

Analyse des solutions de confortement

Principes généraux

- Solutions basées sur la conservation de la glace morte :
 - ✓ Techniques actives
 - ✓ Techniques passives
 - ✓ Techniques hybrides
- Solutions basées sur la substitution de la glace morte :
 - ✓ Substitution par excavations
 - ✓ Substitution par jet-grouting
 - ✓ Substitution par fonte contrôlée et injections de compensation
- Solutions basées sur le renforcement des terrains de fondation

Analyse des solutions de confortement

Solutions basées sur la conservation de la glace : Techniques actives

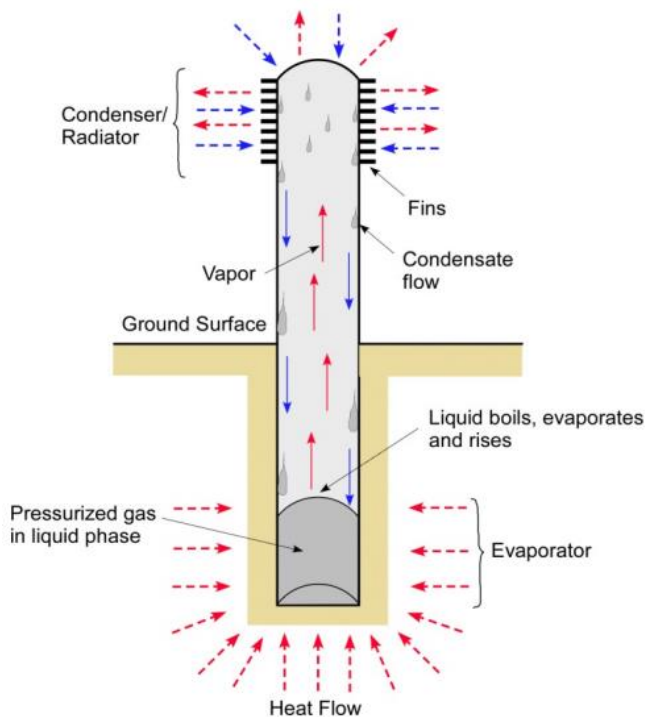
- Extraction de la chaleur du sol de manière contrôlée, en utilisant une source d'énergie externe:
 - ✓ Systèmes à liquides réfrigérés
 - ✓ Systèmes par convection d'air
 - ✓ Systèmes par évaporateurs

Avantages	Contraintes / inconvénients
• Contrôle précis permettant de réguler la température et la puissance frigorifique selon les besoins. • Fonctionne même si la température extérieure est supérieure à 0 °C. • Congélation rapide, applicable pour les interventions urgentes, pour des sols très perméables. • Dispositif adaptable, convient à des ouvrages complexes et à des environnements variés.	• Coût élevé pour l'installation et le fonctionnement du dispositif. • Consommation énergétique importantes en fonctionnement continu. • Maintenance complexe nécessitant une surveillance permanente et des interventions régulières. • Installation lourde nécessitant des équipements volumineux. • Impact environnemental important et utilisation de fluides frigorigènes potentiellement à risques de pollution.

Analyse des solutions de confortement

Solutions basées sur la conservation de la glace : Techniques passives

- Thermosiphons



Avantages	Contraintes / inconvénients
- Autonomie complète : fonctionnement sans apport d'énergie externe. - Fiabilité élevée : durée de vie importante nécessitant relativement peu de maintenance. - Coût d'exploitation relativement faible en l'absence de consommation énergétique. - Adapté aux zones isolées. - Retour d'expérience disponible sur des contextes de permafrost	- Système ne fonctionne que dans certaines configurations ($Temp\ air < Temp\ sol$) - Efficacité limitée / insuffisante par rapport aux systèmes actifs - Systèmes non pilotables - Incertitude sur le long terme (ajustement nécessaire selon l'évolution du climat et/ou la réaction du massif encaissant)

Analyse des solutions de confortement

Solutions basées sur la conservation de la glace : Techniques hybrides

- Combinent des dispositifs passifs avec des éléments actifs pour renforcer le refroidissement en cas de besoin



Analyse des solutions de confortement

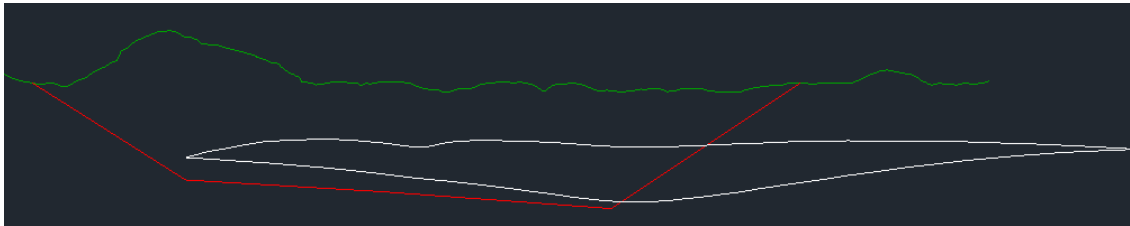
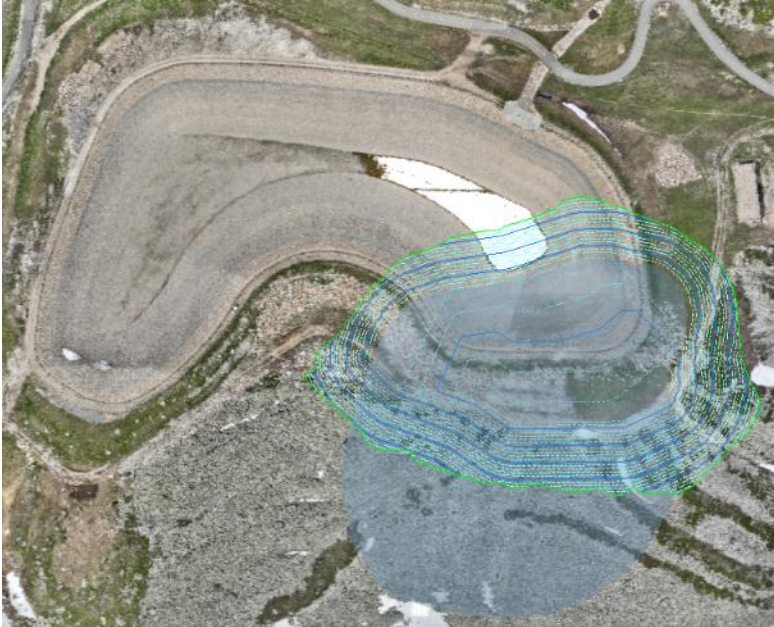
Solutions basées sur la conservation de la glace : Synthèse

Pas de solutions permettant d'assurer un niveau de sûreté satisfaisant avec des moyens cohérents par rapport aux enjeux du projet :

- **Les systèmes actifs de refroidissement**
 - ✓ moyens importants, tant en termes d'installation que de maintenance
 - ✓ impacts environnementaux significatifs.
- **Les systèmes passifs de refroidissement**
 - ✓ Absence de contrôle actif et efficacité limitée/insuffisante au regard du climat du col de la Loze.
 - ✓ Incertitudes sur le long terme.
- **Les systèmes hybrides de refroidissement**
 - ✓ Cumulent les avantages mais aussi les inconvénients des deux solutions précédentes.
 - ✓ Insuffisant pour assurer un maintien de la congélation avec des moyens limités ou nécessiteraient des moyens lourds aux désagréments équivalents à ceux des systèmes actifs.

Analyse des solutions de confortement

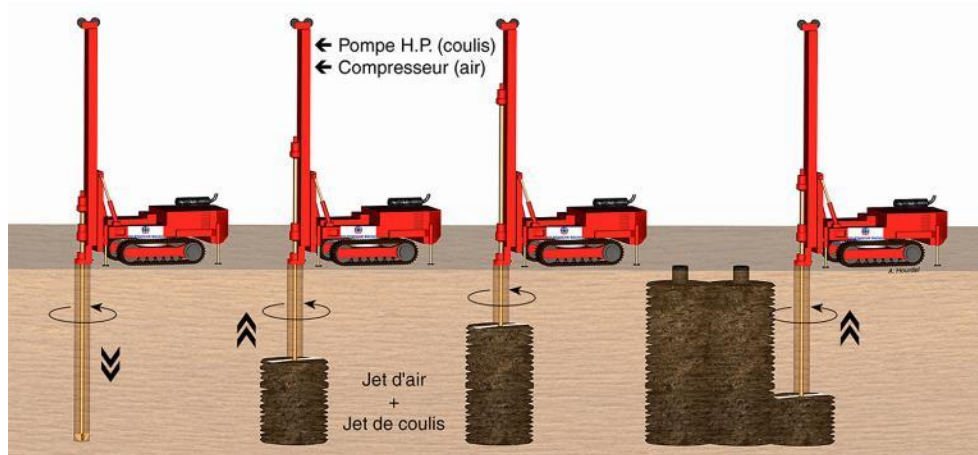
Solutions basées sur la substitution de la glace : Substitution par excavations



Avantages	Contraintes / inconvénients
Suppression complète des horizons de glace.	- Volumes de matériaux terrassés très significatifs, impliquant de fortes contraintes sur la gestion des déblais, leur stockage, ... - Difficultés pour l'identification des horizons gelés, nécessitant possiblement la réalisation de terrassements jusqu'au substratum rocheux. - Impacts probables de ces terrassements sur les remblais existants et le glacier situé à l'aval, non maîtrisés à ce stade. - Impacts environnementaux importants avec la réalisation de terrassements sur de large emprises et à des profondeurs importantes. - Impacts paysagers significatifs.

Analyse des solutions de confortement

Solutions basées sur la substitution de la glace : Substitution par jet-Grouting



[Soletanche Bachy]

Avantages	Contraintes / inconvénients
• Emprises impactées limitées par rapport à la solution d'excavation	• Travaux préparatoires potentiellement significatifs (préparation de plateforme, ...). • Incertitudes sur l'efficacité de la technique dans ce type de contextes (diamètres des colonnes potentiellement réduits ...). • Logistique lourde pour la gestion de la coactivité des nombreux nécessaires, pour les installations de traitement des spoils, ... • Risques importants de décalage du planning de travaux. • Risques de pertes de colis importantes au vu de l'hétérogénéité des éboulis constituant les glaciers rocheux. Enjeux environnementaux critiques associés. • Incertitudes sur la complétude du traitement, limitant la fiabilité de la solution vis-à-vis des enjeux de sureté. • Impacts des injections sur l'accélération de la fonte du glacier situé à l'aval par la réaction exothermique de la prise du coulis.

Analyse des solutions de confortement

Solutions basées sur la substitution de la glace : Substitution par fonte contrôlée et injections de compensation

- Réalisation préalable d'un maillage de forages, dans lesquels soit :
 - ✓ est injecté de l'eau chaude ou de la vapeur sous pression ;
 - ✓ circule un fluide ou de la vapeur.

Avantages	Contraintes / inconvénients
• Suppression complète des horizons de glace • Emprises impactées limitées par rapport à la solution d'excavation	• Epaisseurs de glaces importantes posant de réelles interrogations sur la faisabilité du maintien des dispositifs durant toute la phase de fonte. • Incertitudes sur les durées nécessaires à l'obtention d'une fonte complète de la glace, impliquant un risque pour la gestion du planning important. • Difficulté pour la vérification de la complétude de la fonte. • Moyens techniques lourds et consommation importante attendue. • Difficulté de réalisation des injections dans un contexte d'éboulis remaniés à la suite de la fonte, avec des risques importants de pertes de coulis. • Gestion des impacts environnementaux difficile (acceptabilité de la solution).

Analyse des solutions de confortement

Solutions basées sur la substitution de la glace : Synthèse

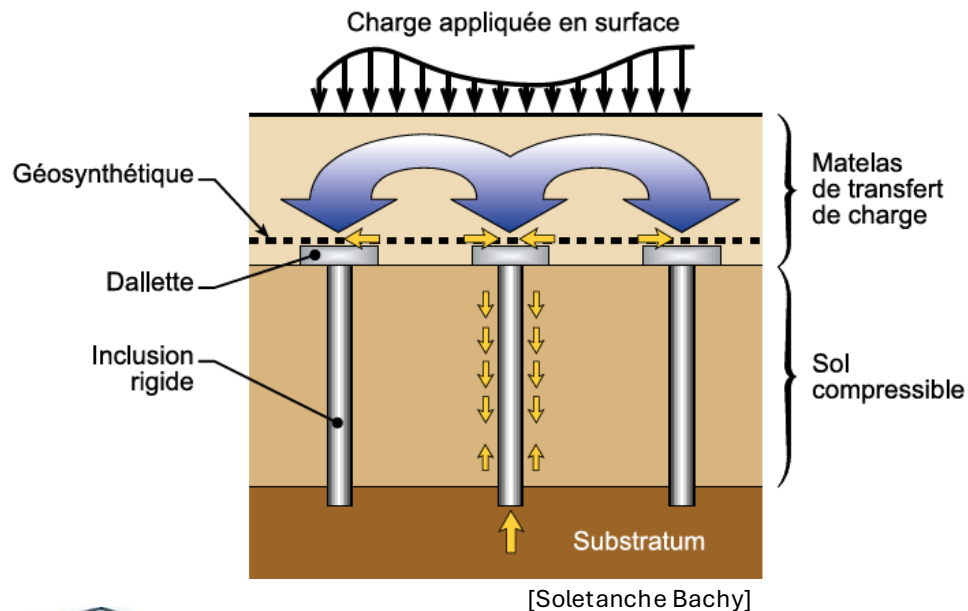
Pas de solutions permettant d'assurer un niveau de sûreté satisfaisant avec des moyens cohérents par rapport aux enjeux du projet :

- **La solution de substitution par excavation**
 - ✓ moyens et des impacts importants
 - ✓ enjeux importants en termes de gestion des déblais et des aspects environnementaux.
- **La solution de substitution par jet-grouting**
 - ✓ incertitudes importantes relatives à l'efficacité de cette technique dans le contexte.
 - ✓ risques importants sur la maîtrise du planning de travaux.
 - ✓ aspects environnementaux.
- **La solution de substitution par fonte contrôlée et injection**
 - ✓ volume de glace très significatif / maintien des dispositifs durant le processus,
 - ✓ énergie temps nécessaire pour atteindre une fonte totale
 - ✓ acceptabilité environnementale.

Analyse des solutions de confortement

Solutions basées sur le renforcement des terrains de fondation

- Mise en œuvre de **renforcements de sols** (inclusions rigides) répartis sous l'ouvrage, visant à reporter les efforts transmis par le réservoir directement au substratum.
- Nécessitent la mise en œuvre d'un **matelas de répartition**
- **Fort risque** de développement de **vides importants**



Avantages	Contraintes / inconvénients
• Pas de substitution totale de la glace morte • Emprise limitée par rapport aux solutions d'excavation • Flexibilité du maillage pour adapter au moyen aux besoins de renforcement	• Génération de vides sous le matelas de répartition • Moyens techniques lourds et consommation importante attendue. • Difficulté de réalisation des injections dans un contexte d'éboulis remaniés à la suite de la fonte, avec des risques importants de pertes de coulis. • Gestion des impacts environnementaux difficile (acceptabilité de la solution).