager des scénarios de confinement lors d'une rupture de digue à résidu.

Les éléments suivant définissent le contenu de la simulation de référence, soit :

- Débit de base du cours d'eau 30 m³/s, i.e. l'apport provenant du drainage naturel ;
- Niveau de la retenue de la digue à résidu a 102 m;
- Élévation de la crête du barrage formant la digue 103,5 m;
- Élévation du pied du barrage formant la digue 78 m;
- Rupture par brèche trapézoïdale de 48 m à la base et une pente de 1 :1;
- Fluide est **une boue** plastique ;
- Aucune digue limitant le réservoir à polissage ;
- Aucune digue de dérivation ;
- Aucune fosse d'extraction du minerai ;
- Durée de la rupture 30 minutes, **en conformité avec la Loi du Québec sur la Sécurité de barrages.**

Les propriétés de la boue sont définies à la section 2.4. Les résultats de cette simulation de référence sont résumés au tableau 2.3

Tableau 2.3 - Résultats Boue plastique et aucune digue ou fosse

	Section 1 (digue a résidu)	Section 6 (bassin de polissage)	Section 8 (Voie Ferrée)	Section 10 (dérivation)	Section 12 (Fosse)	Section 19 (Embouchure du ruisseau)
Débit Max (m ³ /s)	3 920	3 764	3 711	3 601	3 575	3 490
Niveau Max (m)	102	74,2	72,9	71,9	69,9	23,4
Temps max (h)	-	0,47	0,48	0,50	0,50	0,55
Temps de retour à la normale (h)	-	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9

Du tableau 2.3, en supposant à 102 m le niveau maximal de retenue de la digue a résidu pour un fluide boueux dense et aucun barrage ou fosse, on remarque les points suivants :

- La rupture de la digue a résidu entrainerait le passage d'une crue soudaine de l'ordre de 4000 m³/s (3920) ;
- Le maximum est légèrement diminué (-14%) sur les 2,6 km du parcours.
- Les zones inondées sont touchées en trente minutes environ ;
- Il y a un retour aux conditions hydrologiques normales après 2 heures environ.

Encore une fois, il s'agit d'une situation **qui n'existera jamais** mais ce scénario nous permet de calibrer le modèle mathématique.

2.6 Simulation en considérant de l'eau

Une autre situation que nous devons considérer est que **la digue retient uniquement de l'eau**, aucun résidu, aucune boue. **Nous avons donc un barrage au sens de la Loi sur la Sécurité des barrages du Québec.**

La simulation précédente a été reprise en considérant que la digue à résidu de la cellule 2 est à 102 m, retenait une eau naturelle limpide sans boue. Le tableau 2.4 présente les résultats correspondants.

Tableau 2.4 - Résultats Eau limpide et aucune digue ou fosse

	Section 1 (digue a résidu)	Section 6 (bassin de polissage)	Section 8 (Voie Ferrée)	Section 10 (dérivation)	Section 12 (Fosse)	Section 19 (Embouchure du ruisseau)
Débit Max (m ³ /s)	3 920	3 770	3 734	3 631	3 627	3 556
Niveau Max (m)	102	73,4	72,1	70,9	68,4	20,4
Temps max (h)	-	0,45	0,47	0,50	0,50	0,52
Temps de retour à la normale (h)	-	1,5	1,7	1,8	1,8	2,0

La comparaison entre les résultats obtenus avec de l'eau limpide (tableau 2.4) et ceux pour de la boue plastique (tableau 2.3) montre que la viscosité accrue du contenu de la digue a résidu de la cellule 2 :

- Augmente légèrement l'effet de laminage, i.e. la diminution du débit maximum ;
- Allonge quelque peu le temps de retour à la normale.

Toutefois, ces variations sont peu significatives en regard de l'importance de la crue qui resterait du même ordre de grandeur, dans les deux (2) scénarios, i.e. de 3 920 m³/s.

2.7 Simulation en rehaussant la digue bornant le réservoir à polissage

Le rehaussement de la digue bornant le réservoir à polissage va créer un volume de rétention additionnel qu'une éventuelle crue de rupture devra **obligatoirement traverser**, en suivant le lit du ruisseau Clet, avant d'atteindre la rive et le fleuve Saint-Laurent. Il pourrait en résulter un laminage additionnel, i.e. une diminution, dont l'ampleur dépend de la cote de la crête de retenue de la digue contenant les résidus miniers et de la digue du réservoir de polissage.

Les calculs ont été faits pour un relèvement maximum de la crête de la digue du réservoir de polissage à l'élévation 85 m. De plus, nous assumons que :

- La digue a été conçue pour résister à un débordement en crête sans rupture ;
- Aucune présence d'une digue de dérivation ;
- Aucune fosse d'extraction du minerai.

Pour évaluer cet **effet protecteur** sur les zones à risque nous avons effectué la simulation en considérant les paramètres suivant, soit :

- Débit de base du cours d'eau 30 m³/s, i.e. l'apport provenant du drainage naturel ;
- Niveau de la retenue de la digue à résidu a 102 m;
- Élévation de la crête du barrage formant la digue 103,5 m;

- Élévation du pied du barrage formant la digue 78 m;
- Rupture par brèche trapézoïdale de 48 m à la base et une pente de 1 :1;
- Fluide est **une boue** plastique ;
- Cote de la crête de la digue limitant le réservoir à polissage à 85 m;
- Durée de la rupture 30 minutes, **en conformité avec la Loi du Québec sur la Sécurité de barrages**.

Les résultats obtenus sont présentés au tableau 2.5.

Tableau 2.5 - Digue à résidu a 102 m et Digue de polissage à 85 m

	Section 1 (digue a résidu)	Section 6 (bassin de polissage)	Section 8 (Voie Ferrée)	Section 10 (dérivation)	Section 12 (Fosse)	Section 19 (Embouchure du ruisseau)
Débit Max (m ³ /s)	3 920	2 058	2 004	1 791	1 722	1 652
Niveau Max (m)	102	87,46	69,3	67,0	64,9	18,7
Temps max (h)	-	0,50	0,51	0,52	0,54	0,57
Temps de retour à la normale (h)	1,7	-	2,2	-	2,4	2,9

De cette simulation, en considérant un fluide boueux dense et la digue bornant le réservoir à polissage avec une cote de 85 m, on observe les points suivants :

- La rupture de la digue à résidu entrainerait le passage d'une crue soudaine de l'ordre de 3920 m³/s ;
- Le débit maximum est diminué significativement à 1652 m³/s **(-58%)** sur les 2,6 km du parcours.
- Les zones inondées sont touchées en trente minutes environ ;
- Il y a un retour aux conditions hydrologiques normales après 3 heures environ.

En conclusion, la rehausse de la crête de la digue bornant le réservoir à polissage, à la cote 85 m, a un impact positif sur la gestion d'une éventuelle rupture de la digue à résidu de la cellule 2 du projet minier Arnaud.

2.8 Simulation avec digue a résidu à 108 m et dérivation

Les simulations précédentes nous ont permis d'évaluer l'impact d'une rupture de la digue à résidu de la cellule 2 sur la trajectoire décrite par le ruisseau Clet. En plus d'avoir effectuer les simulations associées aux différents critères des **règlementations** en vigueur, nous devons valider le scénario de rupture en utilisant la cote maximum de la crête de la digue à résidu qui est envisagée dans le cadre du projet minier Arnaud, soit 108 m.

Le laminage, i.e. la diminution, de cette crue de rupture ne sera pas suffisante si nous rehaussons uniquement la digue bornant le réservoir de polissage. Nous devons tenir en compte qu'à cette étape de la durée de vie de l'exploitation du site minier, la fosse d'extraction à minerai sera présente et qu'elle peut agir comme réservoir d'appoint en cas de bris.

La hauteur de la digue de dérivation, i.e. la cote de sa crête, est évaluée par essais et erreurs. Nous assumons une hauteur et nous analysons le débit maximum qui passe une fois la fosse pleine. Le but est toujours d'obtenir le laminage maximum, i.e. la diminution maximum du débit de rupture.

Le résultat final de ces nombreuses simulations apparaît au tableau 2.6.

Tableau 2.6 - Digue à résidu a 108 m Digue de polissage à 85 m et Digue de dérivation

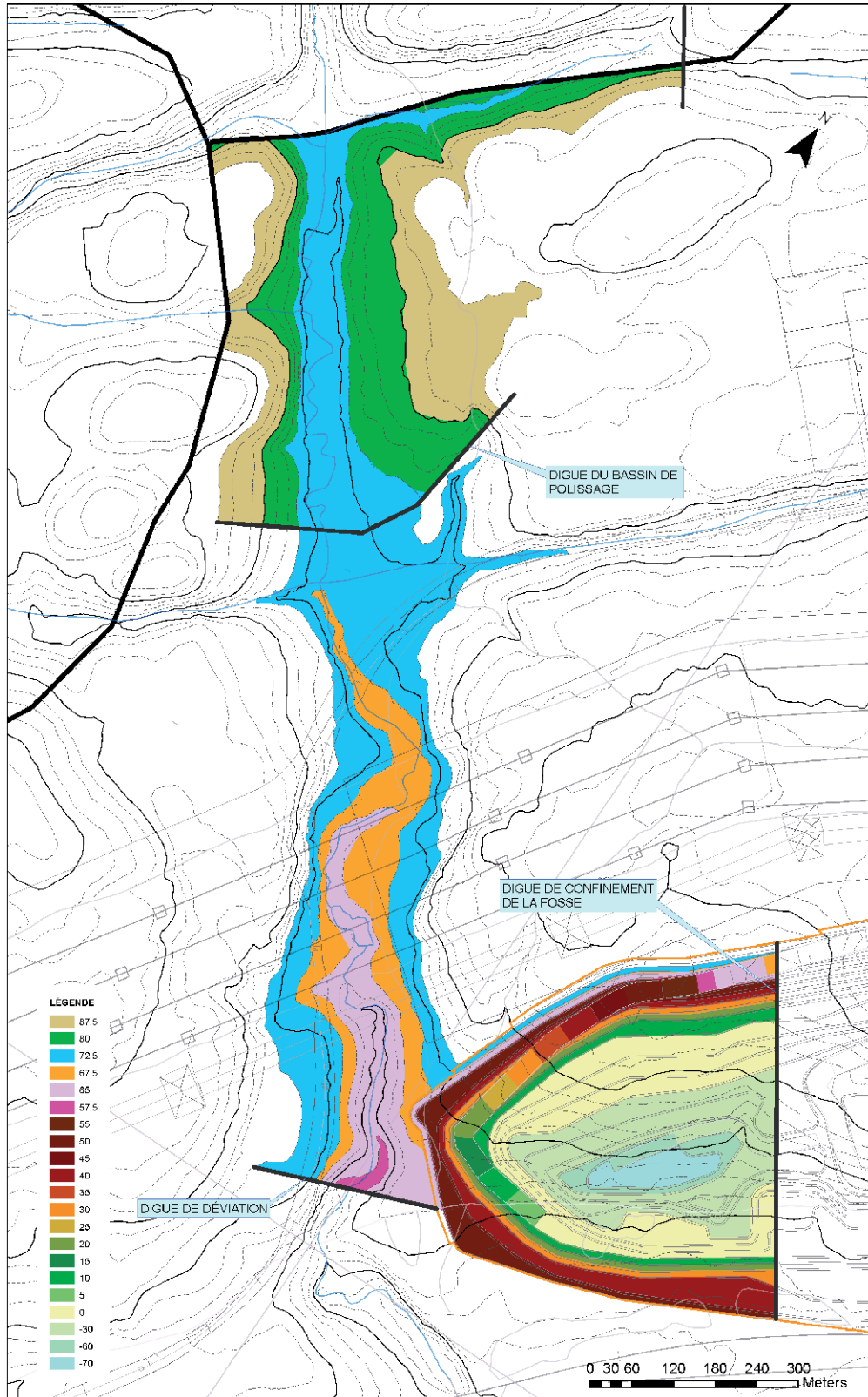
	Section 1 (digue a résidu)	Section 6 (bassin de polissage)	Section 8 (Voie Ferrée)	Section 10 (dérivation)	Section 12 (Fosse)	Section 19 (Embouchure du ruisseau)
Débit Max (m ³ /s)	5 877	4 956	4 918	4 750	30	30
Niveau Max (m)	108	89,4	73,3	71,5	-	-
Temps max (h)	-	0,48	0,5	0,5	-	-
Temps de retour (h)	-	1,5	1,7	1,8	-	-

Du tableau 2.6, en considérant un fluide boueux dense, la digue bornant le réservoir à polissage avec une cote de 85 m et une digue de dérivation vers la fosse d'extraction, on observe les points suivants :

- La rupture de la digue à résidu entrainerait le passage d'une crue soudaine de l'ordre de 5877 m³/s ;
- Le débit maximum est diminué énormément à 30 m³/s **(-99%)** sur 1,3 km du parcours, i.e. la distance entre le pied aval de la digue de retenu et la fosse d'extraction ;
- Les zones inondées sont touchées en trente minutes environ jusqu'à la fosse ;
- Les zones situées entre la fosse d'extraction et le fleuve ne seraient pas touchées ;
- Il y a un retour aux conditions hydrologiques normales après 2 heures environ ;
- **Le débit résiduel** correspond au débit en apport naturel du réseau hydrologique, soit 30 m³/s.

La figure 2.3 illustre les contours d'immersion avec la présence des deux digues et de la fosse d'extraction.

Figure 2.3 - Contour d'immersion avec digues et fosse d'extraction



En conclusion, la rehausse de la crête de la digue bornant le réservoir à polissage a la cote 85 m et l'ajout d'une digue de dérivation ayant une hauteur d'environ 7 à 15 m permet de laminier **énormément** le débit de rupture associé à une cote d'exploitation de la digue à résidu évaluée à 108 m.

3.0 STABILITÉ DES DIGUES DE TYPE 1 ET 2

3.1 Généralités

Cette section traite de la stabilité des digues de type 1 et 2 qui sont envisagées pour former les différentes cellules de résidu minier du projet mine Arnaud. La firme Journeaux et Associés Inc. a fait la conception de ces digues et son rapport de Décembre 2011 présente les résultats des calculs de stabilité pour le concept initial des digues de type 1 et 2. Dans ce rapport la firme Journeaux et Associés proposait de modifier ces digues pour tenir en compte la présence de cellules supplémentaires et une fondation formée d'argile marine.

Nous avons donc demandé aux experts de la firme Journeaux et Associés de produire un addenda au rapport de Décembre 2011 en tenant compte des informations suivantes, soit :

- Utiliser le concept modifié des digues type 1 et 2 ;
- Vérifier la stabilité pour une vidange rapide - analyse statique;
- Vérifier la stabilité pour une vidange rapide – analyse pseudo-statique.

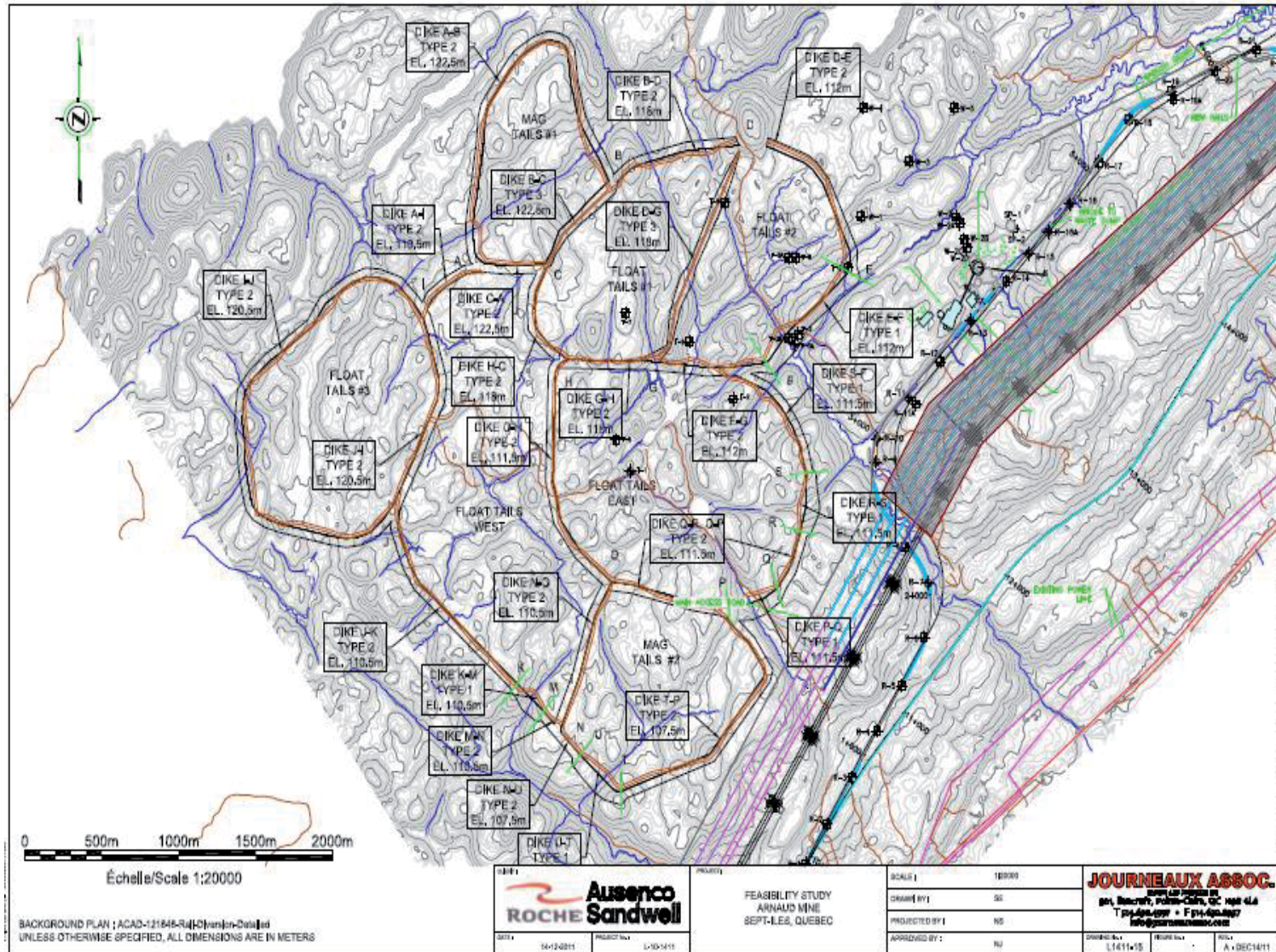
Les facteurs de sécurité à rencontrer sont définis dans le tableau III de l'annexe du ***Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec.***

Selon le tableau III du Guide, pour une construction de type vers l'amont, les facteurs de sécurité pour une analyse statique et pseudo-statique sont de 1.3 et 1.1 respectivement.

La figure 3.1 présente une vue d'ensemble du projet minier et la localisation des digues de type 1 et 2.

Les sections suivantes proviennent en totalité du rapport rédigé par la firme Journeaux et Associés émis le 29 Février 2012. Ces sections sont en ***italique.***

Figure 3.1 - Vue d'ensemble du projet et localisation des digues type 1 et 2



3.2 Calculs effectués par la firme Journeaux et Associés

3.2.1 GÉNÉRALITÉS

Tel que demandé, voici les analyses de stabilité faites pour les digues de type 1 (4H:1V) et de type 2 (2.6H:1V) insérées à la fin de notre rapport du 15 décembre 2011. Ces coupes ont été préparées pour les digues qui renferment les sept cellules prévues pour la construction du parc à résidus.

Les digues de type 2 seront construites sur le terrain solide, soit le mort terrain, les dépôts de moraine ou le roc. Les digues de type 1 (4H:1V) seront nécessaires pour enjamber les vallées et les crevasses moins profondes, où il est prévu de rencontrer des dépôts d'argile marine. La profondeur de ces vallées est considérée inférieure à la vallée du barrage traversant le ruisseau Clet.

L'argile sous le barrage du ruisseau Clet est de faible résistance et il est prévu d'augmenter la résistance de cette couche au moyen d'un système de drains verticaux rapprochés pour saigner rapidement toutes les pressions interstitielles. Le suivi du gain de résistance de l'argile sous le barrage sera fait en mesurant la décroissance des pressions interstitielles avec une série de piézomètres et le gain de résistance sera alors validé par des mesures de résistance au cisaillement au fur et à mesure que la digue est construite. De cette façon, le contrepoids ou les bermes de roc au pied du barrage peuvent être contrôlée au besoin.

Dans le cas de la digue de type 1 construite sur des fonds d'argile, aucune information sur la profondeur et la résistance du dépôt d'argile n'est connue.

La résistance des argiles, où elles existent, doit être vérifiée avant, pendant et après chaque palier et avant le rehaussement annuel des digues.

Un élément très important est le déplacement lors du rehaussement des rejets miniers très lâches sous les paliers et de s'assurer que les vibrations des équipements de densification expulsent les dépôts de rejets miniers lâches à très lâches vers le bassin et de les remplacer par les rejets grossiers qui s'enfonceraient dans les rejets. De cette façon, le risque d'une rupture du palier vers la pente aval sera minimisé.

3.2.2 ANALYSE DE STABILITÉ – DIGUES DE TYPE 1 ET DE TYPE 2

Ces digues sont localisées dans la partie la plus haute du parc à résidus et sont de hauteur variable et souvent inférieure à 20 mètres. Bien que le roc affleure à de nombreux endroits dans le parc à résidus, il est clair qu'aux endroits où ces digues traversent des crevasses profondes, il y a fort possiblement d'épais dépôts d'argile, dont l'épaisseur et la résistance au cisaillement ne sont pas connues. N'ayant que peu d'information géotechnique sur le terrain sur lequel ces digues seront construites, les informations géotechniques obtenues au forage T-3A à l'endroit du barrage du ruisseau Clet ont été utilisées pour l'analyse. Il est clair qu'à ces endroits, des sondages supplémentaires avec mesures de la résistance au cisaillement de l'argile sont obligatoires pour valider les analyses de stabilité afin d'établir si des drains verticaux ou des contrepoids seront nécessaires pour assurer la stabilité.

La stabilité a été analysée en présumant un gain de résistance régulier avec des pressions interstitielles décroissantes pendant le rehaussement progressif des digues d'année en année.

Il est clair que la hauteur maximum des digues avec pente de 4H:1V pour les digues de type 1 ne respecte pas la géométrie recommandée pour le barrage au ruisseau Clet. Il est alors obligatoire que la résistance au cisaillement des argiles soit vérifiée pour assurer la stabilité des digues.

Les résultats des analyses de stabilité effectuées sur les digues de type 1 et de type 2 sont les suivants :

	<u>Figure</u>	<u>Facteur de sécurité</u>
Type 1 - Fondation sur argile	Figure 3.2	1.3 statique à court terme
	Figure 3.3	1.8 statique à long terme
	Figure 3.4	1.4 sismique à long terme
Type 2 - Fondation sur moraine Ou roc	Figure 3.5	1.5 statique
	Figure 3.6	1.2 sismique

Figure 3.2 - Fondation sur argile - F.S. = 1.3 Statique à court terme

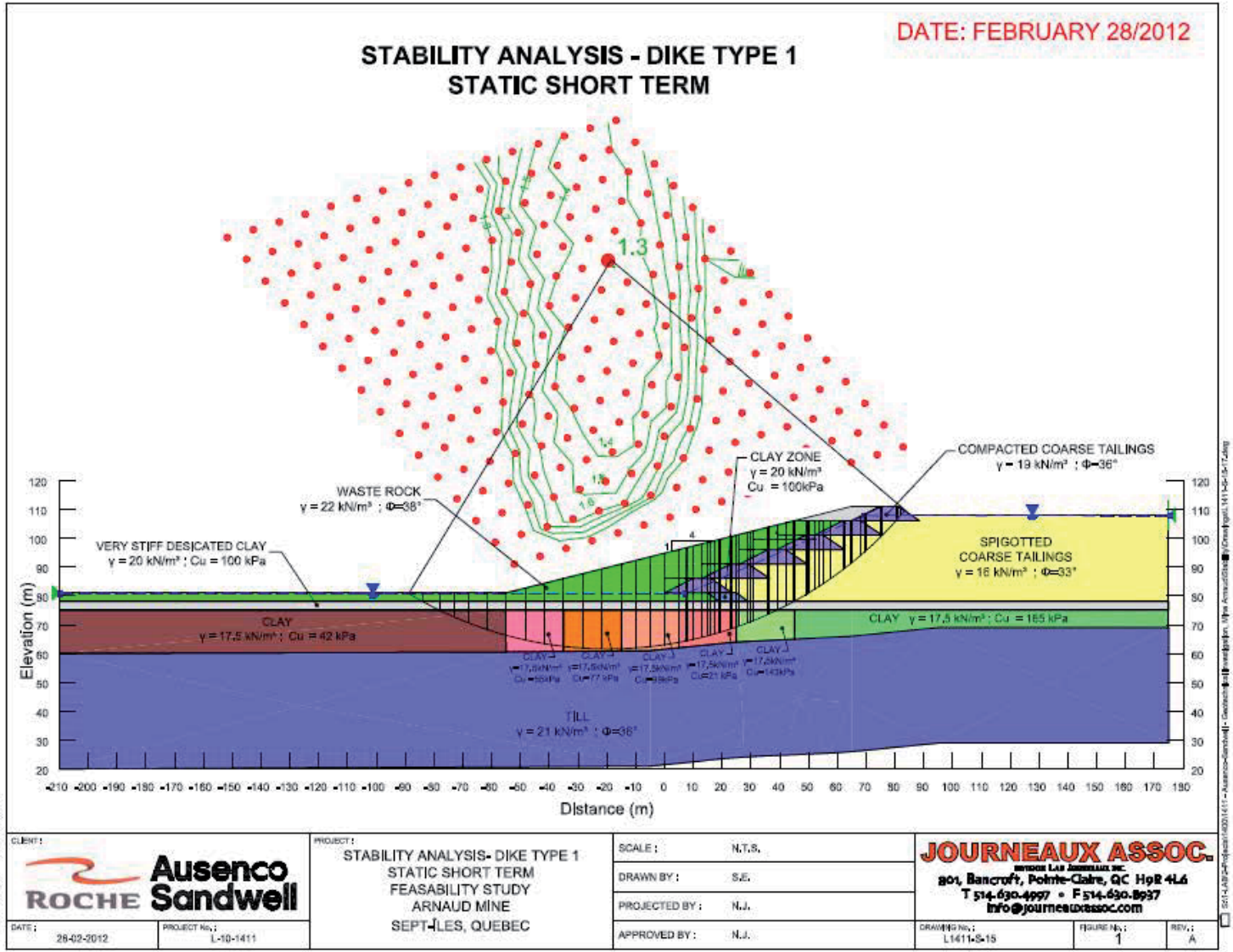
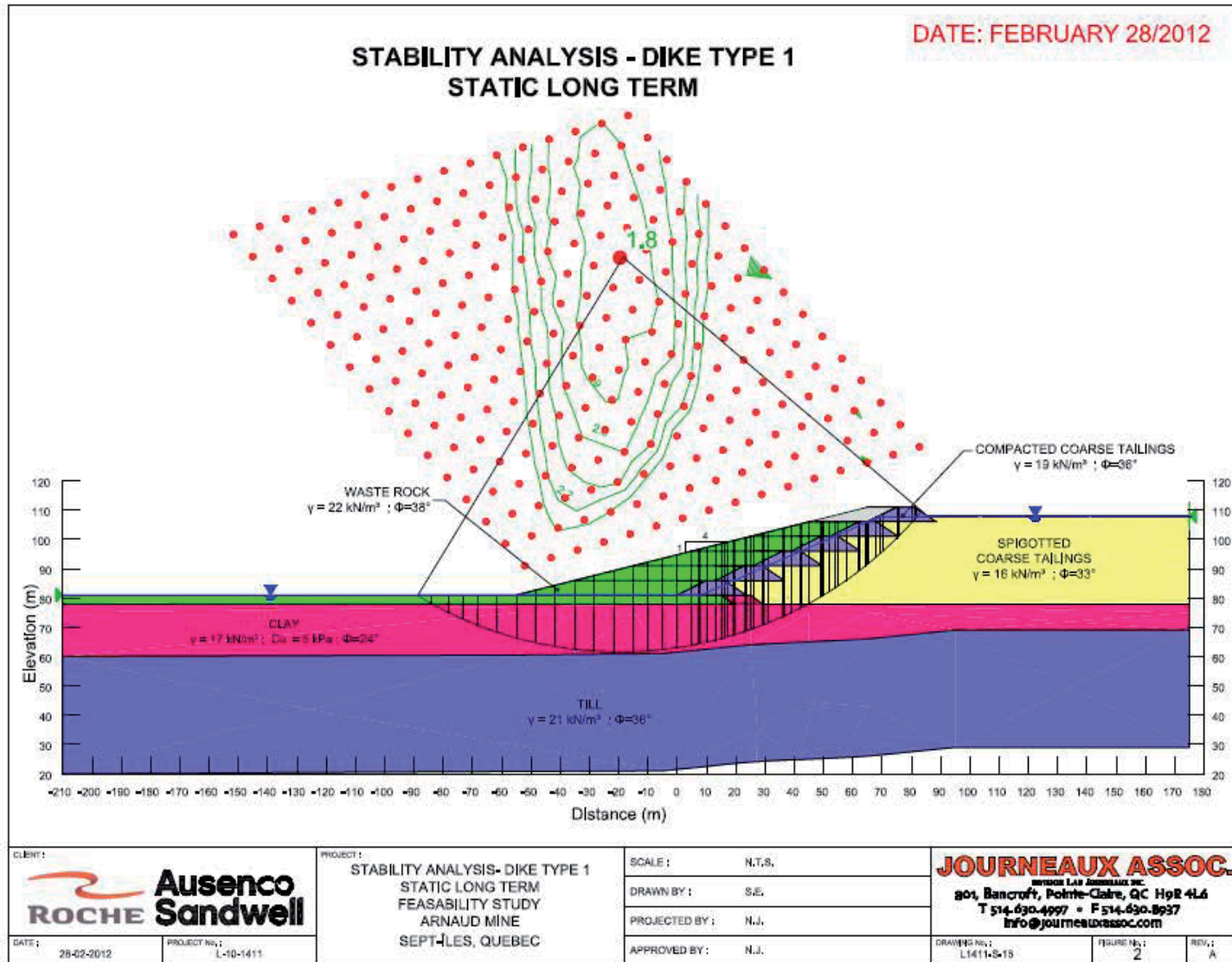


Figure 3.3 - Fondation sur argile - F.S. = 1.8 Statique à long terme



2014-02-28 10:00:00 AM - Ausenco-Sandwell - Geotechnical - Feasibility - Mine Arnaud - 1014011 - 18 - 2

Figure 3.4 - Fondation sur argile - F.S. = 1.4 Séismique à long terme

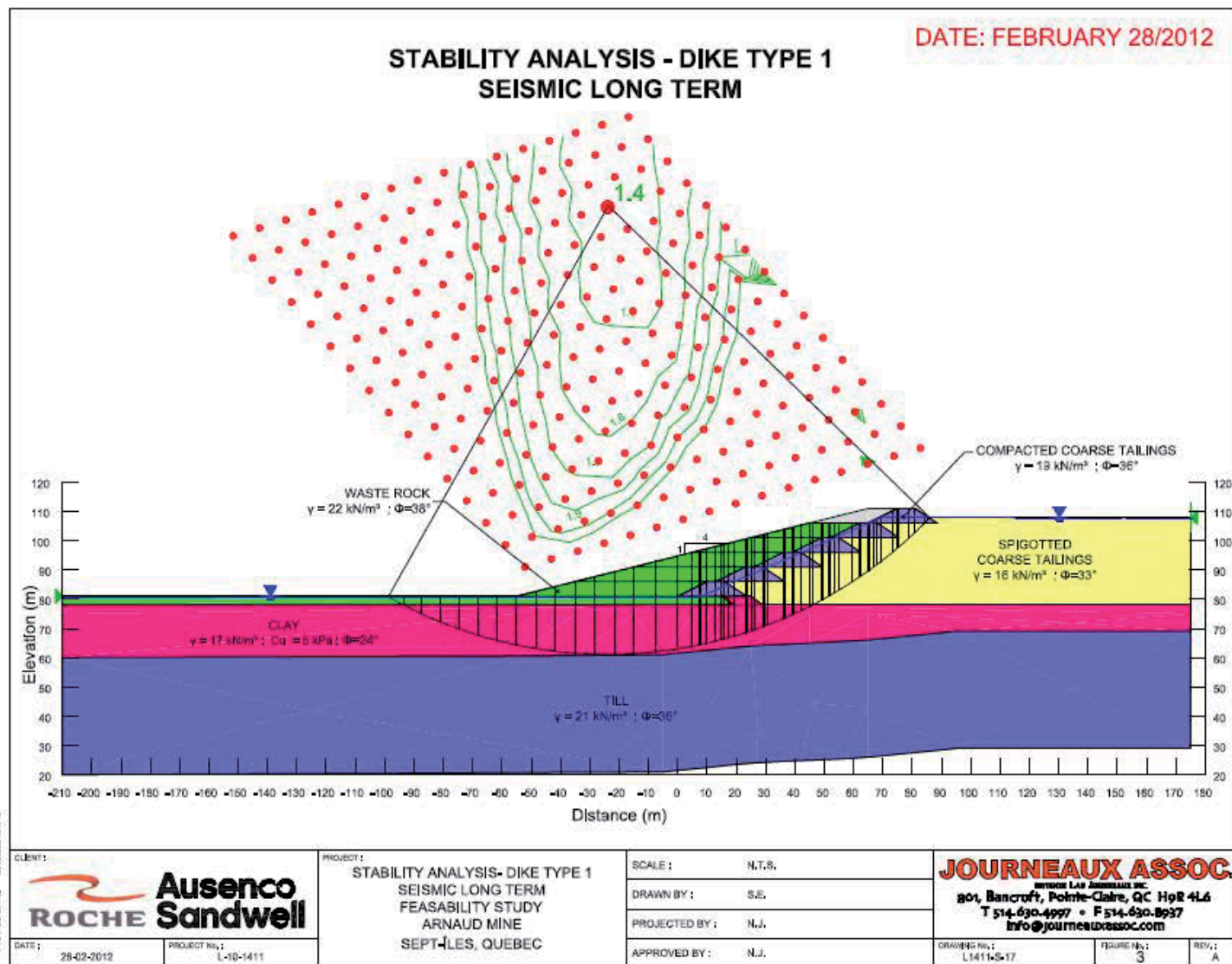


Figure 3.5 - Fondation sur moraine ou roc - F.S. = 1.5 Statique

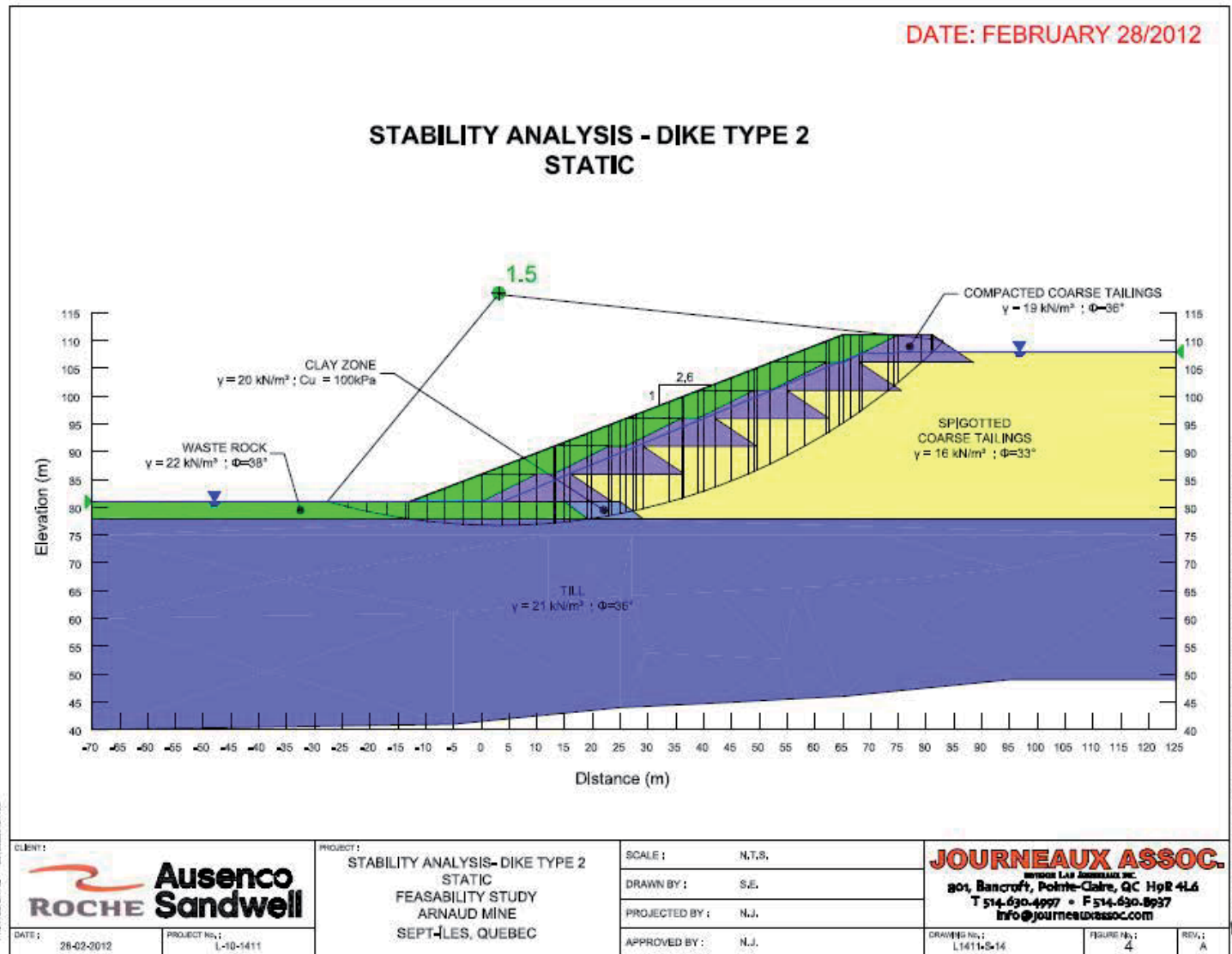
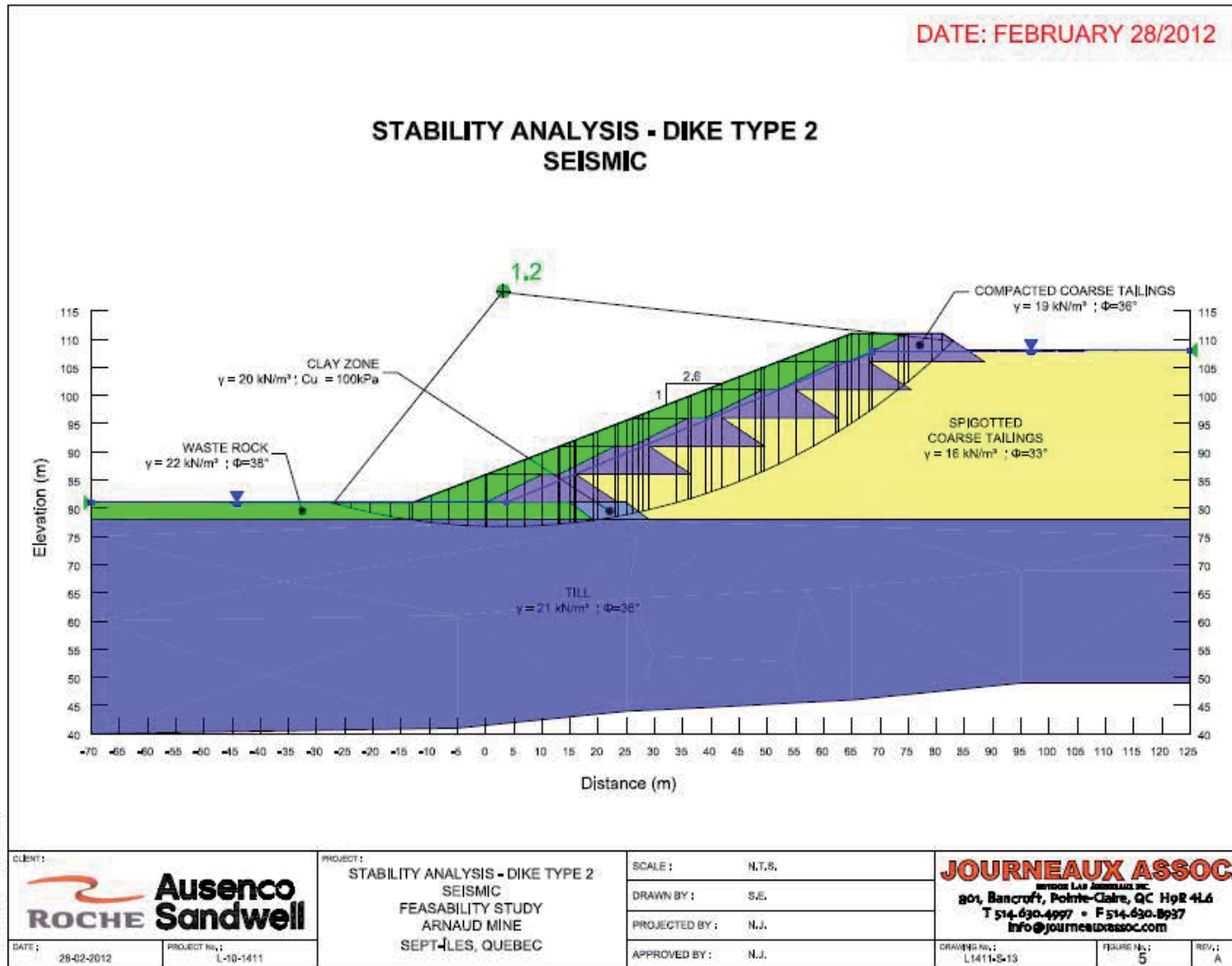


Figure 3.6 - Fondation sur moraine ou roc - F.S. = 1.2 Séismique



3.3 Observations

Des analyses de stabilité précédentes effectuées par la firme Journeaux et Associés, on remarque que tous les facteurs de sécurité **sont rencontrés et même supérieurs** à ceux recommandés par le tableau III du Guide et ce pour les deux types de digues envisagées pour le projet.

Nous pouvons donc conclure que pour les informations géotechniques actuellement disponibles et les concepts proposés, les digues de type 1 et 2 **sont sécuritaires**.

4.0 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

4.1 Conclusions

Ce rapport traite de l'impact d'une rupture potentielle de la digue à résidu de la cellule 2 du projet minier Arnaud. L'ensemble de nos hypothèses de calculs est basé sur des données géotechniques, topographiques, géologiques et miniers préliminaires. Le projet étant en évolution constante.

Les simulations numériques unidimensionnelles effectuées, nous permettent de conclure les éléments suivants, si et seulement si AUCUNE MESURES PRÉVENTIVES ET ATTÉNUANTES n'est mise en place, soit :

- La rupture de la digue de retenue de la cellule 2 provoquerait une crue rapide vidangeant le contenu liquide de la cellule en moins d'une heure ;
- Le débit maximal pouvant atteindre la dizaine de milliers de m³/s;
- Sur la courte distance de propagation la diminution de ce débit maximal instantané par laminage serait faible et ne réussirait pas à atténuer significativement les conséquences d'une telle rupture ;
- La crue pourrait alors atteindre et affecter la fosse d'extraction puis les zones habitées du rivage.

Pour en minimiser les conséquences d'une telle rupture de digue à résidu, le recours à la rehausse de la crête de la digue bornant le réservoir de polissage et l'ajout d'une digue de dérivation vers la fosse d'extraction **semble être une solution réaliste et efficace**.

Les réservoirs temporaires qui se formeraient en amont de ces deux digues en cas de rupture seraient probablement suffisants pour diminuer le risque associé à une rupture éventuelle de la digue bornant la cellule 2.

Cette solution de confinement **suppose** cependant que les deux digues sont conçues et protégées en surface pour résister pendant 1 à 2 heures à un **déversement sur leur crête**.

Finalement, l'analyse de la stabilité des digues de type 1 et 2 par la firme d'experts Journeaux et Associés nous confirme hors de doute raisonnable la stabilité statique et sismique de ces deux concepts de digue à résidu.

4.2 Recommandations et mesures préventives et atténuantes

4.2.1 GÉNÉRALITÉS

Les simulations précédentes nous ont démontrées que la gestion et l'exploitation sécuritaire du site minier Arnaud étaient possibles et réalisables en cas de rupture de la digue à résidu de la cellule 2 qui suit le sillon du ruisseau Clet.

La rehausse de la digue bornant le réservoir à résidu devra suivre la rehausse de la digue à résidu minier afin d'assurer la présence en tout d'un réservoir ayant une capacité d'emmagasinement suffisant à notre disposition en cas de rupture de la digue à résidu.

4.2.2 REHAUSSE DE LA DIGUE DU RÉSERVOIR À POLISSAGE

La cote maximale **de la digue** bornant le réservoir de polissage se situe à la cote 85 m. La cote du réservoir à polissage ne doit pas dépasser 73,5 m. en tout temps. Afin d'assurer la pérennité de la digue du réservoir à polissage, celle-ci sera conçue en considérant un débordement en crête sans rupture.

Ce type de digue est déjà en utilisation aux États-Unis d'Amérique et leur comportement, en situation de crue maximale avec débordement, est conforme aux normes en vigueur.

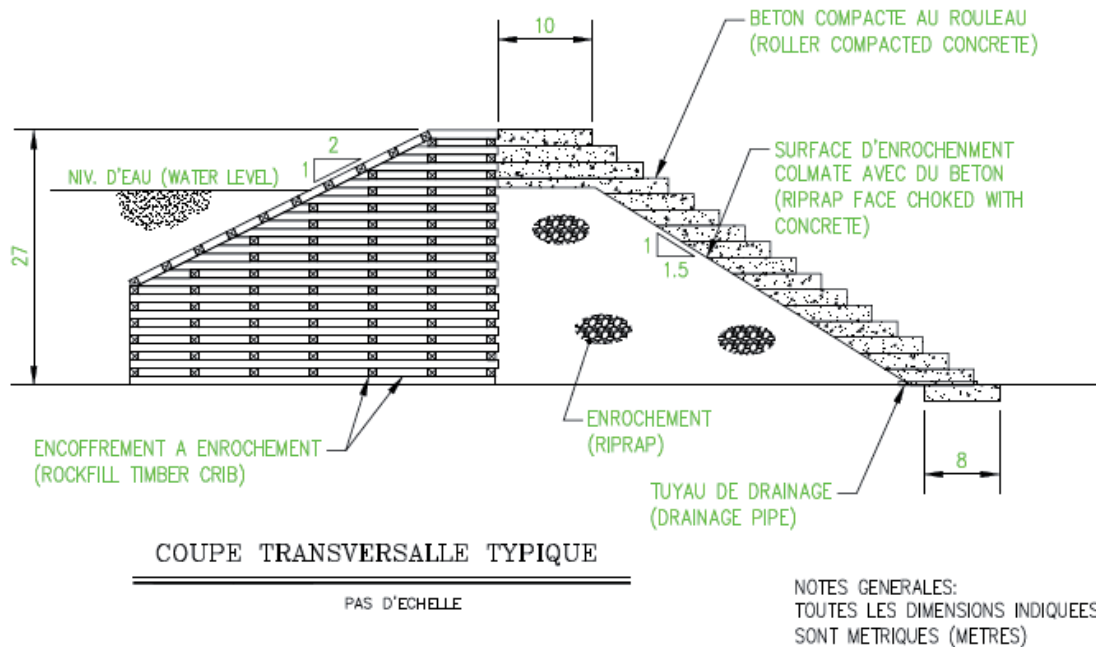
La Figure 4.1 présente une digue déjà en fonction aux États-Unis qui a déjà été submergée par une crue exceptionnelle.

La Figure 4.2 illustre la section type que nous proposons pour la digue bornant le réservoir à polissage. En amont la digue sera composée d'un radier en bois rempli de roche provenant du site d'exploitation. Du ciment de type Portland standard sera coulé dans chaque cellule pour combler les vider et colmater la paroi formant la section amont. La crête sera en dalle de béton préfabriqué. La section aval sera construite en béton roulé compacté. Un réseau de drainage complète la section proposée.

Figure 4.1 - Exemple de digue à crête déversante



Figure 4.2 - Section type proposée pour la digue bornant le réservoir de polissage



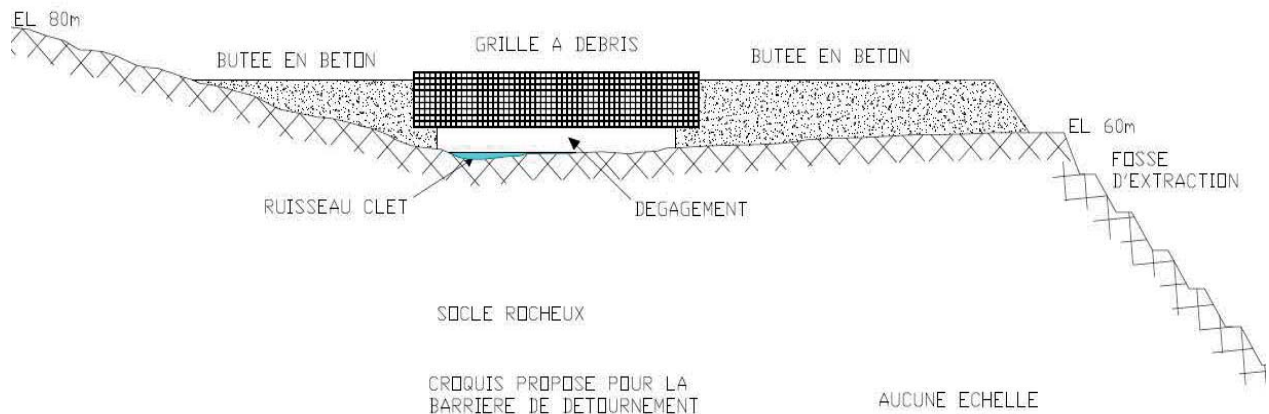
4.2.3 AJOUT D'UNE DIGUE DE DÉRIVATION

Les simulations mathématiques ont aussi permis d'évaluer l'impact sur le débit de rupture maximum de la présence d'une digue de dérivation vers la fosse d'extraction du minéral. Cette digue de dérivation prend toute son importance à mesure que la cote de la digue à résidu augmente.

Nous allons donc construire une digue de dérivation juste en amont de la fosse d'extraction du minéral. La hauteur de cette digue sera d'environ 7 à 15 m et sa section type est présentée à la Figure 4.3.

La fosse d'extraction de minéral ne sera plus en fonction avant d'atteindre la cote 108 m de la digue de retenue des résidus. Ce pré-requis fait partie de la gestion et de l'exploitation du site minier.

Figure 4.3 - Section type de la digue de dérivation



4.2.4 AUGMENTATION DE LA STABILITÉ DE LA DIGUE DU RÉSERVOIR À RÉSIDU

En plus d'apporter un confinement physique de l'écoulement dû à une rupture de la digue à résidu par la rehausse de la digue du réservoir à polissage et d'une digue de dérivation, nous avons aussi accrue, vérifié et validé la conception des digues type 1 et 2 que nous envisageons construire pour la digue de retenu des résidus miniers.

La vérification des concepts des types 1 et 2 de la digue a été confiée à la firme d'experts Journeaux et Associés. Les facteurs de sécurité à rencontrer sont définis dans le tableau III de l'annexe du **Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matières de restauration des sites miniers au Québec**.

Selon le tableau III du Guide, pour une construction de type vers l'amont, comme celle envisagée, les facteurs de sécurité recommandés sont de 1.3 pour une analyse statique et 1.1 pour une analyse pseudo-statique.

Les résultats obtenus, de la firme d'expert Journeaux et Associés, sont :

	<u>Facteur de sécurité</u>
Type 1 - Fondation sur argile	1.3 statique à court terme 1.8 statique à long terme 1.4 séismique à long terme
Type 2 - Fondation sur moraine Ou roc	1.5 statique 1.2 séismique

L'ensemble des facteurs de sécurité obtenu est donc supérieur à tous les critères mentionnés dans le tableau III du Guide.

4.2.5 PROTECTION DU CHEMIN DE FER

Dans le cas, très peu probable, d'une éventuelle rupture de la digue bornant le réservoir à résidu, le trajet suivi par l'écoulement boueux longera, à un certain moment, le tracé proposé du chemin de fer. De plus, le chemin de fer sera adjacent à la digue de dérivation envisagée.

Afin d'assurer la pérennité du nouveau tracé du chemin de fer, la conception de la structure et de la super structure supportant les traverses, le remblai et les ponceaux tiendra en compte la possibilité d'un débordement et d'un écoulement boueux.

L'ajout de plaques de dérivation sur les supports métalliques et l'augmentation de leur empattement, le dégagement des rives et de l'emprise du chemin de fer sera effectué.

4.2.6 FOSSE D'EXTRACTION

L'ensemble des mesures préventives et atténuantes mentionnées dans les sections précédentes suppose que la fosse d'extraction du minerai sera désaffectée une fois qu'elle aura atteint sa maturité.

De plus, l'ajout de la digue de confinement servant d'écran protecteur doit être complété au même moment que la fosse d'extraction ne sera plus utilisée à des fins minières.

La cote de la digue de confinement, entre les parties de la fosse, sera de 85 m afin d'assurer une protection efficace aux autres parties de la fosse à minerais encore en exploitation.

5.0 RÉFÉRENCES

Barrages, Crues de rupture et Protection civile, Claude Marche, Édition Presses Internationales Polytechnique, 2008

Guide et modalités de préparation du plan et exigences générales en matière de restauration des sites miniers au Québec – Annexe 1 Critères de stabilité, Gouvernement du Québec, 1997.

Directives pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'environnement d'un projet minier, Direction des évaluations environnementales, Développement durable, Gouvernement du Québec, Janvier 2012.

Stabilité à long terme des haldes de stériles et des parcs à résidus miniers, Article 4.3.4, Section 4 Pratiques de gestions environnemental recommandées, Gouvernement du Canada, 2012.

Planning, Design and Analysis of Tailing Dams, S. G. Vick, BiTech Publishers, 1990, 369 p.

Tailings Dams – Design Criteria and Safety Evaluations at closure, M.B. Szymanski, M.P. Davis, Proceedings of BC Reclamation Symposium, 2004.

Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams, T.E. Martin, E.C. McRoberts, 17 p.

Strength of Materials for Embankment Dams, USSD – Committee on Material for Embankment Dams, 2007, 27 p.

General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams, US Army Corps of Engineers, 2004,.

Design and Evaluation of Tailings Dams – Technical Report, US Environmental Protection Agency, 1994, 59 p.

Risk of Tailings Dams Failure, J.-F. Vanden Berghe et al., ISGSR 2011, pp. 209-216.

Dam-break studies for mine tailings impoundments, by Jey K.Jeyapalan. Geotechnical Engineering Program, Civil Engineering Department, Colorado State University (Ed.), Uranium Mill Tailings Management. Proceedings of the Fifth Symposium, December 9-10, 1982, Fort Collins, Colorado 1982, p.39-53

Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers : Problèmes persistants et méthodes de contrôle, M. Aubertin et al., Revue Canadienne de Géotechnique.