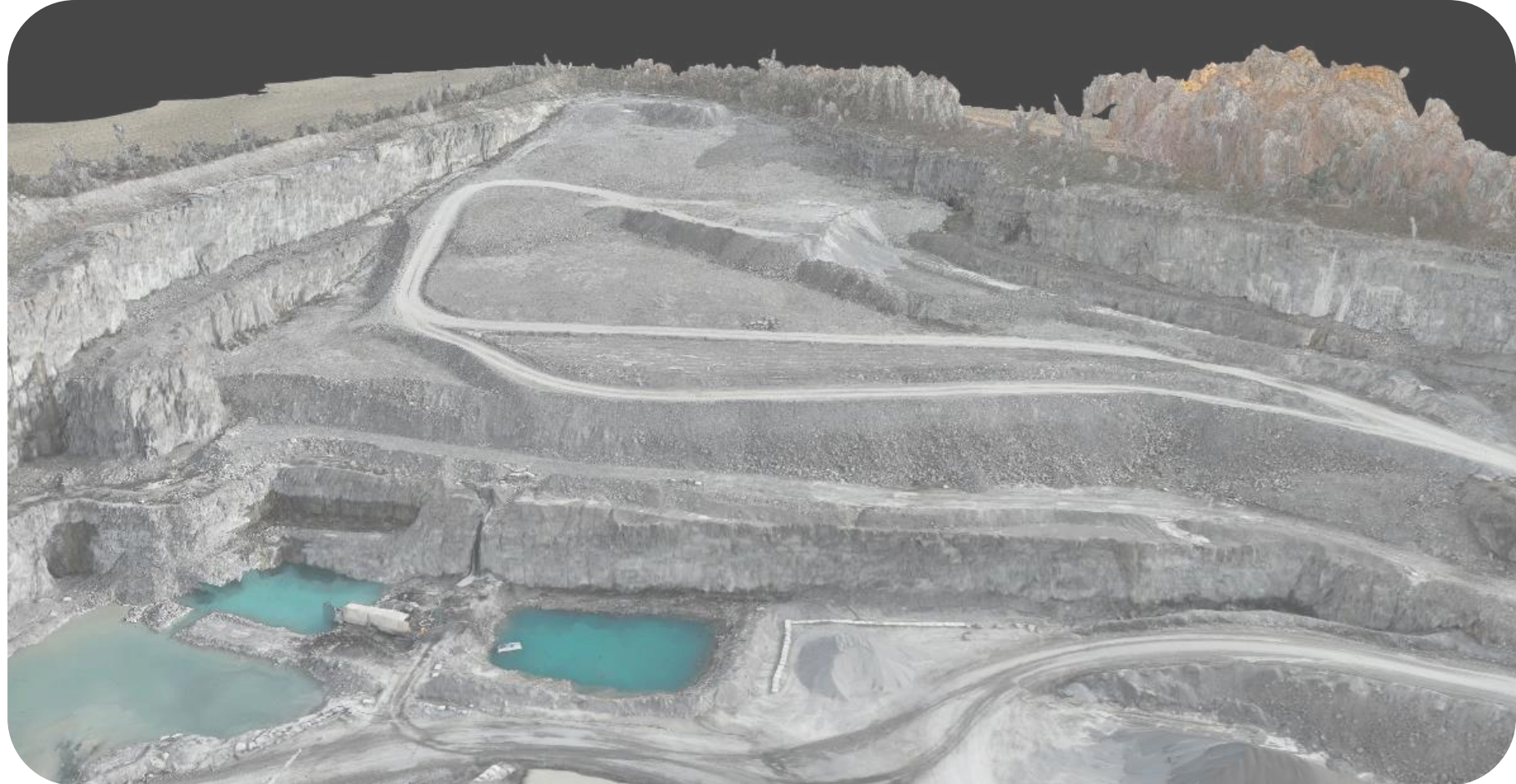


GÉOCLAS



Planification d'un dynamitage à proximité d'un dépôt de remblais en carrière - Étude de cas

Présenté par : Carlos Pelletier Martinez, géo., CPI, M.ing.

Date : 21 novembre 2024

Plan de la présentation

Géoclaste

1. Présentation de Géoclaste
2. La gestion des remblais dans les carrières
3. La gestion des risques géotechnique reliée aux remblais
4. Planification d'un dynamitage à proximité d'un dépôt de remblai
5. Projet de recherche Mitacs-Collaboration avec l'ÉTS

Présentation de ses représentants

Géoclaste



- **Carlos Pelletier Martinez, géo., CPI, M.ing.**
Président et géologue de projet et candidat à la profession d'ingénieur

Spécialités :

- ✓ Géologie et stabilité des parois rocheuses
- ✓ Gestion des remblais et des déblais d'excavation
- ✓ Processus et optimisation des carrières et cimenteries

- ✓ **Projet de maîtrise à l'ÉTS:**
 - ✓ **CRITÈRES OPÉRATIONNELS RÉGLEMENTAIRE EN LIEN AVEC LA STABILITÉ DES PAROIS ROCHEUSES DANS UNE CARRIÈRE DE CALCAIRE SELON UNE APPROCHE DE CONCEPTION MULTIFACTORIELLE AFIN DE SE CONFORMER À LA RÉGLEMENTATION ACTUELLE DU RSSM**

Géoclaste en bref

Géoclaste



Expertises

- Mécanique des roches et stabilité de talus rocheux
- Excavation souterraine et tunnel
- Géologie appliquée au domaine des carrières
 - Géotechnique
- Environnement et gestion des sols



Mission

Géoclaste a pour mission d'offrir à la clientèle un éventail de services spécialisés en **géologie et génie géologique-conseil**. Dans chaque projet, l'équipe a pour principal objectif de dépasser les attentes du client et de remettre en question le statu quo.



Carrières et sablières

Géoclaste se spécialise dans les services de consultation en géologie et géotechnique pour les carrières. Nos experts vous aideront pour la planification et la réalisation des investigations de terrain, des études hydrogéologiques, la conception de fosse et de rampe, la modélisation 3D et de blocs de vos gisements, la réalisation des travaux sécuritaires à proximité de parois rocheuses, les plans et devis d'excavation, ainsi que les plans de restauration et de réaménagement en vertu du RSSM* et du RCS**. Géoclaste offre également des services intégrés besoins en géologie, géotechnique, suivi de terrain et modélisation.

[En savoir plus](#)



Cimenteries

Géoclaste est fier d'offrir des services de géologie, de géotechnique, de procédés et d'optimisation uniques et spécialisés aux cimenteries. Que ce soit pour les travaux d'investigation, la recherche ou la modélisation de gisement, la conception de fosses et de rampes, les études hydrogéologiques, les plans et devis d'excavation, la restauration et la réhabilitation des carrières, ainsi que l'optimisation de l'exploitation, des mélanges de cru et des procédés de ciment de la carrière jusqu'au four, Géoclaste mettra tous les outils en place pour vous aider à accroître votre efficacité, votre production et la sécurité dans vos carrières.

[En savoir plus](#)



Génie civil, tunnels et infrastructures

Notre équipe spécialisée en mécanique des roches et géotechnique saura vous assister dans la réalisation de vos projets de construction de l'étude de faisabilité à la mise en œuvre. Nous sommes réputés pour notre efficacité et nos aptitudes de travail en équipe avec l'ensemble des intervenants afin de proposer les meilleures solutions et dépasser les attentes de nos clients. De plus, Géoclaste possède une expertise spécifique au domaine des tunnels avec du personnel expérimenté pour la planification, la conception et le suivi de construction d'excavations souterraines.

[En savoir plus](#)



Mines

Ce secteur est en plein développement au sein de l'entreprise. Notre équipe spécialisée en investigation de terrain, mécanique des roches, hydrogéologie et conception d'excavation et de soutènement de massif rocheux vous assistera dans la réalisation de vos projets et la résolution de vos défis. Nous sommes en mesure de procéder à la caractérisation géomécanique de massif rocheux afin de concevoir et optimiser les excavations et le soutènement dans le roc autant à ciel ouvert qu'en tunnel. Nous proposons également des programmes de contrôle de terrain, des études et analyses de stabilité.

[En savoir plus](#)

La problématique des empilements de remblai

Géoclaste



Les principaux facteurs influençant la liquéfaction ou le glissement incluent :

- ✓ **La granulométrie** : Les sols à grains fins, comme les sables limoneux, sont plus susceptibles de se liquéfier.
- ✓ **La densité** : Les sols peu denses sont plus vulnérables à la liquéfaction.
- ✓ **La saturation en eau** : Les sols saturés en eau sont plus susceptibles de se liquéfier.
- ✓ **Les vibrations** : Les tremblements de terre et autres sources de vibrations peuvent déclencher la liquéfaction.

Restauration progressive avec des sols AB ou <A

Géoclaste

45. L'exploitant d'une carrière qui effectue du remblayage conformément au sous-paragraphe e et du paragraphe 3 du premier alinéa de l'article 42 est tenu de vérifier l'admissibilité des sols avant leur entrée dans la carrière. À cette fin, l'exploitant doit, avant la réception des sols contaminés, confirmer la nature et les valeurs de concentration des substances présentes dans ces sols sur la base de rapports d'analyse soumis par le fournisseur et présentant un nombre d'échantillons représentatifs.

De plus, l'exploitant d'une carrière ou d'une sablière qui reçoit des sols pour effectuer du remblayage conformément à l'un des sous-paragraphe *b* et *e* du paragraphe 3 du premier alinéa de l'article 42 doit, lors de la réception de ces sols, prélever et faire analyser un échantillon pour chaque lot de sols inférieur ou égal à 200 tonnes métriques. Pour tout lot de sols supérieur à 200 tonnes métriques, l'exploitant doit prélever et faire analyser un échantillon supplémentaire pour chaque fraction additionnelle de sols inférieure ou égale à 400 tonnes métriques.

L'analyse des échantillons prélevés conformément au présent article doit permettre d'identifier les composés visés à l'annexe I du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (chapitre Q-2, r. 37) qui suivent:

- 1° les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP);
- 2° les hydrocarbures pétroliers (C10-C50);
- 3° les métaux et métalloïdes;
- 4° dans le cas où la matière reçue consiste en des sols visés au sous-paragraphe *e* du paragraphe 3 du premier alinéa de l'article 42, tout contaminant identifié dans le rapport de caractérisation visé au premier alinéa.

Les analyses requises pour l'application du présent article doivent être effectuées par un laboratoire accrédité par le ministre en vertu de l'article 118.6 de la Loi.



Stabilité et glissement de terrain

Géoclaste



Stabilité et glissement de terrain

Géoclaste

Après le glissement le dimanche 10h



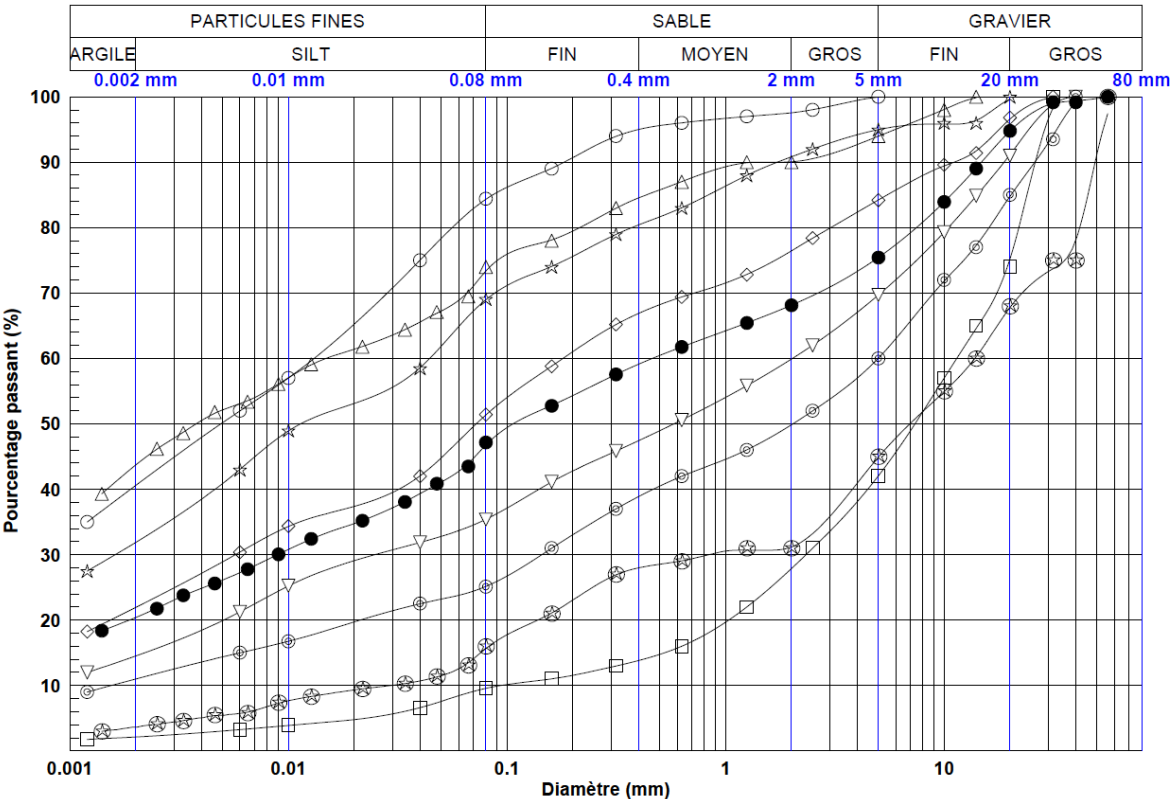
Cause du glissement ?

- Remblai lâche avec faible capacité portante à la base.
- Présence d'eau dans le dépôt et venues d'eau dans les parois rocheuses.
- Changement de température rapide.

Variabilité des sols de l'empilement

Géoclaste

Courbe	Argile	Silt	Sable	Gravier	Classification MCIF
Minimum	41	44	16	0	Silt et argile, un peu de sable
Maximum	2	7	32	58	Gravier sableux, traces de silt et d'argile
Moyenne	15	21	34	30	Sable graveleux et silteux, un peu d'argile



Les granulométries sont étalées ce qui confirme que les sols importés sont un mélange des sols de différentes propriétés

6.1 CLASSIFICATION OPÉRATIONNELLE DES REMBLAIS

En premier lieu, Lafarge doit être doté d'un système de classification opérationnelle des sols comprenant trois (3) catégories de remblais devant être mis en place par Lafarge. Cette catégorie de sols devra être utilisée afin d'identifier visuellement les différents types de matériaux importés dans les carrières.

Tableau 1 – Sommaire des trois catégories de remblais à mettre en place par Lafarge

Catégorie	Type de sol du point de vue opérationnel – Lafarge	Type de sol du point de vue géotechnique
Catégorie 1	Mélange composé de bloc, cailloux, gravier, sable, avec un faible pourcentage de particules fines (<10% de silt et d'argile) sur lequel un véhicule peut circuler après une compaction minimale.	Remblai graveleux à sableux avec faible teneur en eau.
Catégorie 2	Mélange de gravier, sable, silt, argile contenant un pourcentage de particules fines d'environ 20 % à 30 % et plus et sur lequel un véhicule peut circuler après quelques passages du camion-bélier en générant des ornières raisonnables.	Remblai avec fortes teneurs en particules fines, mais à faible teneur en eau.
Catégorie 3	Matériaux essentiellement silteux et argileux, de consistance apparente molle sur lesquels la circulation des véhicules n'est pas possible, même lorsque posée en couches minces.	Remblai argileux et silteux saturé.

Planification d'un sautage à proximité d'une butte de remblais – Étude de cas

Géoclaste



PARAMÈTRES DE SAUTAGES PRÉVUS

FORAGE

Nombre de trous : 90
Diamètre : 105mm
Hauteur de banquette : 10,7m
Sous-forage : N/A
Fardeau : 3,2m
Espacement : 3,2m
Volume moyen/trou : 109,26m³

CHARGEMENT

Type d'explosifs : Émulsion en vrac (1,2g/cc)
Collet : 2,4m
Colonne chargeable : 8,3m
Charge max : 101,3 kg
Charge moyenne : 85,5kg
Facteur de charge : 0,78 kg/m³
Séquence : 1 trou par délai



Planification d'un sautage à proximité d'une butte de remblais – Étude de cas

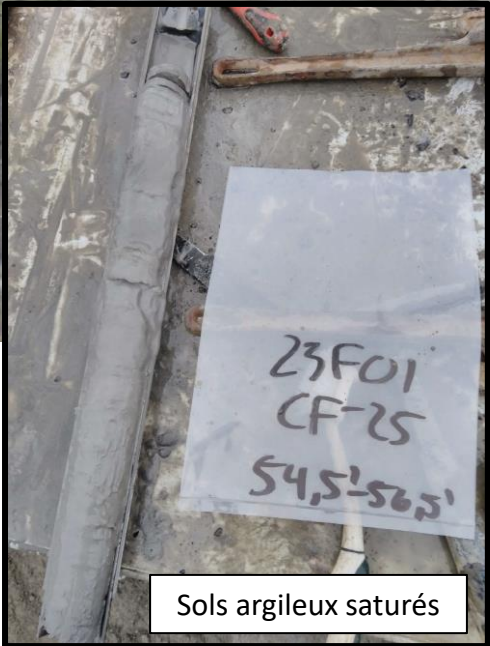
Géoclaste



Enjeux géotechniques importants en lien avec la stabilité

Historique géotechnique de la butte de remblais

Géoclaste

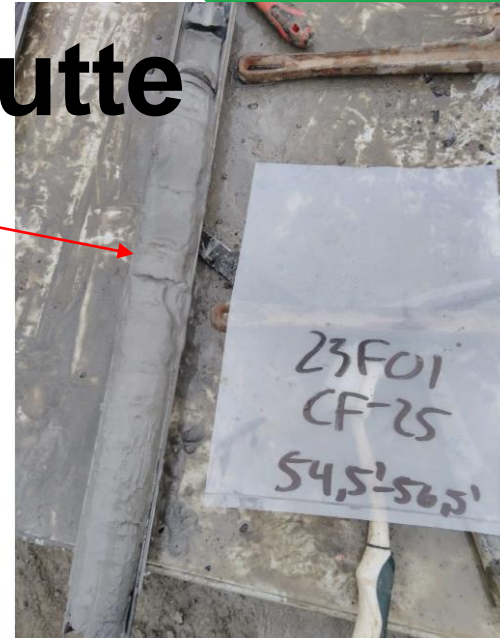


Historique géotechnique de la butte de remblai

Partie supérieure

Sol saturé et non consolidé

Géoclaste



PROFONDEUR (m)	PROFONDEUR (p)	STRATIGRAPHIE		ÉCHANTILLONS				GRAPHIQUE	ESSAIS
	NIVEAU (m) / PROFONDEUR	DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC	SYMBOLES	TYPE - NO	SOUS - ÉCH.	ÉTAT et CALIBRE RECUPERATION (%)	N. Nc ou RQD	COUPS / 15 cm	
10,82		Niveau							
0,00		REMBLAI graveleux et sableux avec un peu de silt et d'argile. Brun grisâtre. Consistance molle à ferme. Plasticité faible. Humide.		CF-01	N	85	47	17-19-28-37	
				CF-02	N	90	98	38-51-47-21	
1				CF-03	N	61	32	18-18-14-5	
5				CF-04	A	N	95	18-13-9-8	
2				CF-04	B	N			
				CF-5	N	54	15	8-8-7-3	
3				CF-6	N	42	10	3-4-6-5	
10				CF-7	N	59	8	3-3-5-17	
4				CF-8	N	0		50	
15				CF-9	N	38	7	3-4-6	
5,64	5,18	REMBLAI silteux, un peu de gravier, de sable et d'argile. Gris							

Indice de compacité : sols compacts

PROFONDEUR (m)	PROFONDEUR (p)	STRATIGRAPHIE		ÉCHANTILLONS				GRAPHIQUE	ESSAIS
	NIVEAU (m) / PROFONDEUR	DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC	SYMBOLES	TYPE - NO	SOUS - ÉCH.	ÉTAT et CALIBRE RECUPERATION (%)	N. Nc ou RQD	COUPS / 15 cm	
6		brunâtre. Consistance raide. Plasticité faible à moyenne. Très humide		CF-10	N	17	25	14-16-8	
				CF-11	N	0	18	10-10-6-12	
7				CF-12	N	48	10	4-4-6-5	
25				CF-13	N	40	68	6-41-27-21	
8				CF-14	N	29	30	10-12-1-12	
				CF-15	N	63	17	3-11-6-5	
				CF-16	N	2	11	5-5-6-8	
10		Piezomètre sec : 10,06m		CF-17	N	65	18	7-8-10-11	
35				CF-18	N	70	8	5-4-4-5	
				CF-19	N	60	20	12-9-11-11	
40				CF-20	N	50	30	7-14-16-13	
45				CF-21	N	90	26	13-15-1-15	
13				CF-22	N	63	12	5-6-6-8	
15				CF-23	N	79	9	5-3-6-2	

Indice de compacité : sols lâches

PROFONDEUR (m)	PROFONDEUR (p)	STRATIGRAPHIE		ÉCHANTILLONS				GRAPHIQUE	ESSAIS
	NIVEAU (m) / PROFONDEUR	DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC	SYMBOLES	TYPE - NO	SOUS - ÉCH.	ÉTAT et CALIBRE RECUPERATION (%)	N. Nc ou RQD	COUPS / 15 cm	
15,03	15,85	BOUES Silt argileux et sableux. Gris clair. Consistance très molle à moie. Plasticité nulle à faible. Saturé		CF-24	N	65	11	3-5-6-10	
				CF-25	N	90	6	3-3-3-7	
55				CF-26	N	100	1	2-1-0-4	
				CF-27	N	100	5	1-2-3-9	
17				CF-28	N	100		50	
19		Niveau piézométrique : 10,02m							
65	3,76	CALCAIRE gris clair latéux présentant des lits millimétriques à centimétriques de stries. Présence de stylolites. Le niveau de fracturation du roc est moyen.		CR-29	N	64	43		
19,58				CR-30	N	103	40		

Partie inférieure

Planification d'un sautage à proximité d'une butte de remblais – Étude de cas

Géoclaste

Limite de vibration :

- Le « United States Bureau of Mine » (USBM) est une référence de l'industrie en ce qui concerne les normes applicables. Dans une révision de 2008, le Bureau recommande de **limiter les vibrations sur un « Embankment dam » soit un « barrage de remblai »** à 4po/s; ou **100 mm/s**, tel que montré sur la figure suivante.
- Considérant la **connaissance de l'historique et de la composition géotechnique de la butte de remblais**, Géoclaste recommande de ne pas dépasser **65mm/s** en termes de vibration au dépôt de remblais.

Table 02305A- Maximum Peak Particle Velocity Permitted at Structures

Structure Type	Vibration frequencies (cycles/second)	Peak particle velocity (inches/second)
Relatively new residential with drywall walls	Below 40	0.75
	Above 40	2.0
Older residential with lath and plaster walls, or other structures in precarious condition, sensitive switches	Below 40	0.5
	Above 40	2.0
Industrial (more substantial than residential)	--	2.0
Government-owned concrete or steel structures, or grouted or treated foundations	--	4.0
Embankment dams		4.0

100 mm/s

Figure – Extrait des normes USBM 2008, en pouce/seconde.

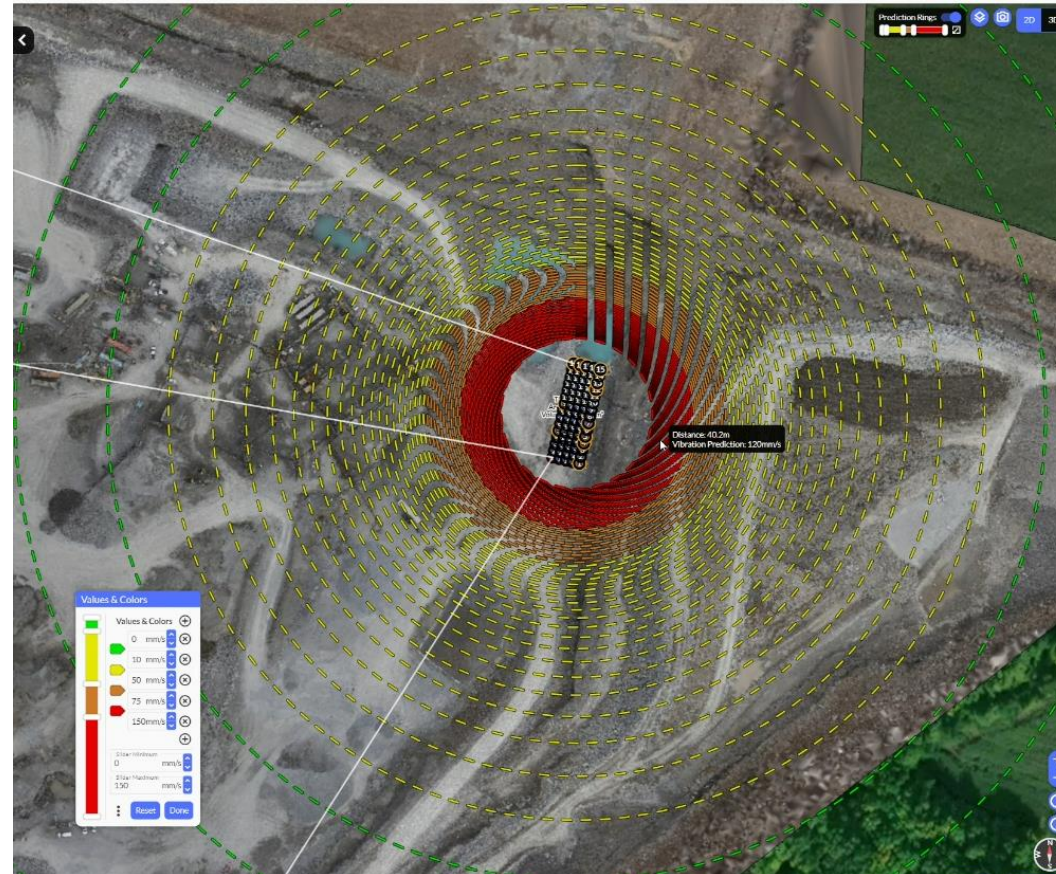
Estimation des vibrations

Géoclaste

Modélisation numérique :

Le logiciel **Strayos** a été utilisé pour estimer les vibrations du tir. Strayos emploie des modèles d'intelligence artificielle entraînés sur des données historiques de dynamitage et des formules standards reconnues dans l'industrie, notamment l'équation de distance réduite:
$$PPV = K (d/w^{1/2})^n$$

Strayos facilite également la conception des tirs avec une visualisation des vibrations estimées dans l'espace.



Estimation des vibrations

Constantes de site :

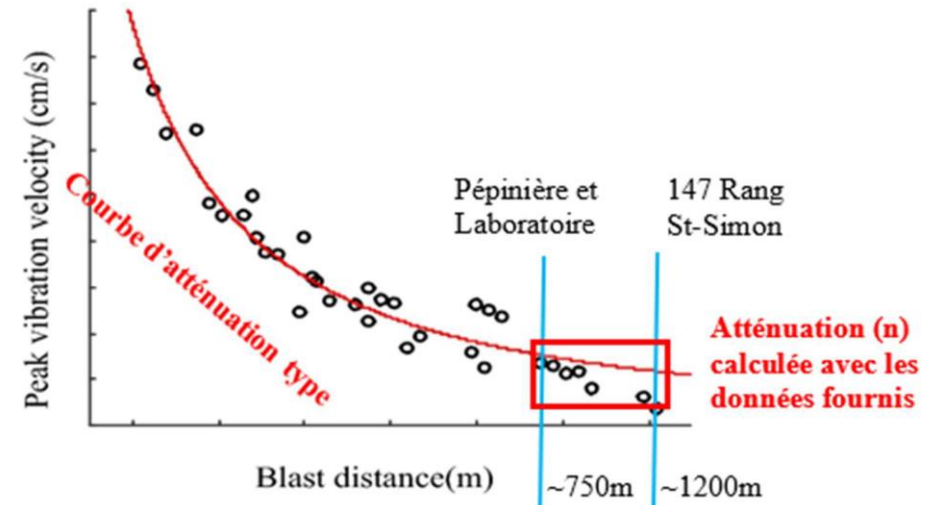
Constantes de site calculées à partir des données sismiques fournies par l'exploitant : **K = 1262 ; n = -0.86**

Constantes **invalides** dues aux distances trop éloignées des points de mesures. Vibrations mesurées aux sismographes déjà fortement atténués. La constante d'atténuation est donc trop faible et serait non représentative des vibrations attendues à la butte de remblais.

Les constantes typiques **K=1100 et n= -1.6** ont été utilisées.

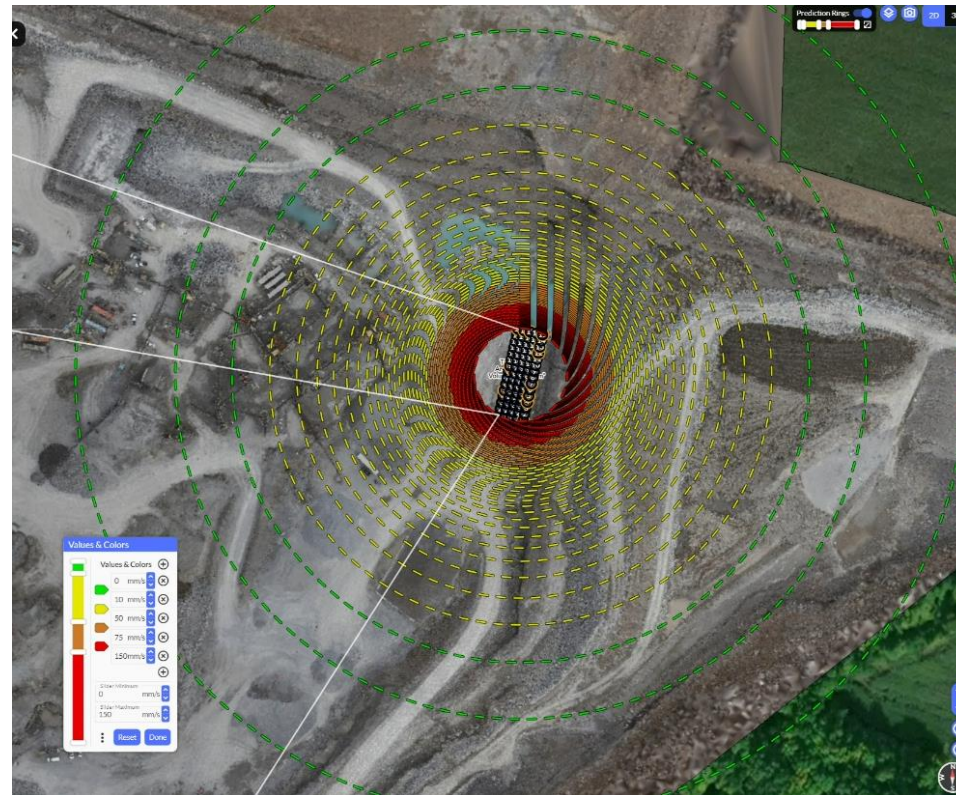
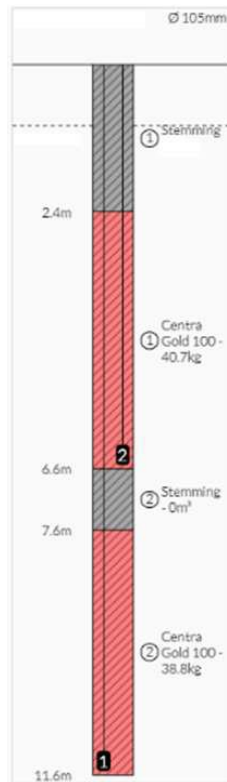
La charge maximale par délai a été établie à 101,3kg selon les paramètres de forage/chargement fournis par la compagnie de forage et dynamitage et les vibrations ont été estimées à **120,94mm/s** dans le dépôt de remblais.

Géoclaste



Estimation des vibrations

En adoptant la solution des chargements étagés, la charge maximale par délai a été réduite à 45,9 kg et les vibrations attendues à la digue ont été estimées à **64,2 mm/s**. La figure suivante présente la modélisation des vibrations effectuée avec le logiciel Strayos avec la solution adaptée.



COEFFICIENT DE SISMICITÉ CALCULÉ POUR LE SAUTAGE

Géoclaste

Les vibrations attendues à l'enrochement servant de butée au dépôt de remblai ne seront pas supérieures à 65 mm/seconde conformément recommandations de Géoclaste. Pour ce qui est de la sismicité, la valeur d'accélération des différentes fréquences prévues au pied de la butte d'enrochement lors du sautage étudié a été calculée à l'aide de la formule suivante, l'équation d'oscillements sinusoïdales :

$$a = 2\pi \times f \times v$$

Où

a = accélération gravitationnelle (mm/s²)

f = fréquence du sautage (Hz)

v = vitesse particulaire des vibrations du sautage (mm/s)

Le coefficient sismique retenu pour les analyses de stabilité sismique en conditions pseudo-statique correspond à 50 % de la valeur d'accélération des fréquences horizontales et verticales moyennes (Bray JD, [Travasariou T, 2009](#)).

Tableau 4 – Moyenne cumulée des diverses fréquences provenant des deux sismographes

Moyenne cumulée des diverses fréquences	Moyenne	Minimum	Maximum
Fréquence longitudinale	14,3	7,5	34,1
Fréquence verticale	53,3	10	102,4
Fréquence transversale	16,8	7,7	46,5

Tableau 5 – Valeurs estimées de l'accélération gravitationnelle en fonction des différentes fréquences du sautage prévu

Accélération gravitationnelle	Accélération gravitationnelle exprimée en % g
Accélération gravitationnelle pour la fréquence longitudinale	29%
Accélération gravitationnelle pour la fréquence verticale	110%
Accélération gravitationnelle pour la fréquence transversale	34%

ANALYSE DE STABILITÉ DU DÉPÔT DE REMBLAI

Géoclaste

Tableau 7 – Résultats des analyses de stabilité - Zone de dépôt actuelle

Conditions	FS (statique)	FS (Pseudo-statique)
Condition actuelle avant sautage	3,69	-
Condition actuelle avec sautage (onde longitudinale seulement)	-	1,11
Condition actuelle avec sautage (onde verticale seulement)	-	2,62
Condition actuelle avec sautage (onde verticale et longitudinale combinée)	-	2,28

Ondes longitudinales

- Facteur de sécurité réduit de moitié; Plus haut risque de glissement.
- Mouvements de compression et de tension le long de l'axe longitudinale
- Déplacement particulière le long de plans préférentiels (litage de dépôts, pentes, écoulement interne de l'eau)

Effet des hautes fréquences

- Granoclasement: ségrégation par taille des grains
- Création de vides dans les sols secs

Effet des basses fréquences

- Liquéfaction des sols saturés
- Tassements de sols saturés

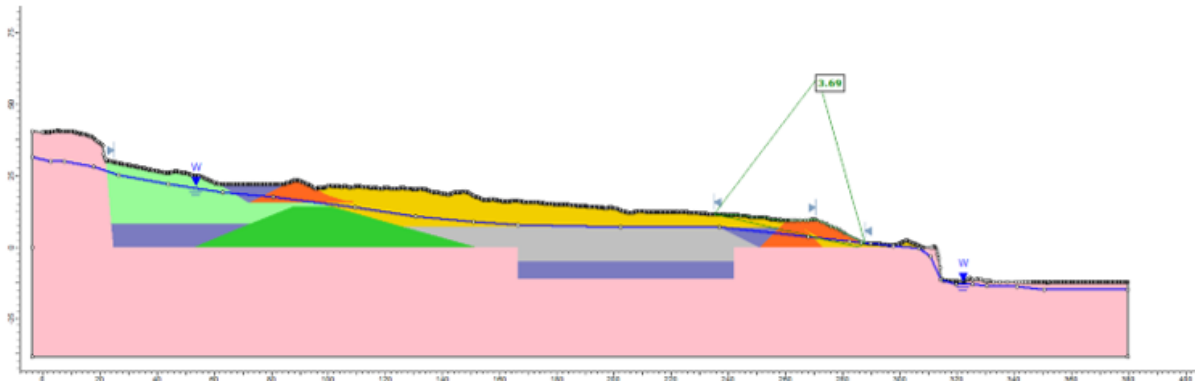
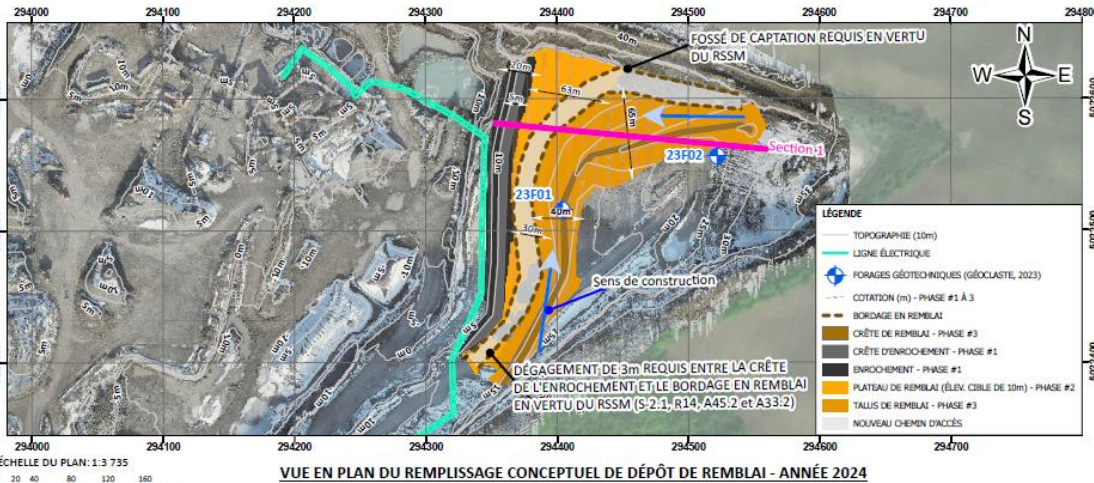
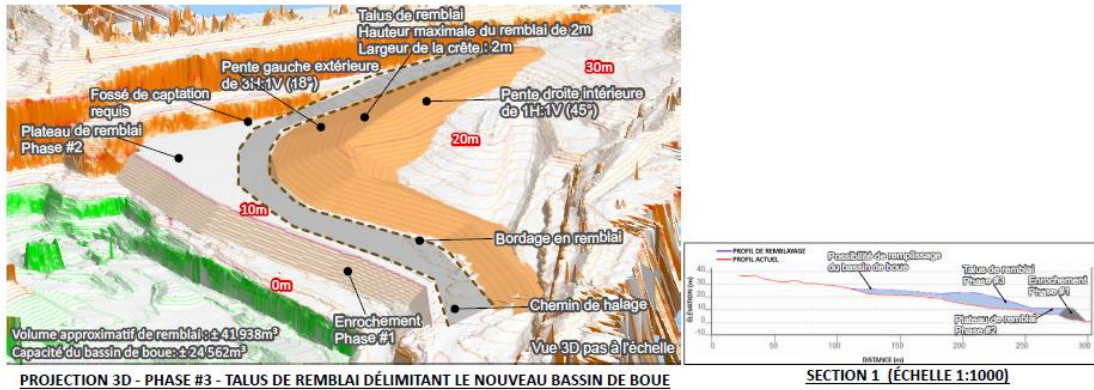


Figure 10 – Analyse de stabilité avant sautage (condition initiale)

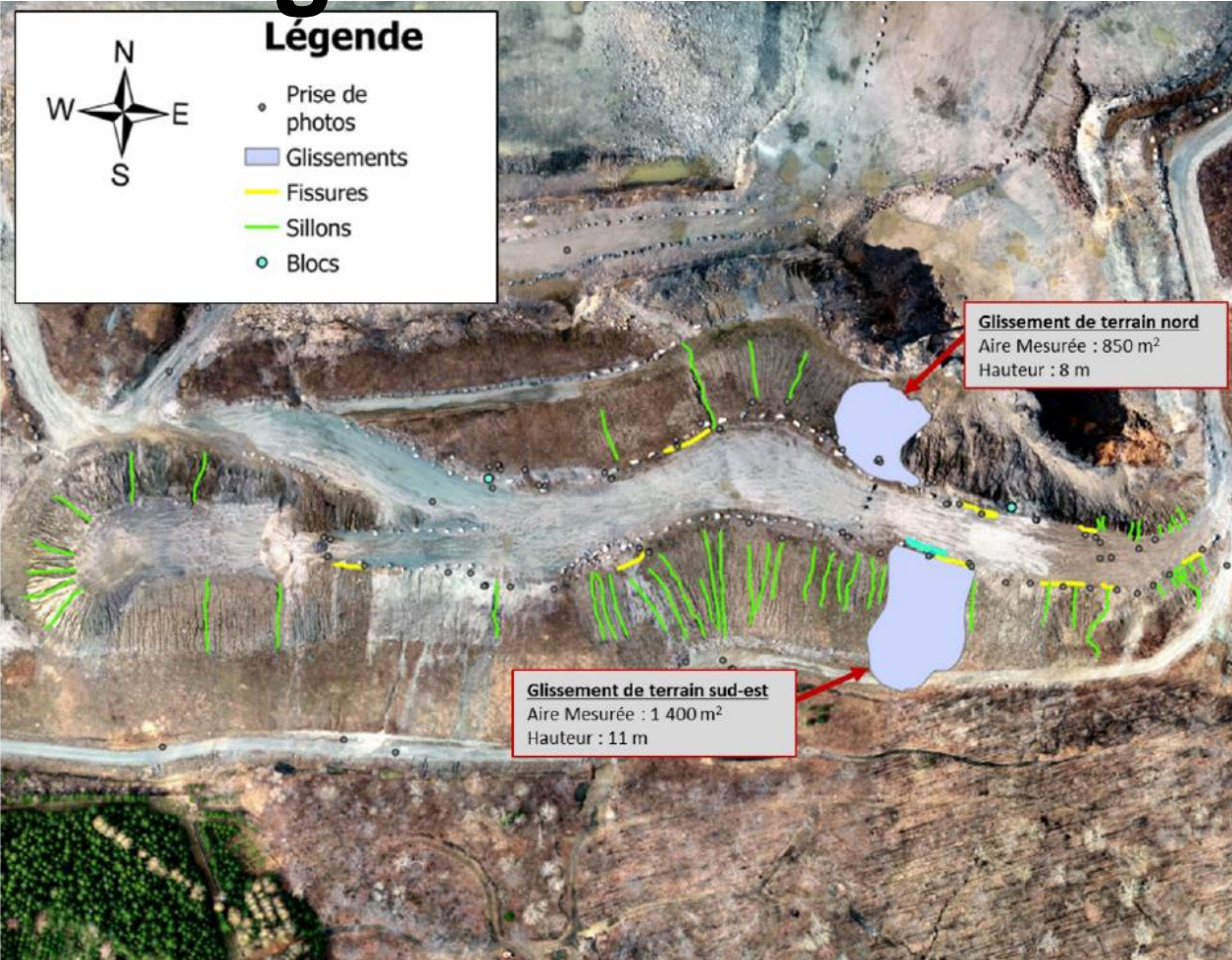
Exigences en matière de conception et de surveillance des ouvrages en remblais



Des constantes de site à jour permettent l'optimisation des tirs et d'être moins conservateur. Pour mieux contrôler les risques de mouvement de sol, les exploitants peuvent:

- Installer des sismographes, ancrés au roc, au pied des piles.
- Installer des sismographes à l'intérieur de la carrière, aux infrastructures permanentes (station de pompage, usine, convoyeur, etc...) pour avoir une variété de données sismiques.
- Effectuer des tirs d'essai ou des tirs à trou signature, lorsque possible.
- Mettre à jour les constantes de site annuellement, selon les secteurs d'exploitation et la géologie en place.

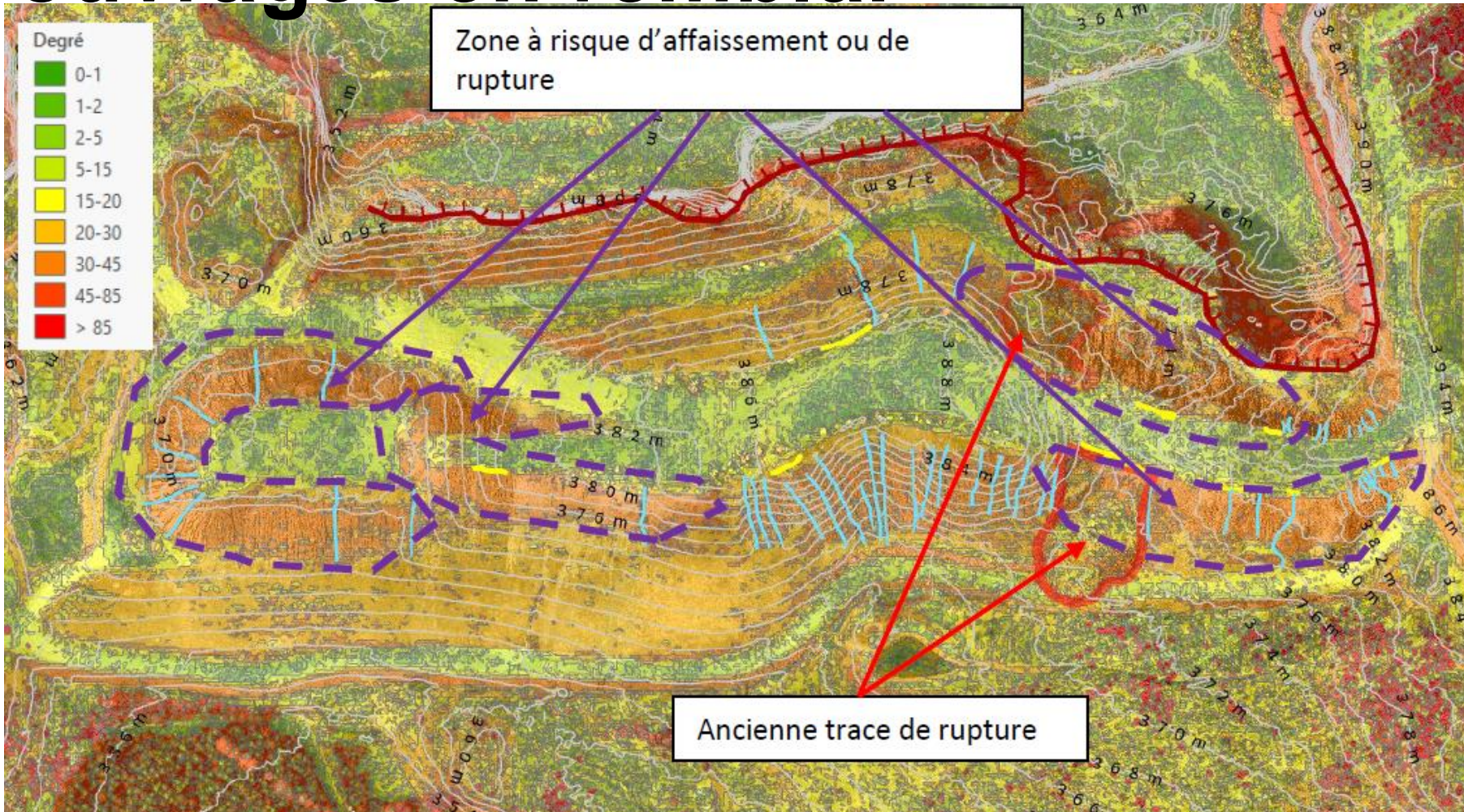
Exigences en matière de conception et de surveillance des ouvrages en remblai



PROCÉDURE DE SUIVI DE DÉFORMATION PAR DRONE

- Selon type d'ouvrage
- Inspection géomorphologique
- Caractérisation géotechnique
- Évaluation des risques
- Fréquence et précision du drone
- Analyse des mouvements de sol

Exigences en matière de conception et de surveillance des ouvrages en remblai



L'analyse de pente montre que pratiquement l'ensemble des crêtes de talus de la zone de dépôts présente des pentes supérieures à 30° voir à certains endroits supérieurs à 45°. Habituellement, dans les remblais et afin d'assurer la stabilité à long terme de l'ouvrage, il est recommandé d'avoir des pentes sous les 22,5°

Projet Mitacs en collaboration avec l'ÉTS

Géoclaste

1. OBJECTIFS DE RECHERCHE

Le but du projet de recherche est de définir un registre de référence empirique et analytique pour divers site à l'étude afin de classifier en catégories de remblai représentatives les différents matériaux d'entreposage. Considérant l'hétérogénéité et la diversité des matériaux, le projet vise à fournir pour un les site à l'étude une perspective empirique et analytiques des propriétés géotechniques selon les plages granulométrique observées. Afin de réaliser le but du projet, les sous-objectifs suivants sont identifiés :

1. Faire une revu de l'ensembles des données géotechniques acquises par Géoclaste au cours des dernières années
2. Définir un programme de caractérisation en fonction de la provenance et du type de matériel hétérogène mis en pile.
3. Différencier de façon opérationnelle et géotechnique des catégories de matériaux d'entreposage.
4. Évaluer l'influence de la teneur en eau des catégories en fonction de la séquence d'entreposage pour fin de conception des piles de remblais.
5. Corréler les propriétés géotechniques de mélange des catégories avec les références scientifiques des mélanges de matériaux granulaires.
6. Déterminer les propriétés et paramètres géotechniques des piles de remblais hétérogènes pour fin d'analyse de stabilité.



ÉCOLE DE
TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE

Université du Québec

Question ?