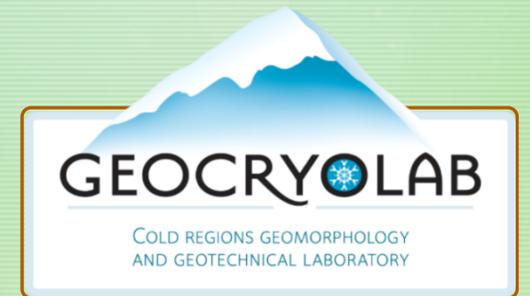


Sliger, Michel et  
Fortier, Daniel

Les progrès dans le  
développement d'un  
système de simulation du  
pergélisol à grande échelle



# Contexte préalable à la mise en place du système



Photo: Yukon Archive Center



Photo: Fabrice Calmels, Yukon Research Center

- Au nord, le sol (pergélisol) peut être riche en glace,
- Les infrastructures en surface nécessitent sa préservation,
- Afin d'optimiser le design des fondations,
- La simulation numérique permet de tester aisément une grande variété de scénarios:
  - Tant du côté climatique,
  - Que du côté technique.

# Mais.....

- Bien qu'elle soit un outil fantastique,
- La simulation numérique est limitée à la connaissance de celui ou celle qui la produit,
  - Les fonctions et paramètres doivent être validés,
  - ... ajustés et calibrés,
- Difficile à faire avec des données de terrain,
  - Accès limité,
  - Affecté par beaucoup de processus en simultanée.

## ...alors

- La simulation en environnement contrôlé...

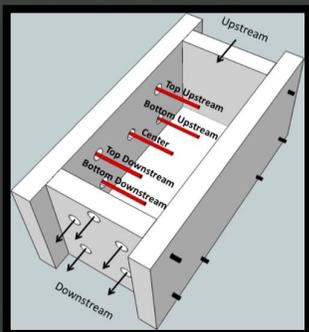


# Problématique de départ: une surabondance d'eau

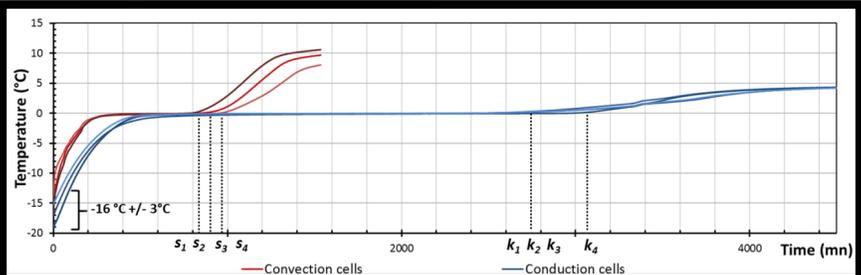
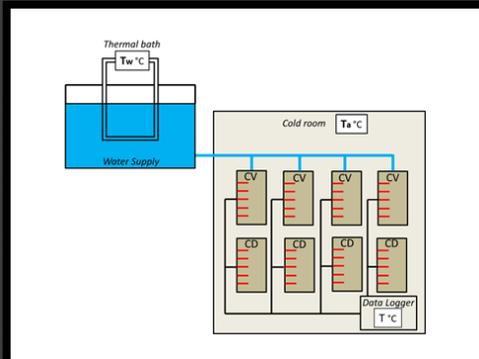
- Mitigation du dégel du pergélisol compliquée où l'eau passe/persiste
  - Échange de chaleur conductive + convective difficile à intégrer dans les simulations numériques
  - Processus multiscalaires
  - Programmes informatiques de simulation peu ou pas calibrés
- 

Appareillage en 8 répliques

Séquence répétée 28x dans des conditions variées

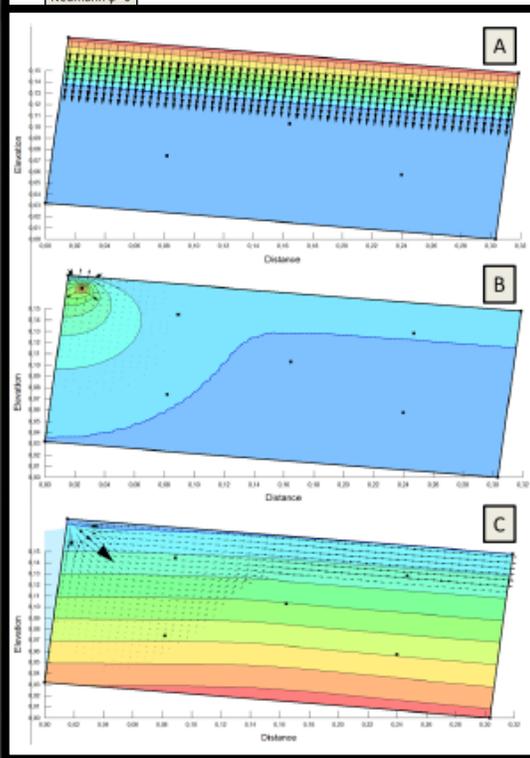
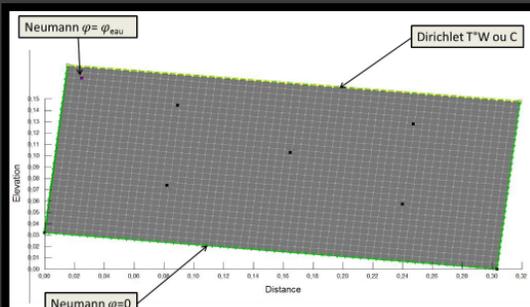


# Physique VS numérique: expérience préalable



$$FI_{cv} = \frac{v_{dg,s} - \bar{x}v_{dg,k}}{\bar{x}v_{dg,k}}$$

Où  $v_{dg,s}$  : Vitesse verticale du dégel conducto-convectif (cm/h), spécifique à chaque position pour chaque boîte et pour chaque séquence de dégel  
 $\bar{x}v_{dg,k}$  : Vitesse verticale moyenne du dégel conductif (cm/h), spécifique à chaque position pour chaque séquence de dégel



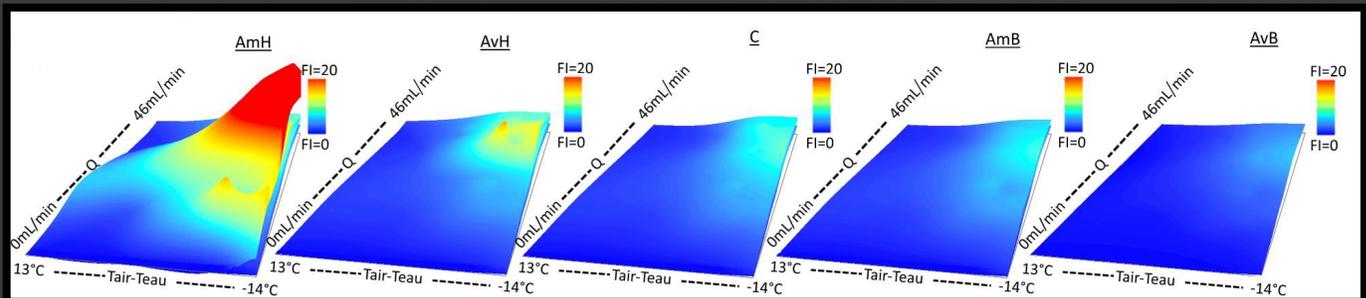
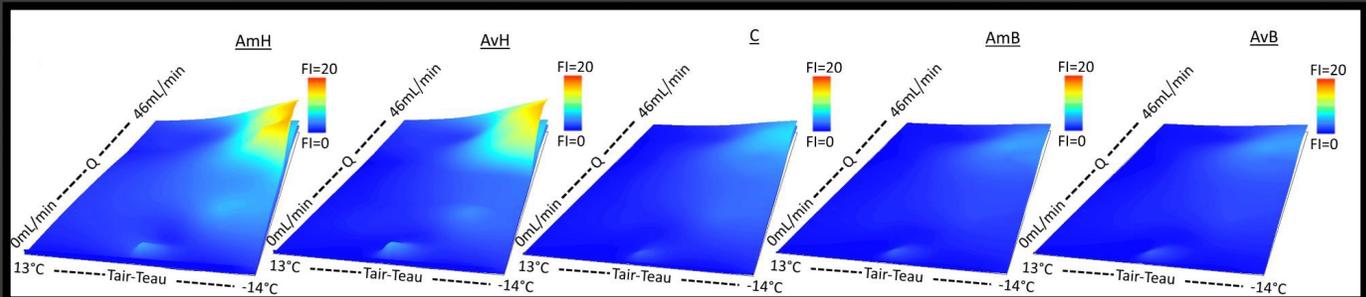
Maillage et conditions limites

Conduction de la surface

Ajout de chaleur convective = Conduction

Écoulement thermiquement neutre

Le facteur d'influence conducto-convectif (FICv) détermine de combien de fois augmente la vitesse verticale du front de dégel



# Nouvelle approche grandeur nature en 2D

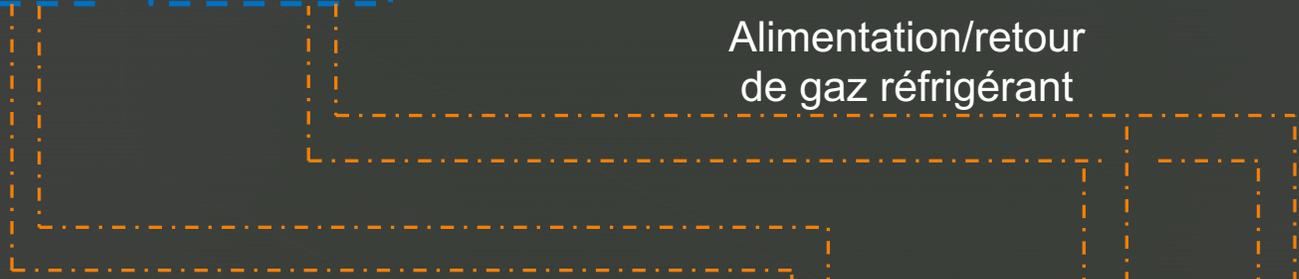
- Objectif:
  - Étudier en laboratoire la réponse réponse thermique d'un sol dont on manipule les conditions limites
- Approche:
  - Importer/reproduire un sol en laboratoire, en système semi-ouvert
  - Isoler ses murs
  - Conditionner sa surface (change climat., ajout/modif. d'une structure, végétation, etc.)
  - Conditionner sa base (température ou )
  - Exclure l'effet de bord (50 cm à la périphérie, il reste une tranche de 1 m sur 2 m de long)
- Mesurer
  - Directement (température, profondeur de gel/dégel, humidité, déformations, etc.)
  - Échantillonner (sol, glace, eau)

# Schéma de la chambre froide

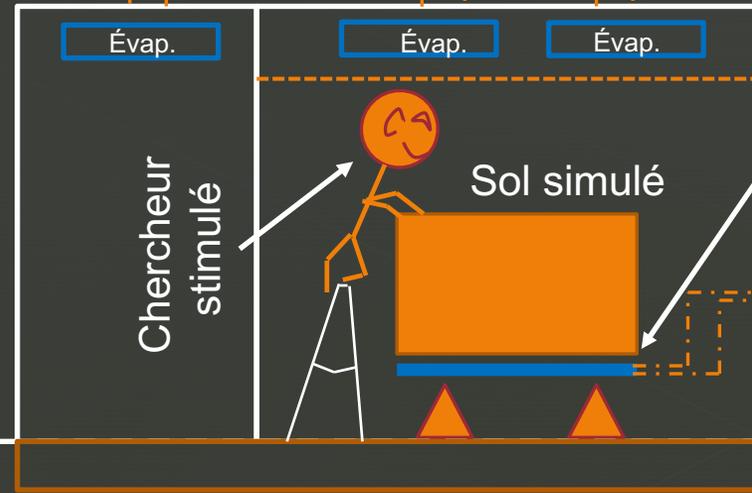
Systèmes de réfrigération externes



Alimentation/retour  
de gaz réfrigérant



Plénum d'air anti-turbulence



Chambre froide  
et antichambre

Chercheur  
stimulé

Sol simulé

Échangeurs à  
plaque

Refrigidisseurs  
externes

Dalle pare-gelée (chauffante)



# Spécifications et options

- Spécifications

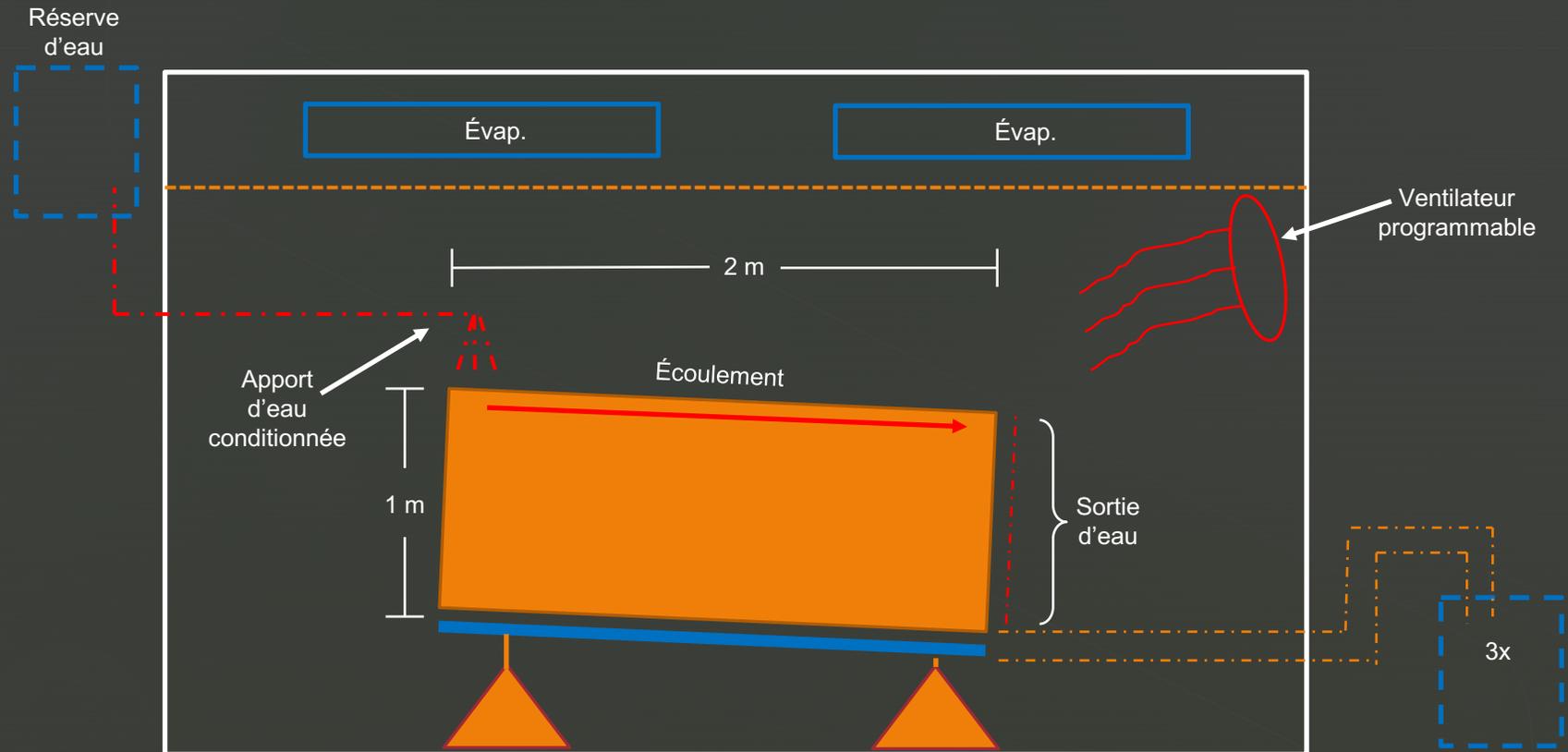
- Conditionnement de l'atmosphère, programmable (-30 à 20 °C)
- Fond en acier, solide et conducteur de chaleur
- Conditionnement de la base, programmable (-20 à 50 °C)
- Murs en bois, résilients aux déformations

- Options

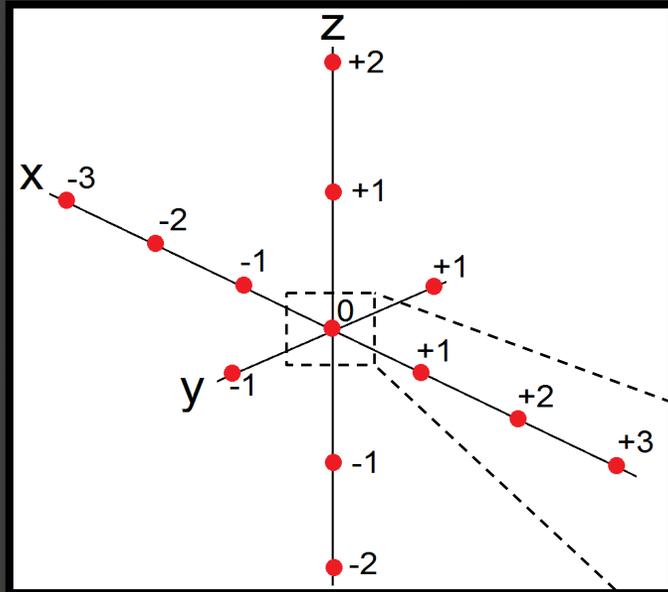
- Écoulement d'eau conditionnée, à débit contrôlé
- Ventillation en surface, à vitesse contrôlée
- Ajout/suppression de couverture végétale, maquette ou autres structures
- Neige et radiation?



# Schéma de l'installation planifiée

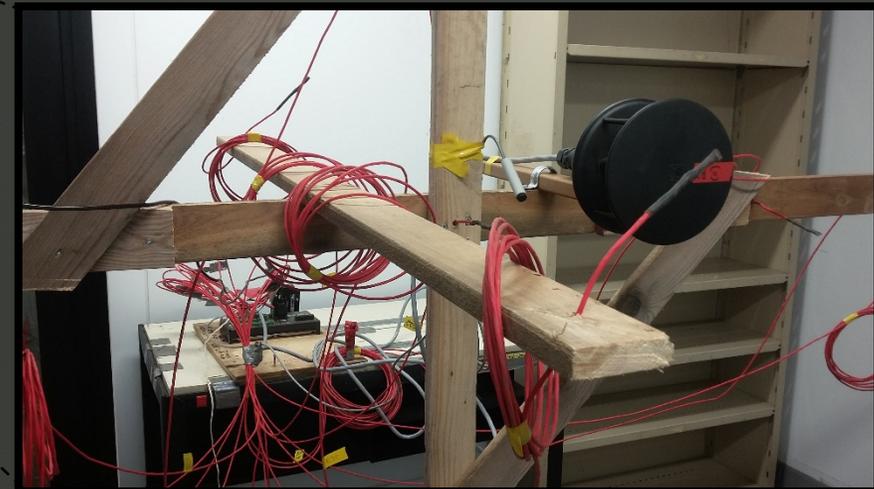


# Stabilité de la chambre froide

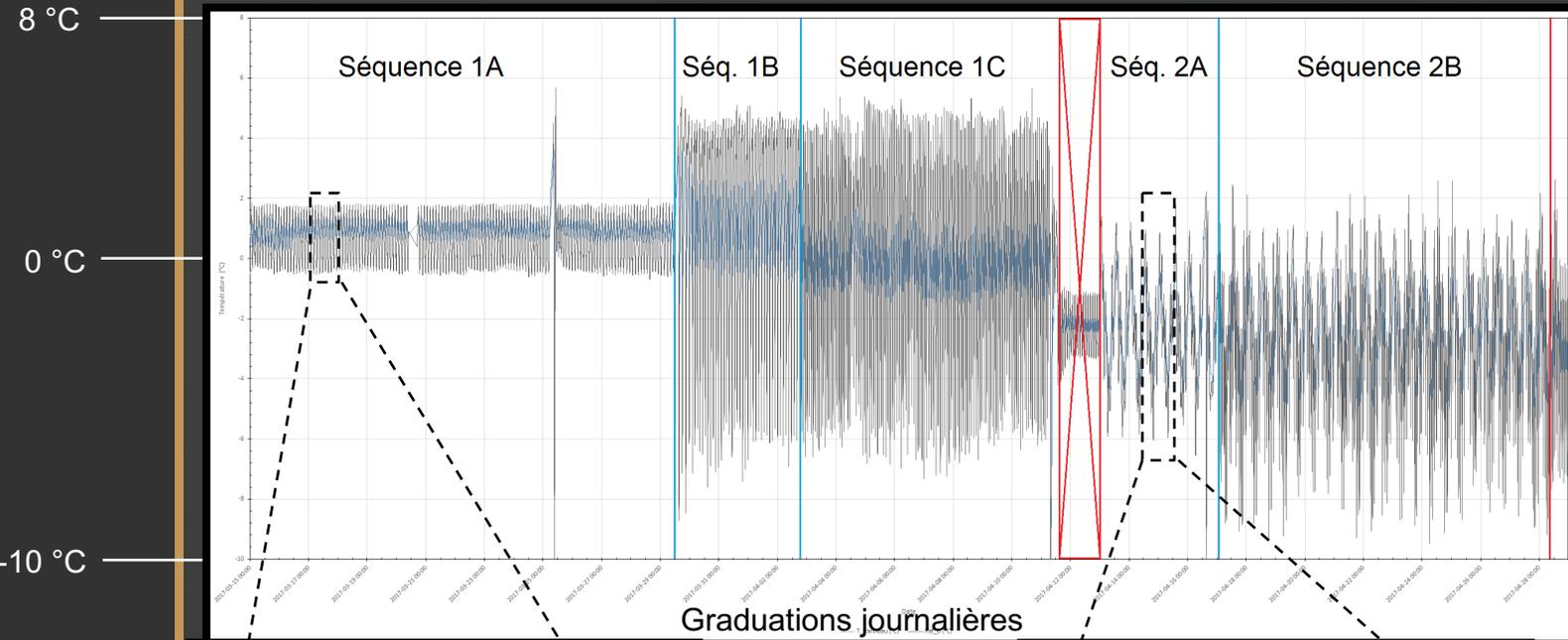


Mesures:

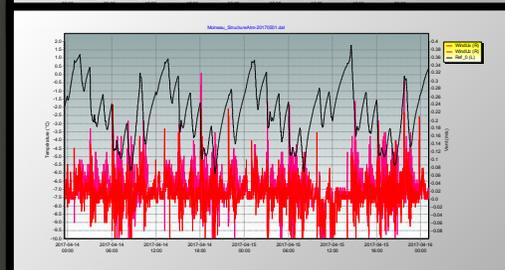
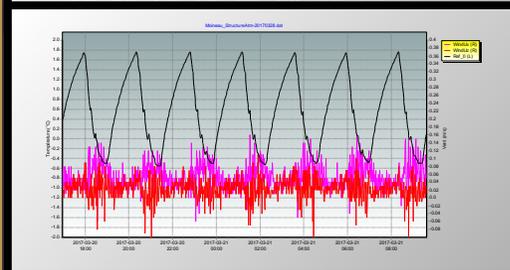
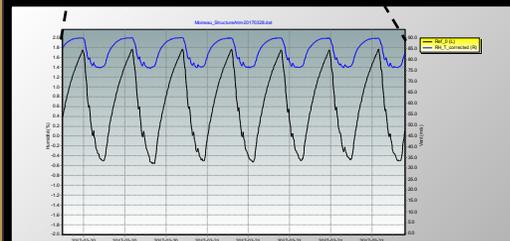
- $T^{\circ} \times 13$
- Vent (en 2D)
- Humidité relative



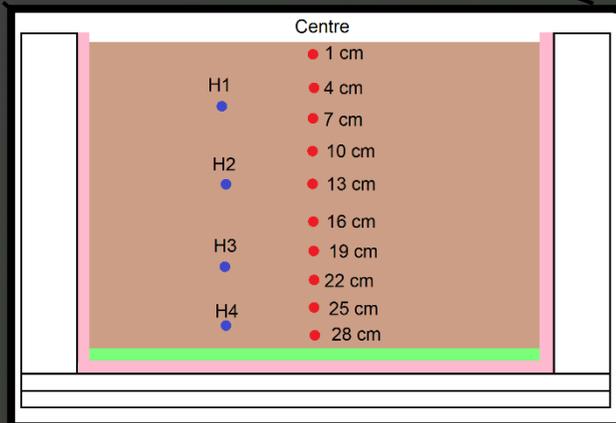
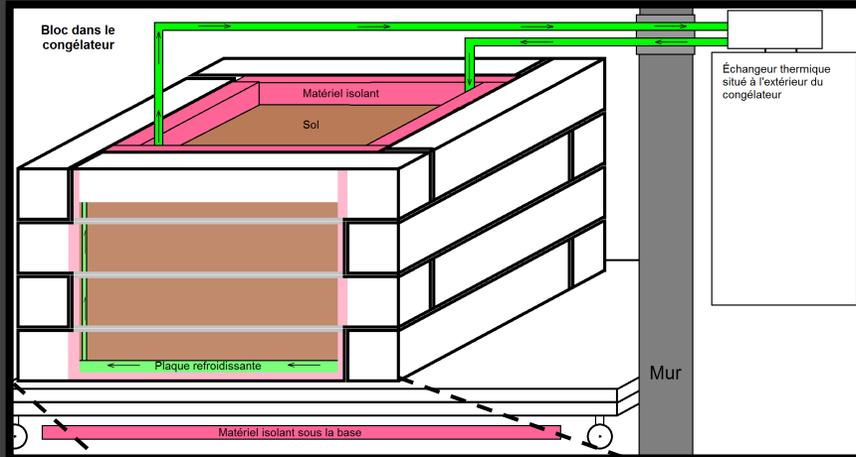
# Stabilité de la chambre froide



- Stabilité aérodynamique satisfaisante: l'air refroidie "ruisselle" surtout le long des murs
- Humidité toujours au maximum, forte évaporation/sublimation
- Cycle horaire reste à contrôler
- Amplitude des cycles à contrôler



# Version d'essai réduite

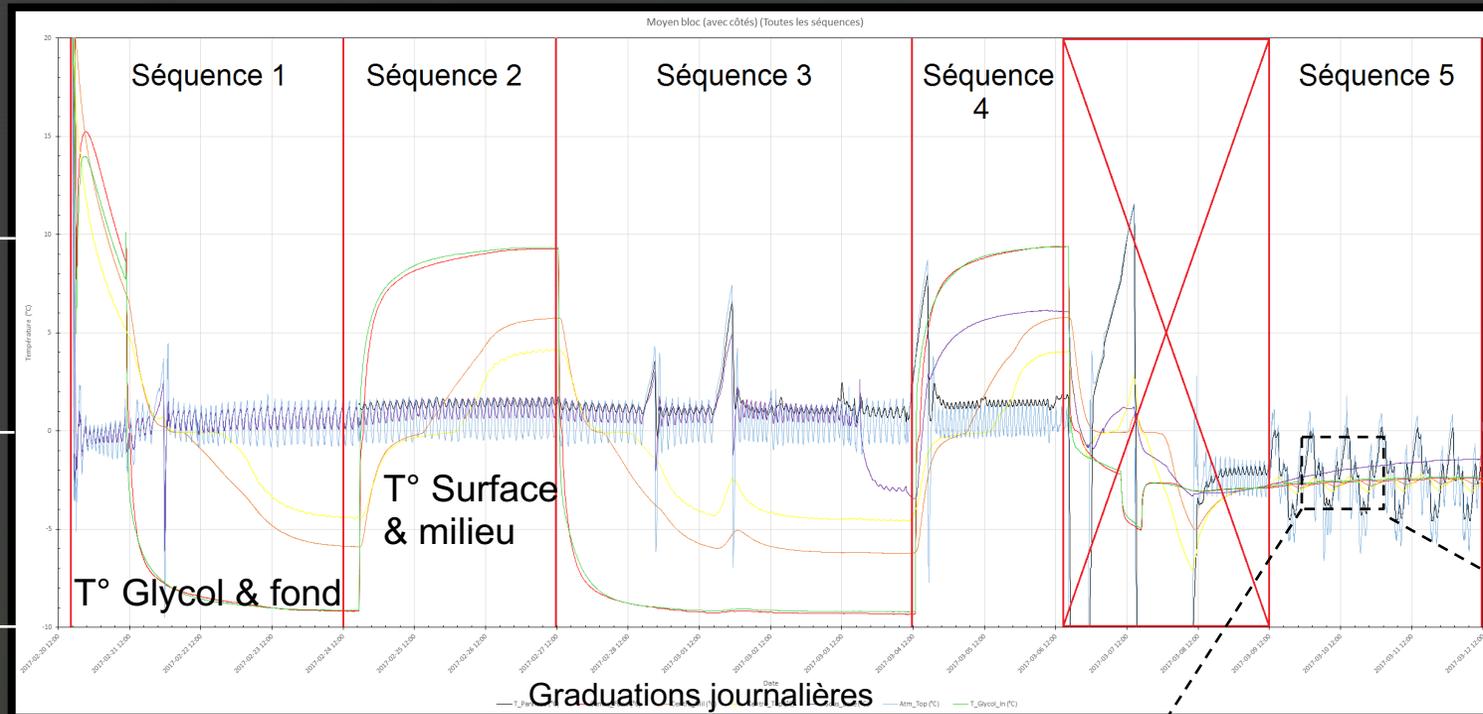


Mesures:

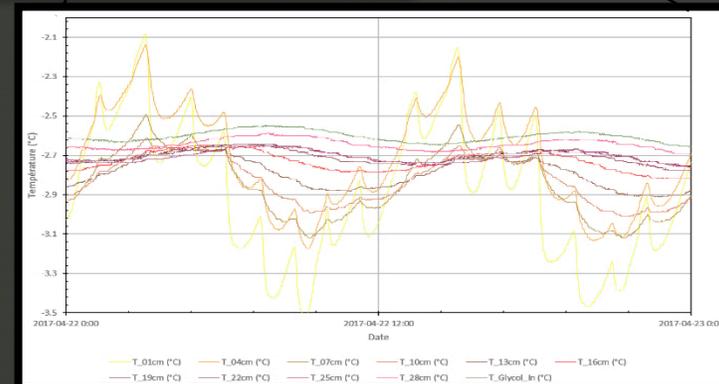
- $T^{\circ} \times 10$
- Humidité  $\times 4$



# Résultats brutes de la version d'essai



- Effet de bord acceptable
- Robustesse des matériaux satisfaisante
- Comportement du sol reproductible
- Design de l'échangeur à ajuster
- Méthodes d'analyse toujours à développer selon la question de recherche



## Possibilités

- Inverser le flux des chaleurs conductive et convective
- Ajouter de la chaleur radiative en surface
- Ajouter une couverture de neige variable
- Simuler la fonte printannière ou autre régime hydrologique complexe
- Etc.

et

## défis

- Gérer l'installation au niveau de la propreté et de la durabilité
- Assurer la stabilité du système mécanique (opération très complexe)
- Limiter les oscillations horaires
- Éventuellement interpréter des résultats issus de simulations à échelle réduite
- Valider la qualité des simulations physiques par rapport aux systèmes réels
- Et tellement d'autres...

# Applications potentielles

- Étudier le transport de chaleur et d'eau "ensemble"
- Étudier la formation/transformation de la glace de sol
- Étudier l'effet de la glace sur la dispersion de contaminants variés
- Étudier l'accrétion de "icing"
- Étudier l'hydrogéologie de surface
- Mesurer la permittivité effective du sol
- Déduire les conductivités effectives du sol (thermique, hydrauliques et électrique)
- Déduire les chaleurs spécifiques et latentes effective d'un sol
- Etc. Aplicable pour le gel saisonnier aussi, pas juste le pergélisol...

Merçi pour votre attention,  
des questions?

[michel.sliger@umontreal.ca](mailto:michel.sliger@umontreal.ca)

[daniel.fortier@umontreal.ca](mailto:daniel.fortier@umontreal.ca)

Geocryolab.ca

