



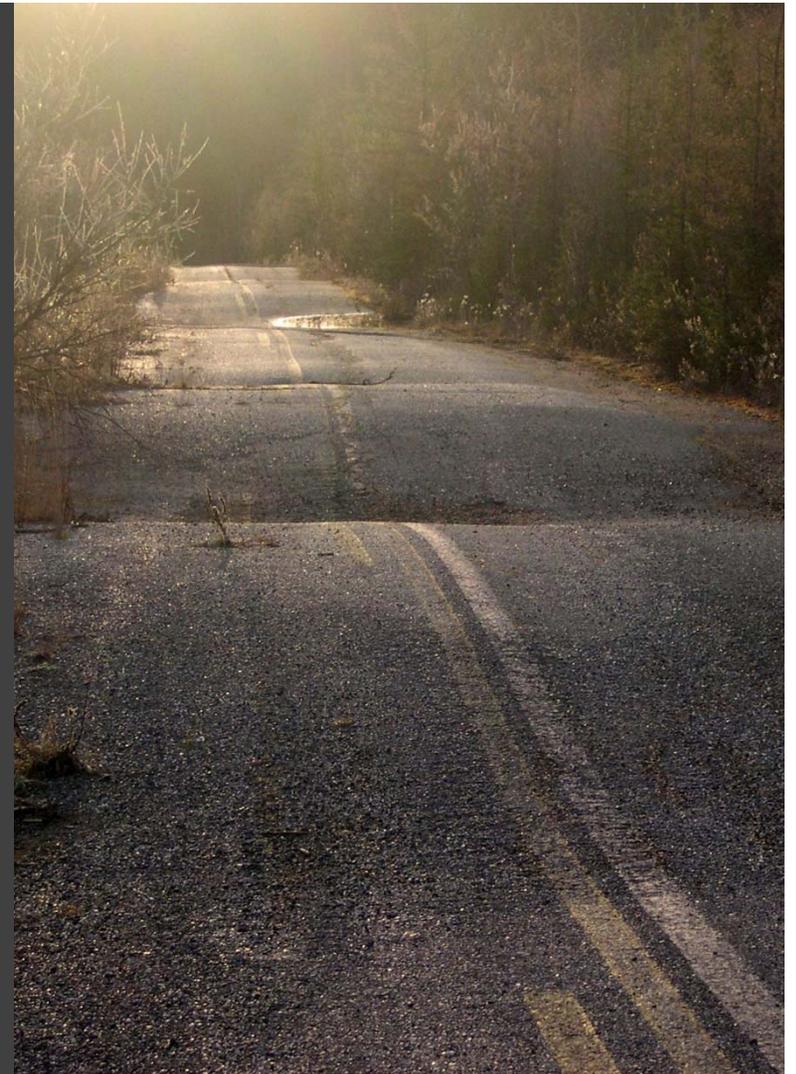
PROJETS NORDIQUES

Stabilisation thermique des remblais construits
sur pergélisol sensible au dégel



Guy Doré et son équipe

Département de génie civil et de génie des eaux
et Centre d'études nordiques



Tassements différentiels



Rotation des épaulements ou tassement en pied de remblai



Objectifs des projets nordiques

1. Améliorer la compréhension des processus en cause dans la dégradation du pergélisol

- Glissements rétroactifs au dégel
- Évasement des remblais
- Gestion du drainage

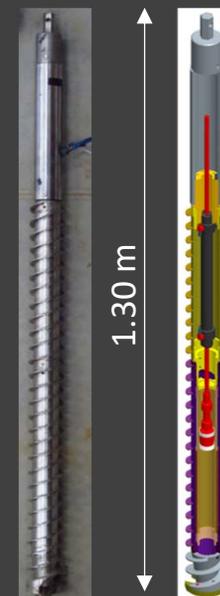
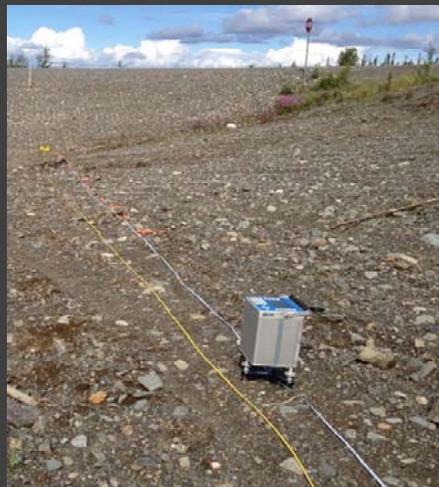
→ Développement de paramètres d'ingénierie

ex: quantité d'eau admissible (fossé, ponceau) afin d'éviter le transfert de chaleur vers le pergélisol et l'érosion des sols



2. Améliorer la capacité à investiguer le pergélisol sensible au dégel

- Gravimétrie
- Profilométrie
- Carottier



→ Développement d'outils et méthodes d'investigation

3. Développer des solutions favorisant la stabilisation thermique des remblais construits sur pergélisol sensible au dégel
 - Outil d'analyse du risque pour les infrastructures linéaires existantes et à concevoir

La stabilisation thermique implique de contrôler le bilan de chaleur à travers l'interface remblai-sol naturel

- Limiter la chaleur entrant dans le sol:
 - isolation
 - abris soleil/neige
 - surface à albédo élevé**
 - gestion du drainage



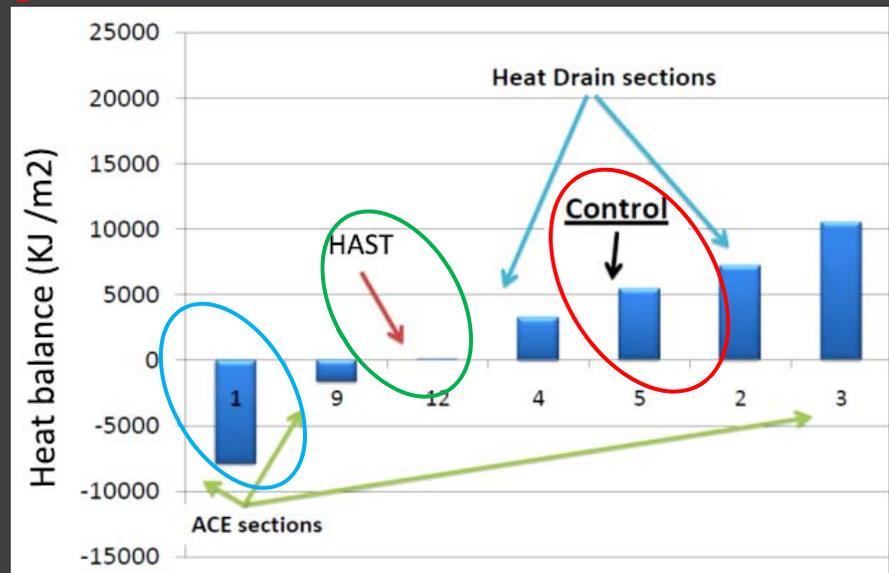
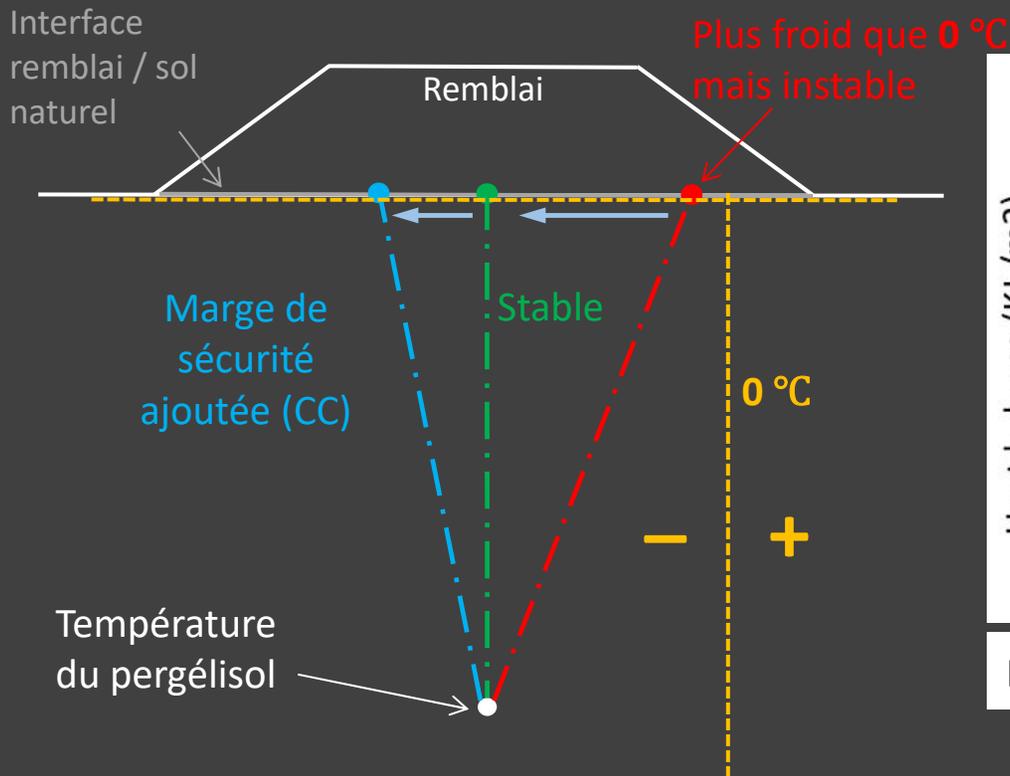
3. Développer des solutions favorisant la stabilisation thermique des remblais construits sur pergélisol sensible au dégel

La stabilisation thermique implique de contrôler le bilan de chaleur à travers l'interface remblai-sol naturel

- Extraction de chaleur du sol:
 - drain thermique
 - pente douce
 - systèmes à conduit d'air
 - remblai à convection d'air (ACE)
 - thermosiphons



Stabilisation thermique - Principe



$$\text{Heat balance} = H_i + H_x; H_x = k_{unfrozen} \times \frac{\partial T}{\partial z} \times \Delta t; H_i = k_{frozen} \times \frac{\partial T}{\partial z} \times \Delta t$$

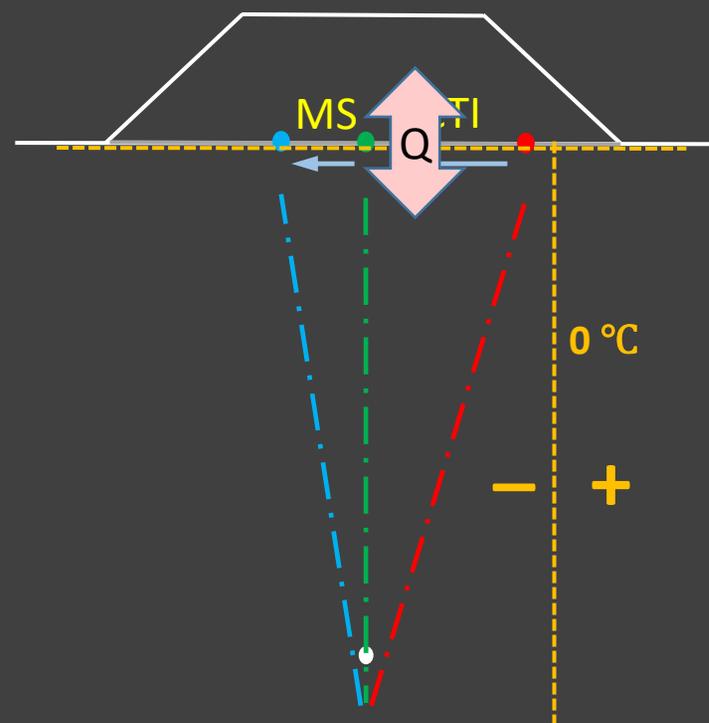
Sections d'essais, Alaska Highway, Yukon

Approche CTI - correction de la température à l'interface

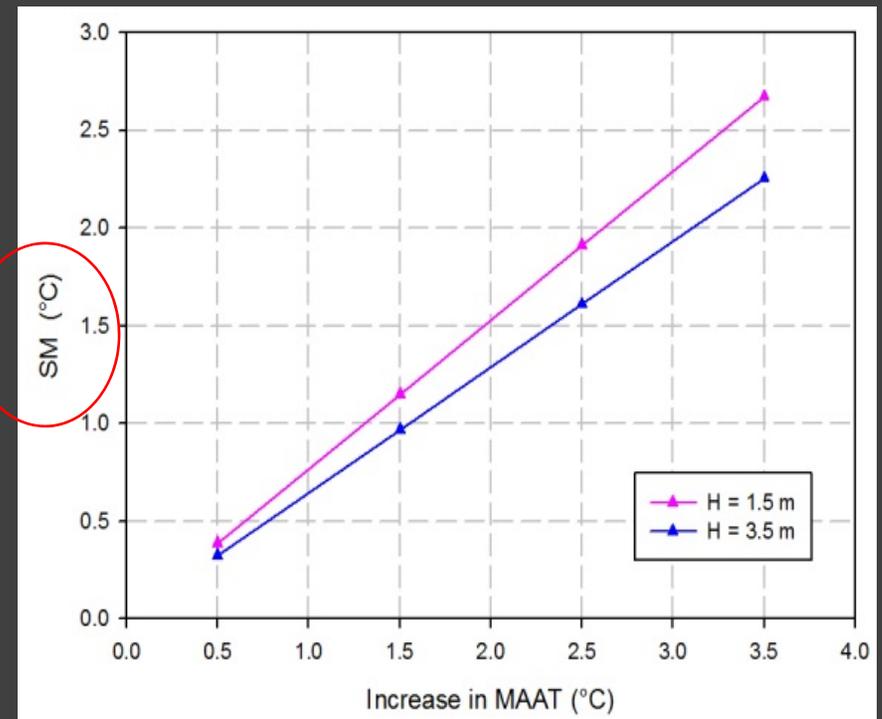
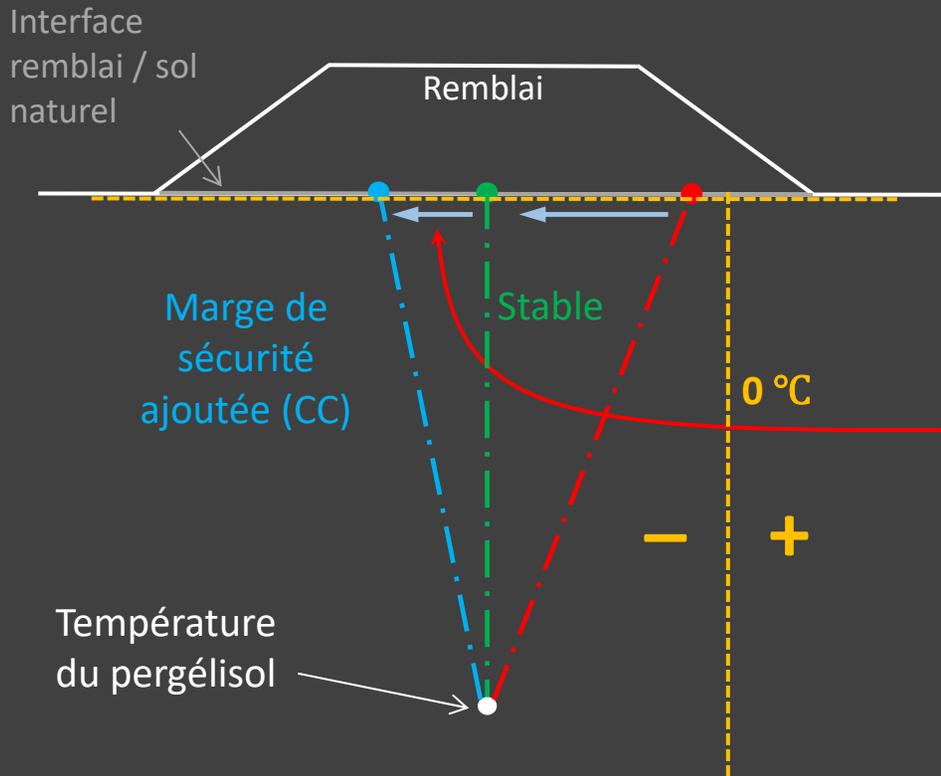
- CTI requise déterminée selon les conditions du site et les changements climatiques attendus
- CTI utilisée pour modifier les paramètres de conception pertinents basés sur une relation empirique

Approche du bilan thermique

- Bilan thermique déterminé en fonction des conditions du site
- Si bilan positif, technique de stabilisation conçue en fonction de la capacité d'extraction de chaleur

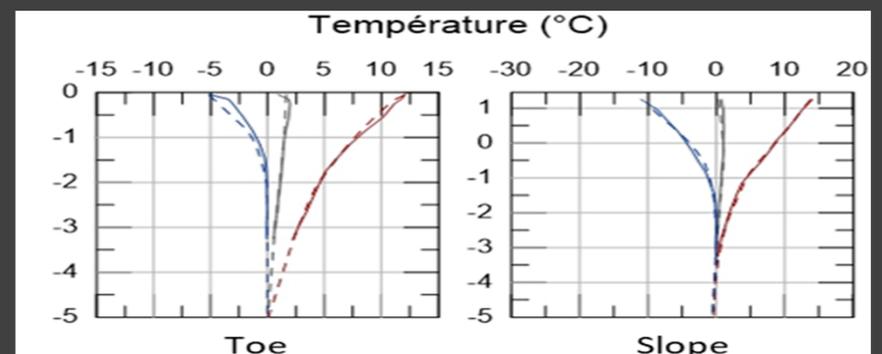
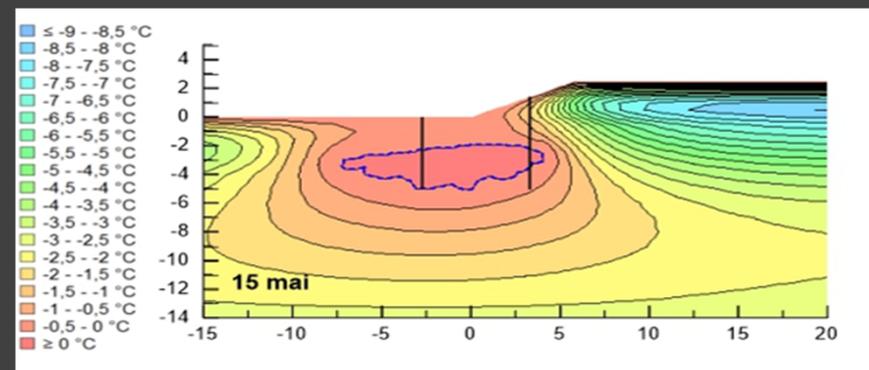


Considération du réchauffement climatique



Approche générale du développement des outils de conception

- Utilisation de logiciels de méthode d'éléments finis
 - TEMP/W
 - SV Heat + SV Air
- Modèles calibrés avec les données de sections d'essai
- Modèles utilisés pour développer des abaques et équations de conception
- Outils de conception validés avec d'autres sites d'essai

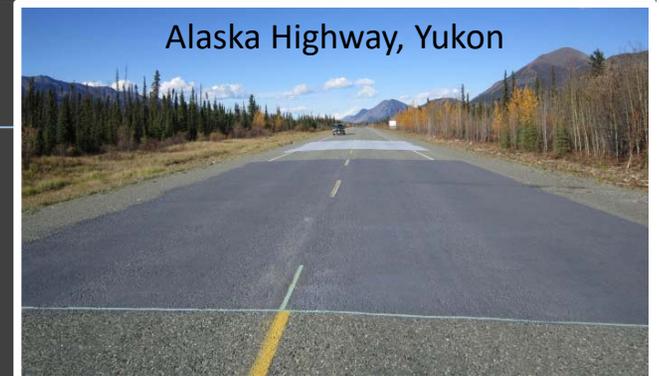


Surface à albédo élevé



Surface à albédo élevé

- Revêtement appliqué sur enrobé ou traitement de surface (BST)
- BST avec agrégats de couleur claire
- Enrobé de couleur clair

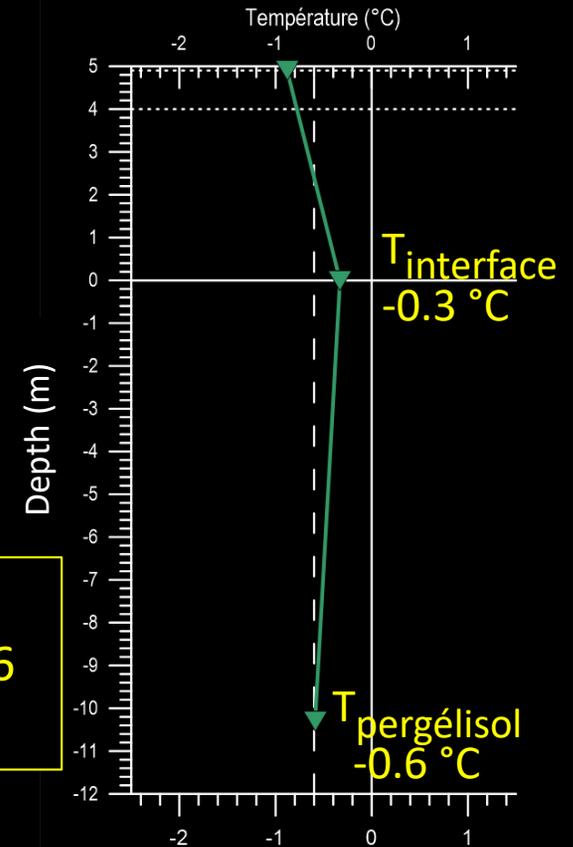
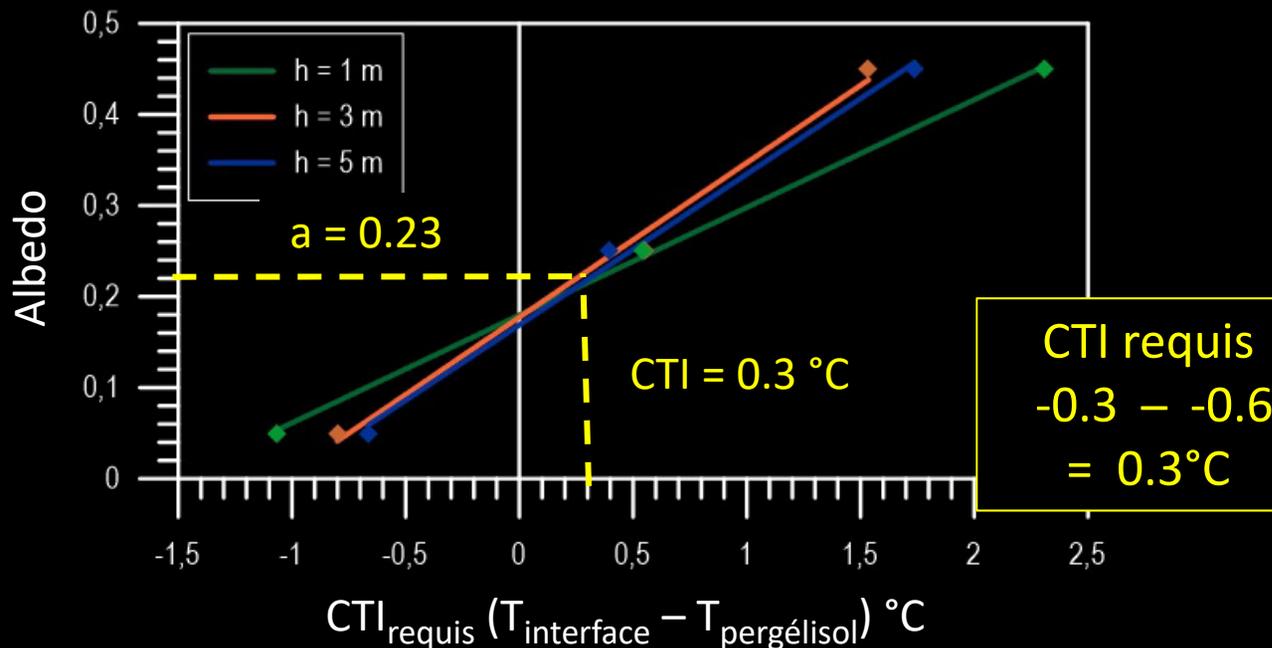


Dawson City, Yukon
(Colas Canada)

Modèle thermique - Abaque de conception

Albédo de surface requis pour la stabilisation thermique d'une chaussée revêtue en fonction de

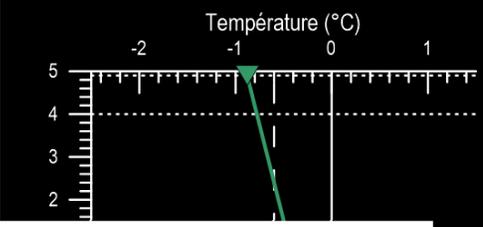
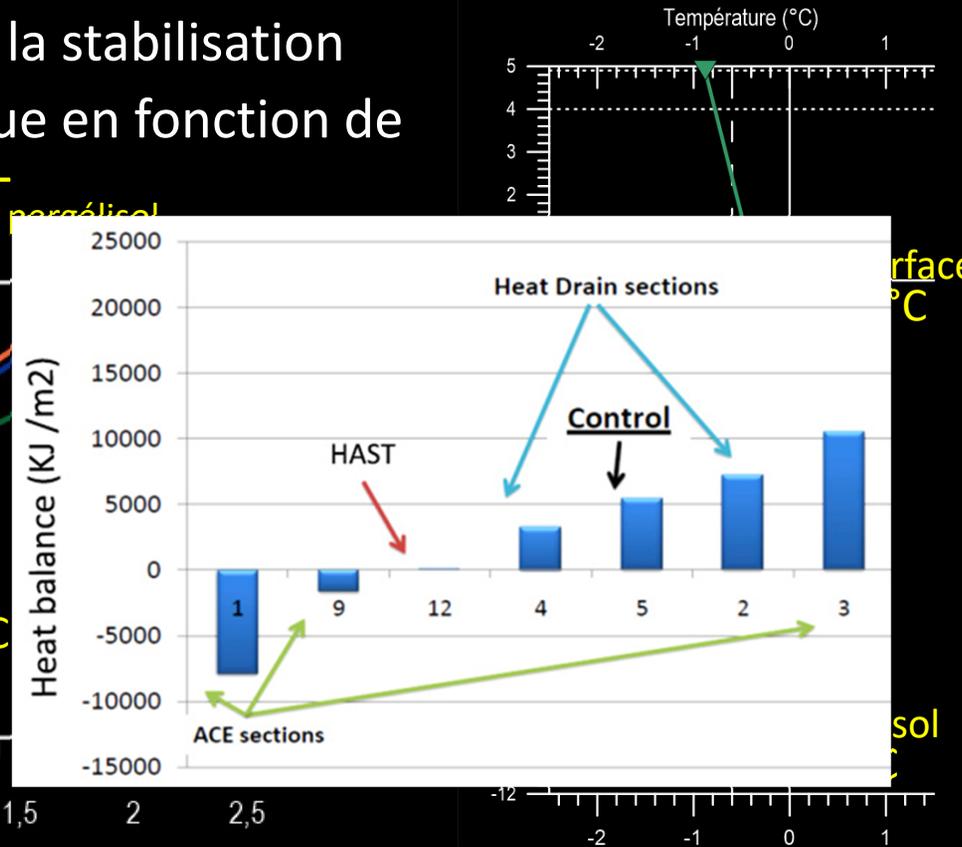
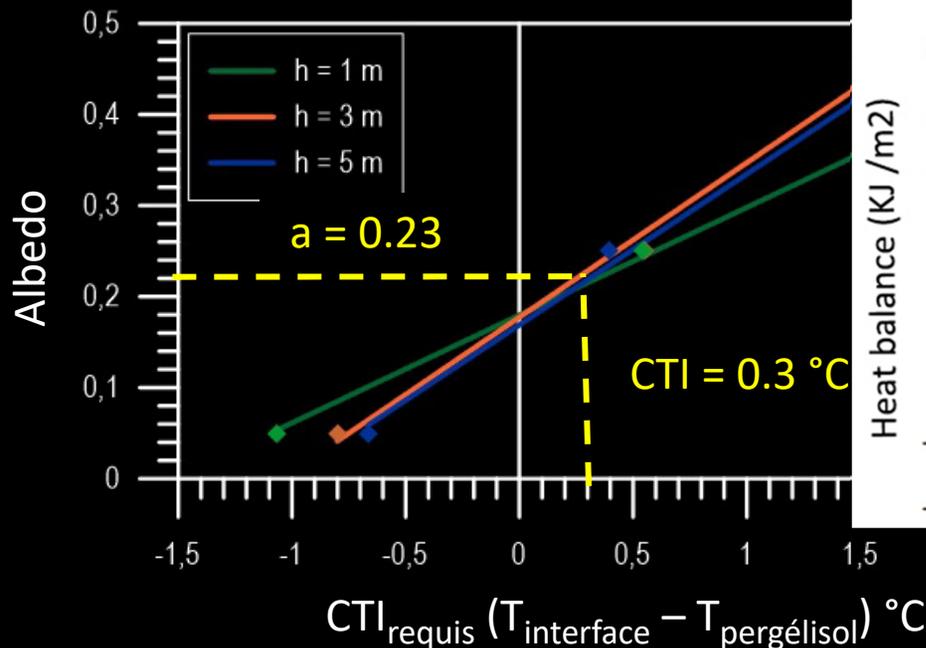
$$\text{CTI requis} = T_{\text{interface}} - T_{\text{pergélisol}}$$



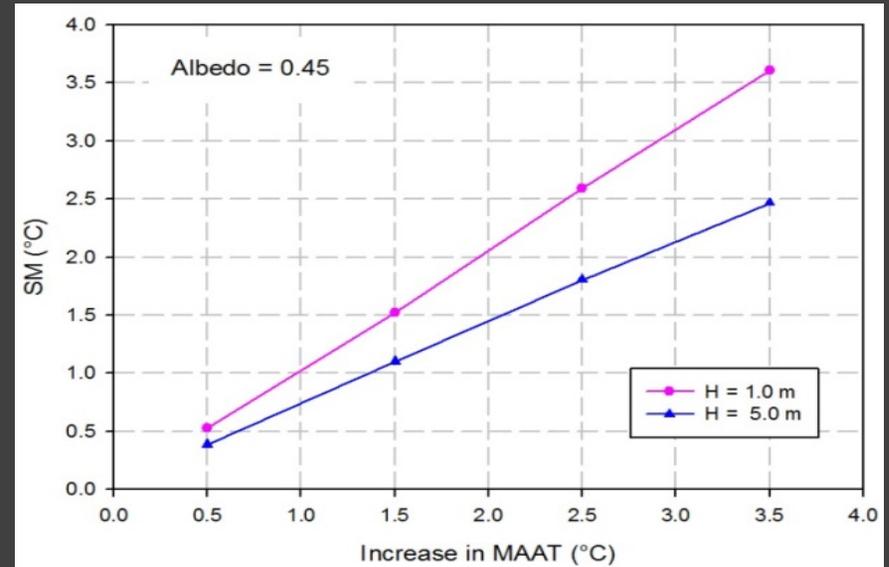
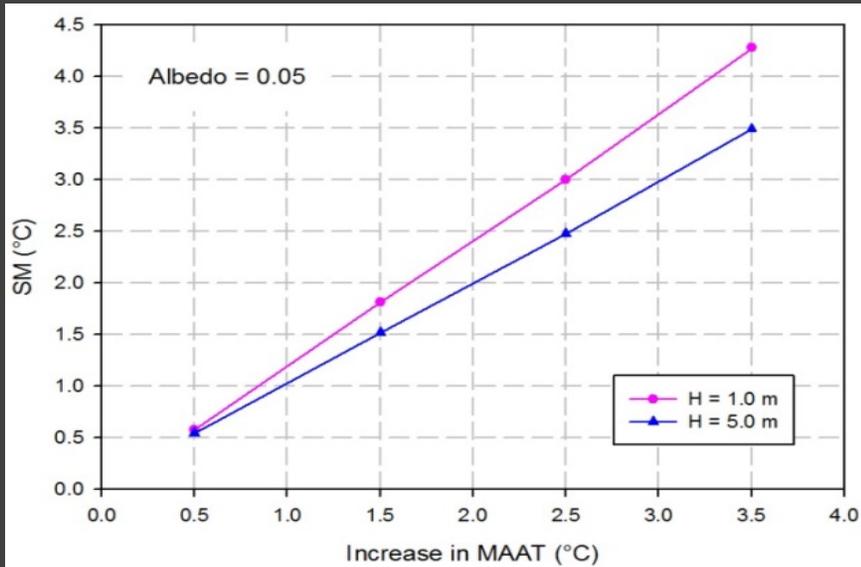
Modèle thermique - Abaque de conception

Albédo de surface requis pour la stabilisation thermique d'une chaussée revêtue en fonction de

$$CTI_{requis} = T_{interface} - T_{pergélisol}$$



Modèle thermique - Abaque de conception



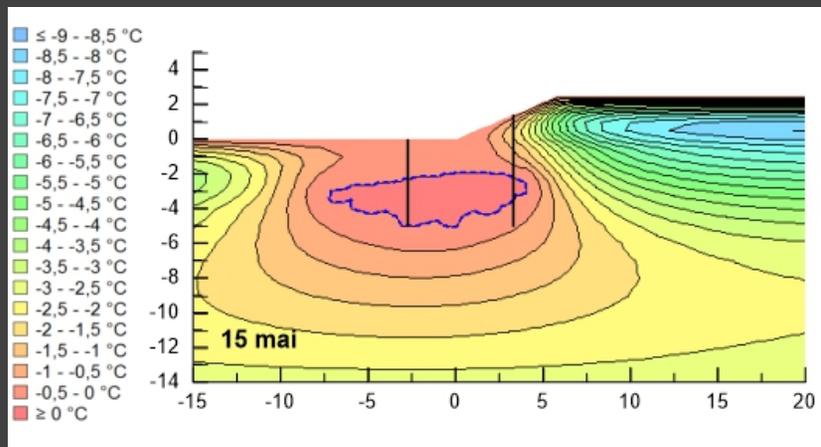
Approche - Correction de la température à l'interface

Pente douce



Accumulation sur pentes du remblai

- Problème pour les remblais affectés par des vents latéraux
- L'accumulation de neige limite l'extraction de chaleur pendant hiver
- Peut atténuer en modifiant géométrie du remblai : angle de la pente



Tasiujaq, 2019 (Emmanuel L'Hérault)

Abaque de conception

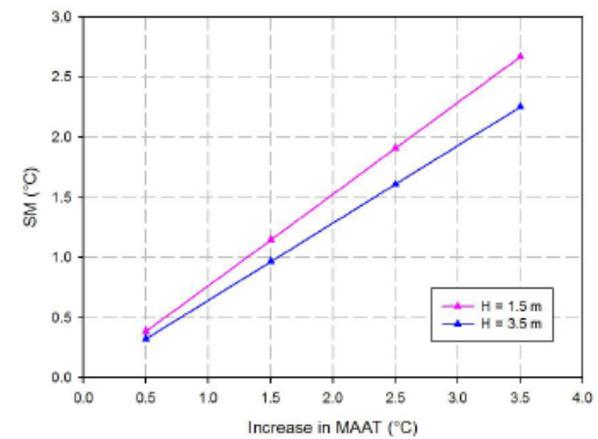
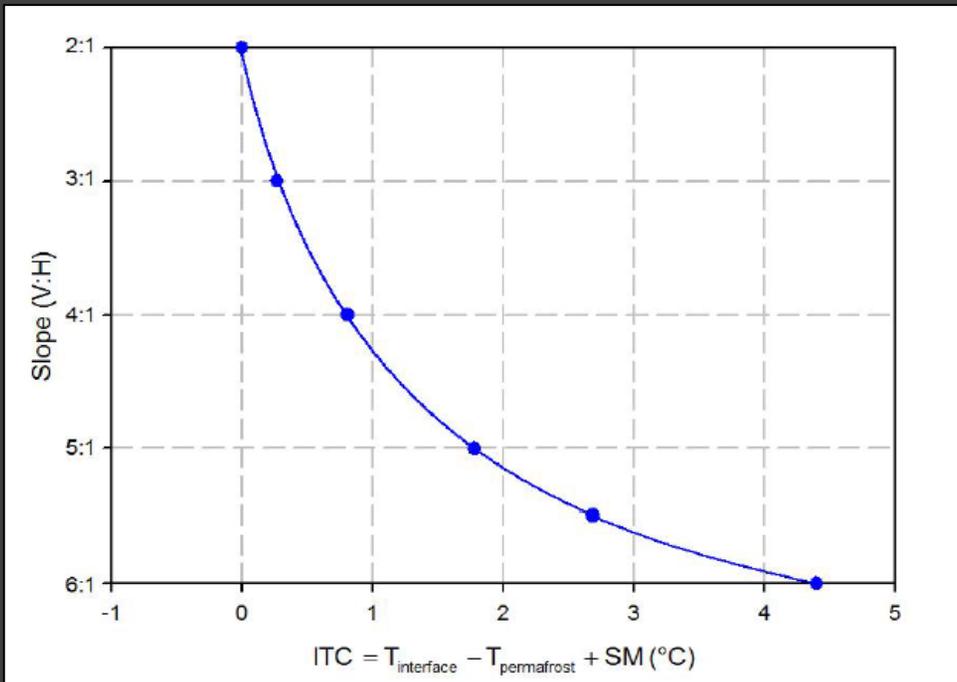
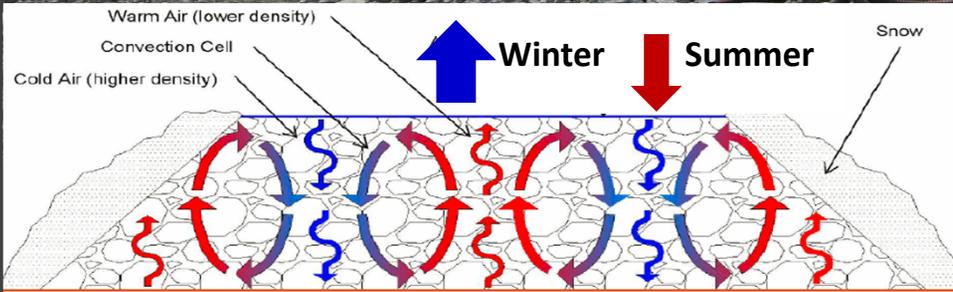


Fig. 5. SM (safety margin) as a function of the increase in mean annual air temperature (MAAT).

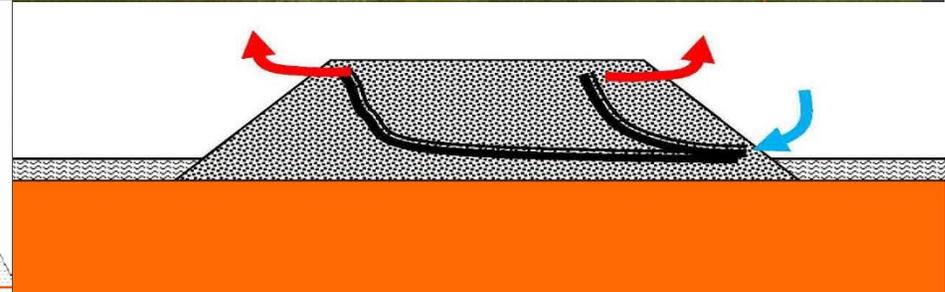
Techniques de mitigation à convection d'air

ACE - Remblai à convection d'air



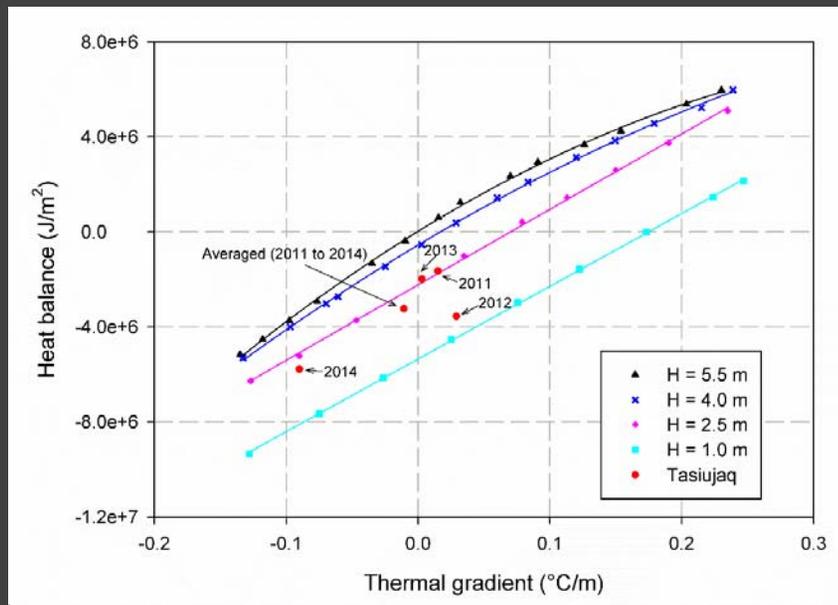
Alaska Highway, Yukon

Drain thermique

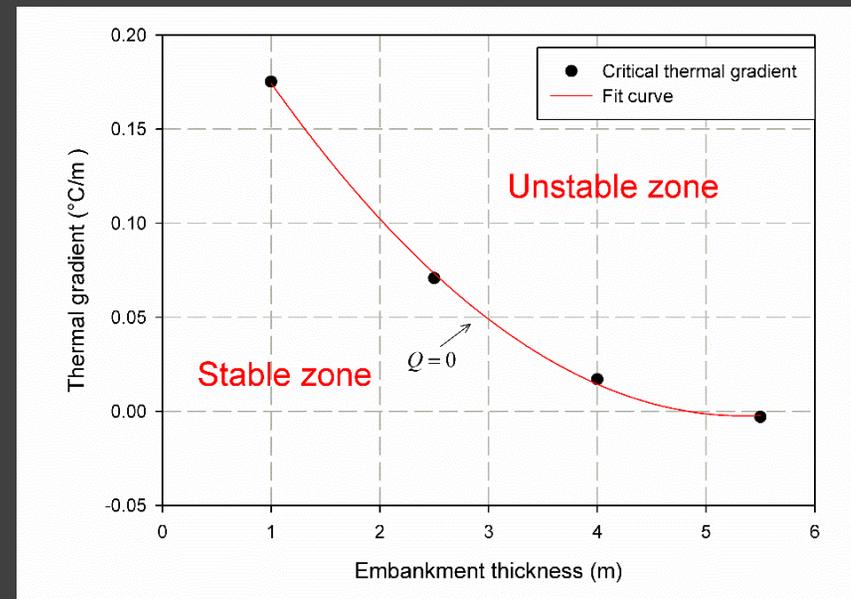


Tasiujaq, Nunavik

Étape 1: Estimation du bilan thermique (remblai sans adaptation)



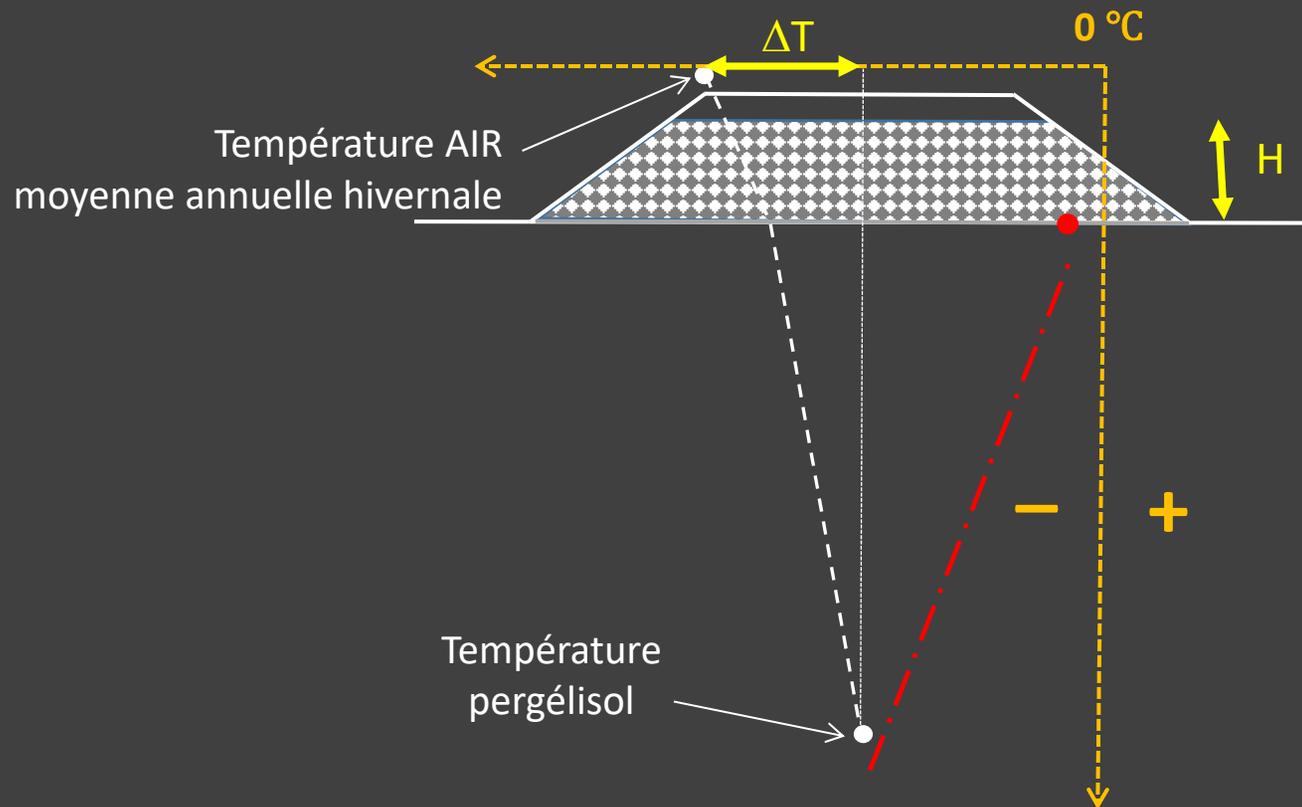
Abaque du bilan thermique
(élaboré à partir des données de Beaver Creek
et validé à l'aide des données de Tasiujaq)



Évaluation de la stabilité

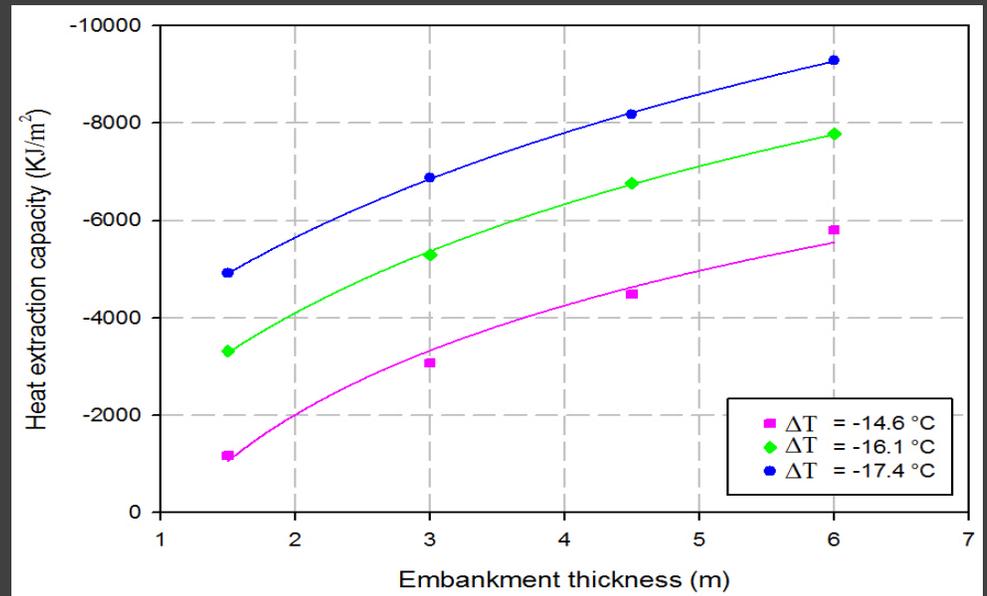
Étape 2: Capacité d'extraction de chaleur des techniques convectives

Principe



Étape 2: Capacité d'extraction de chaleur

ACE - pentes

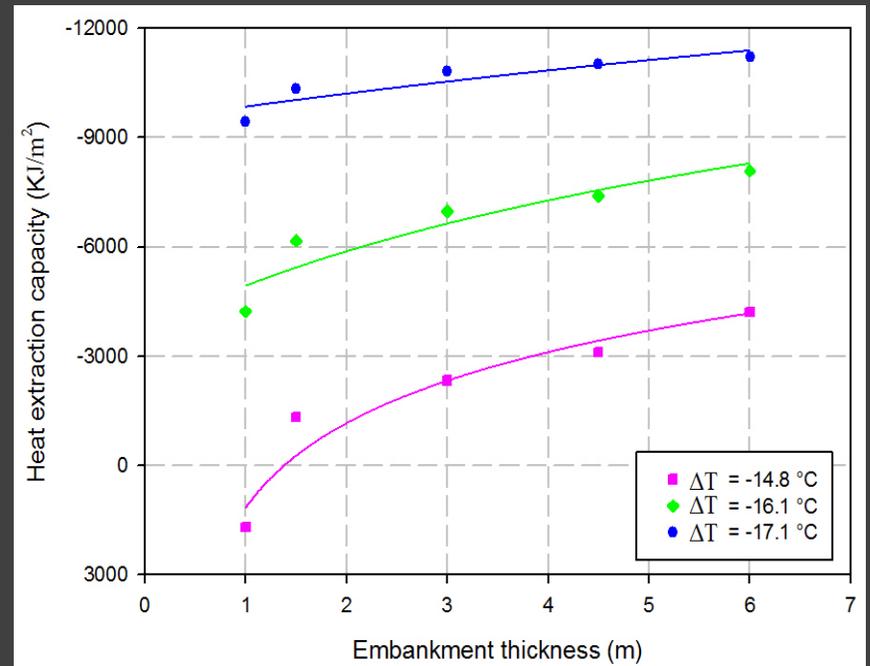


Étape 2: Capacité d'extraction de chaleur

ACE – pleine largeur

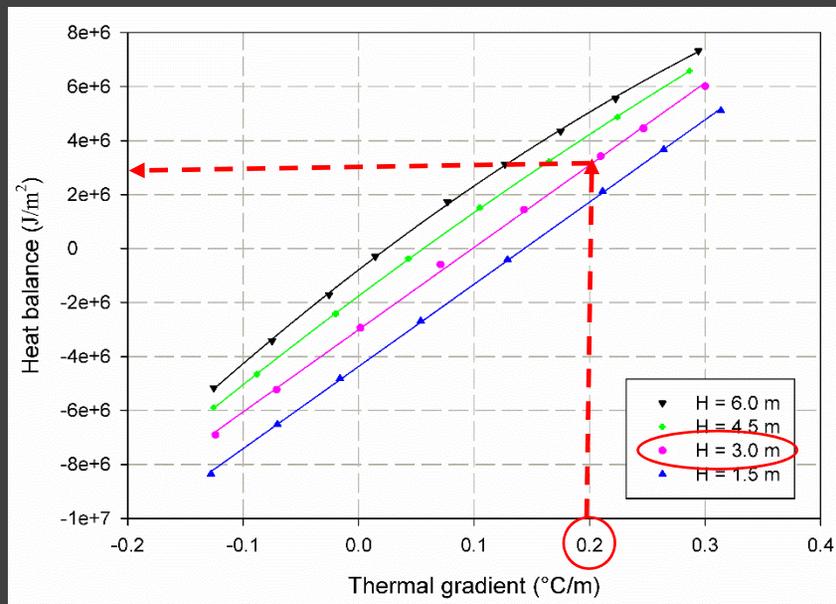


Beaver Creek, Yukon

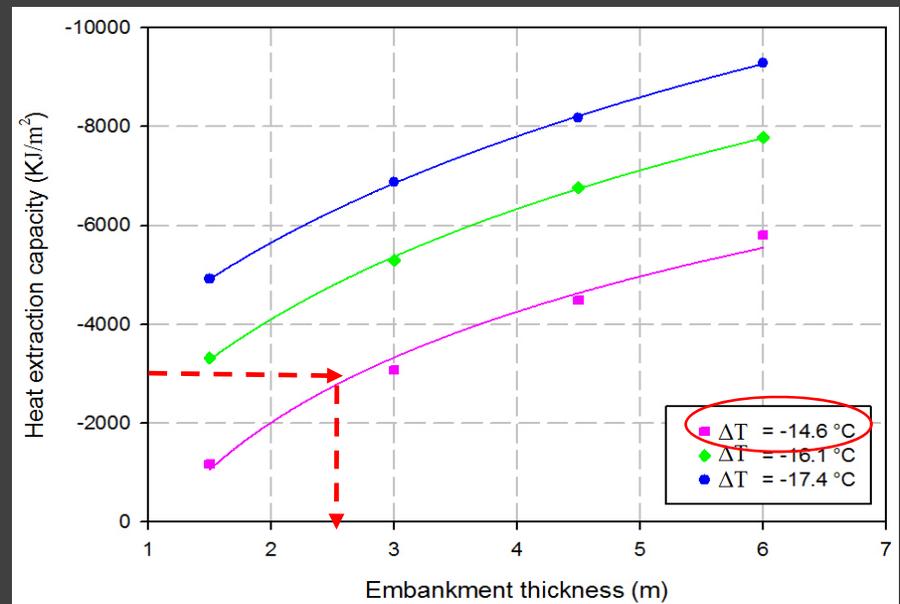


Exemple d'application - ACE

- Évaluation thermique sous la pente pour un remblai de 3 m d'épaisseur
- Gradient thermique : $0,2 \text{ } ^\circ\text{C/m}$
- Température du pergélisol – TMAHA (ΔT) = $-15 \text{ } ^\circ\text{C}$



Remblai conventionnel



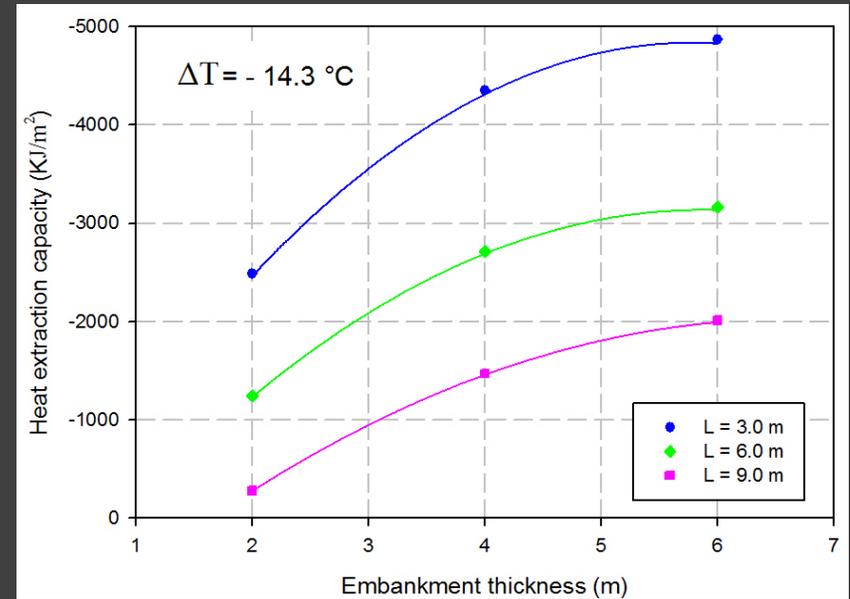
ACE - pente

Étape 2: Capacité d'extraction de chaleur

Drain thermique



Salluit, Nunavik



Conclusion

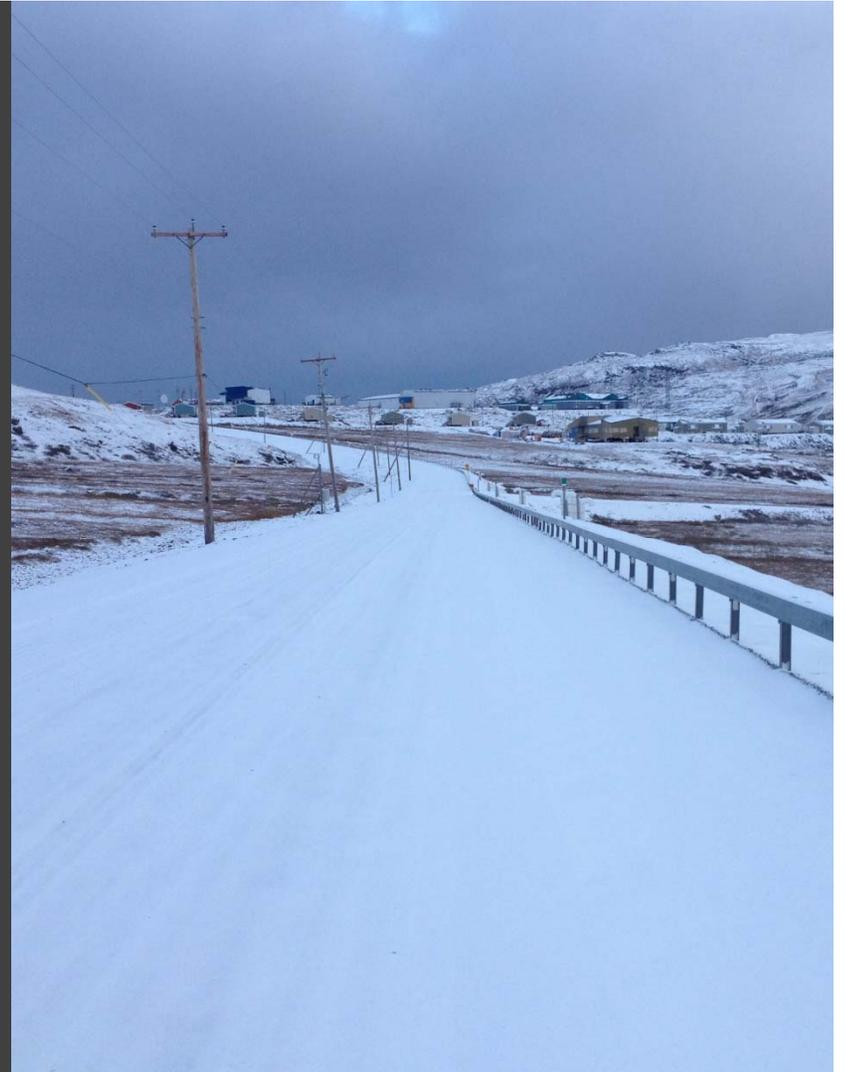
- Développement d'une procédure de conception simple mais efficace pour la stabilisation thermique des remblais construits sur un pergélisol sensible au dégel
- Conception optimisée en fonction du gradient thermique ou du bilan thermique des sols sous les remblais
- Plusieurs techniques de stabilisation envisagées
- Méthode pas encore robuste: plus de sites sont nécessaires pour valider la méthode
- Limitations: Advection (eau et vent) non prise en compte



Chaire de recherche Sentinelle Nord sur les infrastructures nordiques



Guy Doré et son équipe
Département de génie civil et de génie des eaux
et Centre d'études nordiques



Chaire de recherche Sentinelle Nord - infrastructures nordiques



THÈME PRINCIPAL

Le déploiement d'infrastructures résilientes et durables pour le développement social et économique du nord

BÉNÉFICES

- Expertise, capacité de recherche et programme de formation spécialisé
- Formation d'ingénieurs hautement spécialisés
- Technologies de pointe



PARTENAIRES

**Société
du Plan Nord**

Québec 

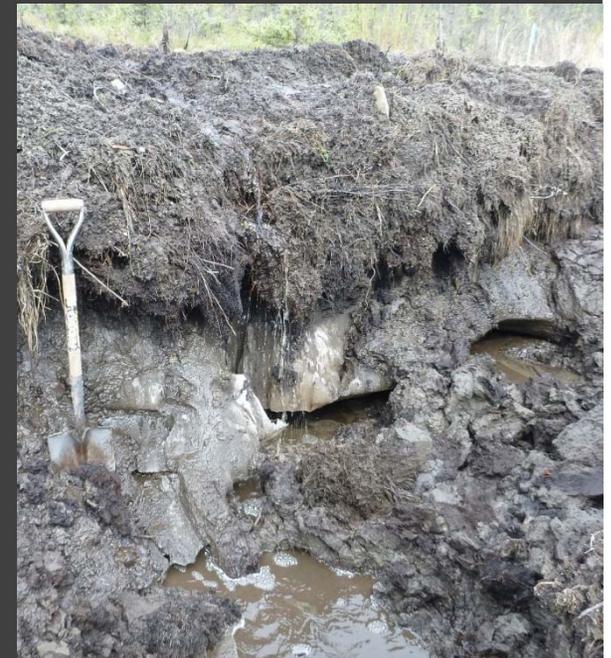
 **Hydro
Québec**

Transports

Québec 

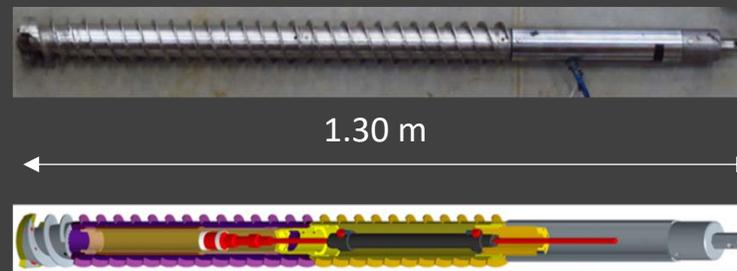
PROJETS

1. Poursuite du développement d'une méthode de conception des remblais routiers et aéroportuaires construits sur pergélisol (conception thermique et mécanique)
2. Adaptation des infrastructures de transports nordiques aux changements climatiques
3. Développement de systèmes avancés de monitoring et d'alerte pour la gestion des infrastructures nordiques



Projets

4. Développement de revêtements adaptés à la construction en régions nordiques
5. Développement des outils de gestion du risque
6. Caractérisation des propriétés mécaniques des sols gelés et en processus de dégel



VOLET 2 - Soutien au développement des régions et des ressources naturelles

Projets

1. Chemins d'accès aux ressources
2. Gestion du risque et routes d'accès aux ressources
3. Chaussées aéroportuaires en gravier en régions éloignées
4. Infrastructures de communication



Projets

1. Effet des changements climatiques sur les chaussées
2. Réduction de la sensibilité des matériaux aux effets climatiques
3. Mitigation des effets des cycles de gel-dégel
4. Développement de technologies de « chaussées intelligentes »



Source: MTQ



Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
Charges lourdes/Climat/Chaussées



Permafrost engineering research program
Programme de recherche en ingénierie du pergélisol



UNIVERSITÉ
LAVAL



Phase 2

Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
charges lourdes-climat-chaussées

Questions ?

