CFMR
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE DES ROCHES

Prix Pierre Londe 2020 - CFMR, le 4 décembre 2020

Modélisation THMC de la congélation artificielle des terrains : Application à la mine de Cigar Lake

Thèse soutenue par Hafssa TOUNSI, le 6 novembre 2019

dirigée par Ahmed ROUABHI, *MINES ParisTech*

préparée au *Centre de Géosciences, MINES ParisTech*

financée par ORANO

MINES ParisTech | PSL

orano

Contexte industriel

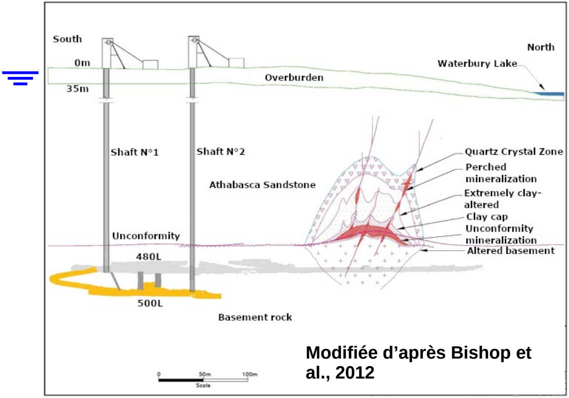
La congélation artificielle est utilisée aujourd'hui pour :

- réaliser des travaux souterrains en site urbain dense ;
- exploiter des gisements miniers complexes.

Contexte industriel

La congélation artificielle est utilisée aujourd'hui pour :

- réaliser des travaux souterrains en site urbain dense ;
- exploiter des gisements miniers complexes.

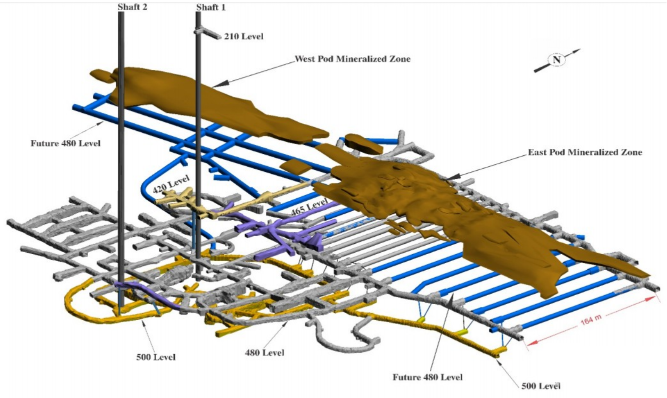


Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada

Contexte industriel

La congélation artificielle est utilisée aujourd'hui pour :

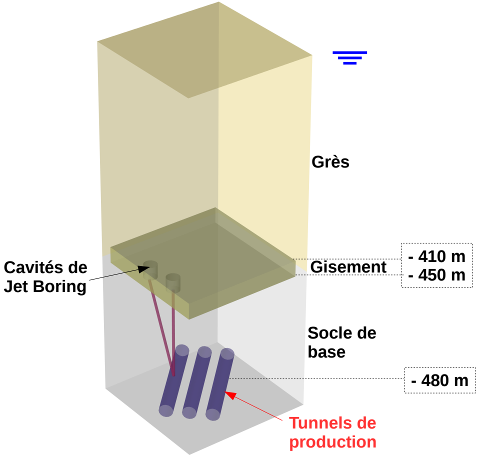
- réaliser des travaux souterrains en site urbain dense ;
- exploiter des gisements miniers complexes.



Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada

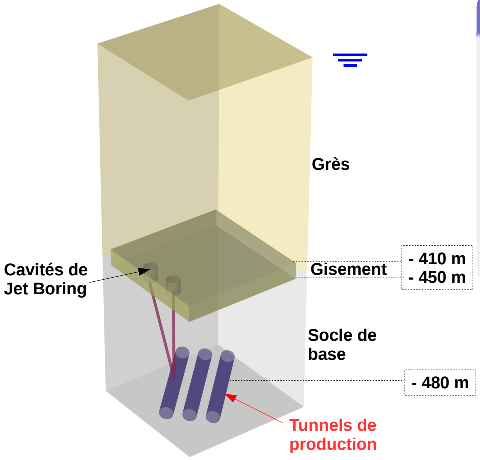
Exploitation de gisements miniers

Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada



Exploitation de gisements miniers

Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada

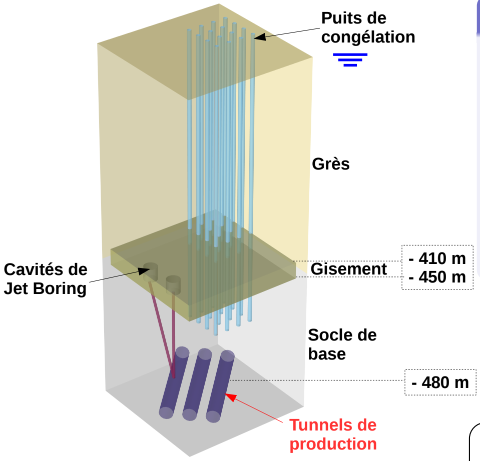


Challenges pour l'exploitation :

- terrain très hétérogène ;
- faible résistance mécanique de la zone minéralisée et son voisinage ;
- présence d'eau sous forte pression (5 MPa).

Exploitation de gisements miniers

Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada



Challenges pour l'exploitation :

- terrain très hétérogène ;
- faible résistance mécanique de la zone minéralisée et son voisinage ;
- présence d'eau sous forte pression (5 MPa).

Congélation artificielle

→ Imperméabiliser les terrains

→ Consolider les terrains

Exploitation de gisements miniers

Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada

Problèmes de convergence au niveau des tunnels de production excavés dans le socle non congelé.

Exploitation de gisements miniers

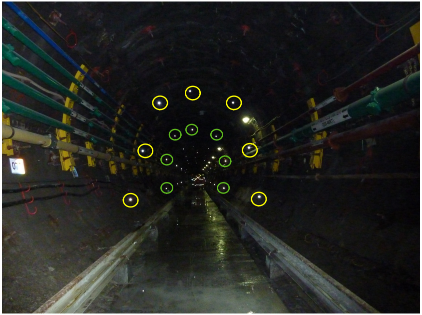
Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada

Problèmes de convergence au niveau des tunnels de production excavés dans le socle non congelé.

Exploitation de gisements miniers

Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada

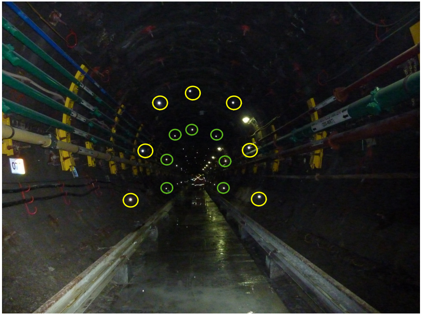
Problèmes de convergence au niveau des tunnels de production excavés dans le socle non congelé.

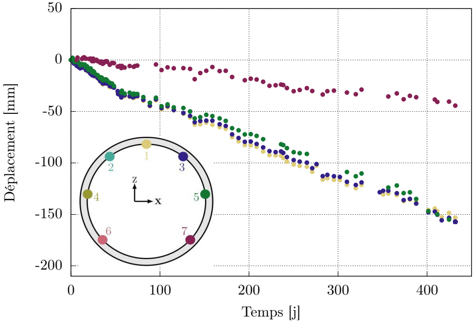


Exploitation de gisements miniers

Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada

Problèmes de convergence au niveau des tunnels de production excavés dans le socle non congelé.

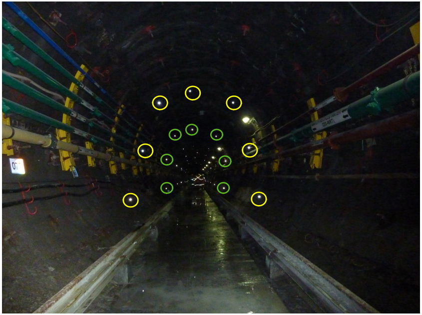


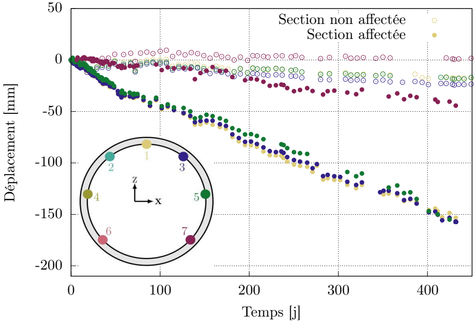


Exploitation de gisements miniers

Exemple de la mine de Cigar Lake au Canada

Problèmes de convergence au niveau des tunnels de production excavés dans le socle non congelé.





Objectifs de la thèse

Enjeu industriel :

Exploitation des zones congelées sur de longues durées tout en évitant les risques liés aux écoulements d'eau et aux instabilités mécaniques.

↓

Mise en place de modèles numériques fiables permettant de prédire :

- l'évolution et l'étendue des zones congelées ;
- la stabilité et les mouvements des terrains.

Méthodologie

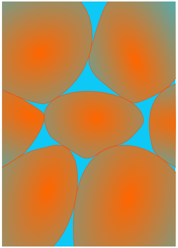
1. Une mise en équation du problème THMC.
2. Des essais de laboratoire sur les sols congelés afin d'élaborer un modèle de comportement mécanique.
3. Des observations et mesures macroscopiques permettant de valider la mise en équation du problème THMC :
    - essais de laboratoire ;
    - mesures *in situ*.
4. Une approche de simulation numérique adéquate.

Plan de la présentation

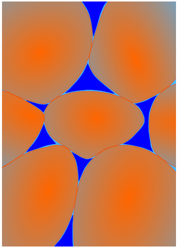
Plan de la présentation

Hypothèses principales

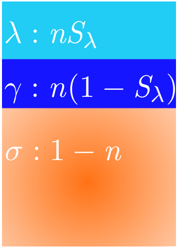
- Le terrain à congeler est un milieu poreux constitué de trois phases :
  - le squelette solide σ ;
  - le liquide multi-constituant λ ;
  - la glace pure γ.
- La phase liquide existe même en présence de la glace.
- La phase glace est assimilée à un fluide.



Avant congélation



Après congélation



Phases

Plan de la présentation

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$\rightarrow$ Hypothèse : les petites perturbations.

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$\rightarrow$ Hypothèse : les petites perturbations.

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho \overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

- $\underline{\underline{\sigma}}$: tenseur de contraintes totales de Cauchy.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

→ Hypothèse : les petites perturbations.

$$\vec{\vec{\nabla}}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\vec{g} = \vec{0}$$

- $\underline{\underline{\sigma}}$: tenseur de contraintes totales de Cauchy.
- $\rho = \rho^{\sigma} + \rho^{\lambda} + \rho^{\gamma}$
  - $\rho^{\sigma} = (1-n)\rho_{\sigma}$, $\rho^{\lambda} = nS_{\lambda}\rho_{\lambda}$ et $\rho^{\gamma} = n(1-S_{\lambda})\rho_{\gamma}$: masses volumiques apparentes.
  - n : porosité totale du milieu poreux.
  - S_{λ} : degré de saturation liquide.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$\rightarrow$ Hypothèse : les petites perturbations.

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho \overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

- $\underline{\underline{\sigma}}$: tenseur de contraintes totales de Cauchy.
- $\rho = \rho^{\sigma} + \rho^{\lambda} + \rho^{\gamma}$
  - $\rho^{\sigma} = (1 - n)\rho_{\sigma}$, $\rho^{\lambda} = nS_{\lambda}\rho_{\lambda}$ et $\rho^{\gamma} = n(1 - S_{\lambda})\rho_{\gamma}$: masses volumiques apparentes.
  - n : porosité totale du milieu poreux.
  - S_{λ} : degré de saturation liquide.
- $\overrightarrow{g}$: vecteur d'accélération de pesanteur.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

→ Hypothèse : équilibre thermique local.

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_w\hat{\pi}^\gamma$$

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$\rightarrow$ Hypothèse : équilibre thermique local.

$$\rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla} T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_w \hat{\pi}^\gamma$$

- $\rho C_p = \rho^\lambda C_{p\lambda} + \rho^\gamma C_{p\gamma} + \rho^\sigma C_{p\sigma}$; $C_{p\alpha}$ la capacité thermique de la phase α.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$\rightarrow$ Hypothèse : équilibre thermique local.

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_w\hat{\pi}^\gamma$$

- $\rho C_p = \rho^\lambda C_{p\lambda} + \rho^\gamma C_{p\gamma} + \rho^\sigma C_{p\sigma}$; $C_{p\alpha}$ la capacité thermique de la phase α.
- $\overrightarrow{V}$: vitesse de filtration de la phase liquide λ.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$\rightarrow$ Hypothèse : équilibre thermique local.

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_w\hat{\pi}^\gamma$$

- $\rho C_p = \rho^\lambda C_{p\lambda} + \rho^\gamma C_{p\gamma} + \rho^\sigma C_{p\sigma}$; $C_{p\alpha}$ la capacité thermique de la phase α.
- $\overrightarrow{V}$: vitesse de filtration de la phase liquide λ.
- $\overrightarrow{\psi}$: flux surfacique de la chaleur par conduction.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

→ Hypothèse : équilibre thermique local.

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}}\hat{\pi}^\gamma$$

- $\rho C_p = \rho^\lambda C_{p\lambda} + \rho^\gamma C_{p\gamma} + \rho^\sigma C_{p\sigma}$; $C_{p\alpha}$ la capacité thermique de la phase α.
- $\overrightarrow{V}$: vitesse de filtration de la phase liquide λ.
- $\overrightarrow{\psi}$: flux surfacique de la chaleur par conduction.
- $\Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}$: chaleur latente de changement de phase.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

→ Hypothèse : équilibre thermique local.

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}}\hat{\pi}^\gamma$$

- $\rho C_p = \rho^\lambda C_{p\lambda} + \rho^\gamma C_{p\gamma} + \rho^\sigma C_{p\sigma}$; $C_{p\alpha}$ la capacité thermique de la phase α.
- $\overrightarrow{V}$: vitesse de filtration de la phase liquide λ.
- $\overrightarrow{\psi}$: flux surfacique de la chaleur par conduction.
- $\Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}$: chaleur latente de changement de phase.
- $\hat{\pi}^\gamma$ masse d'eau échangée aux interfaces $\lambda\gamma$.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\overrightarrow{\nabla}}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$$\rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}}\hat{\pi}^\gamma$$

$$\Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}$$

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_\mathrm{w}\hat{\pi}^\gamma$$

$$\Delta h_\mathrm{w} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}$$

Bilan de la masse de la phase liquide :

$\rightarrow$ Hypothèse : phase liquide $=\{$ eau w + sel s $\}$

$$\dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda\dot{\varepsilon}_\mathrm{v} + \overrightarrow{\nabla}.(\rho_\lambda\overrightarrow{V}) = -\hat{\pi}^\gamma$$

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\overrightarrow{\nabla}}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}}\hat{\pi}^\gamma$$

$$\Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}$$

Bilan de la masse de la phase liquide :

$\rightarrow$ Hypothèse : phase liquide $=\{$ eau w + sel s $\}$

$$\dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda\dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} + \overrightarrow{\nabla}.(\rho_\lambda\overrightarrow{V}) = -\hat{\pi}^\gamma$$

- $\varepsilon_{\mathrm{v}} = \mathrm{tr}(\underline{\underline{\varepsilon}})$: déformation volumique totale.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\vec{\vec{\nabla}}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\vec{g} = \vec{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\vec{V}.\vec{\nabla}T + \vec{\nabla}.\vec{\psi} = -\Delta h_w\hat{\pi}^\gamma$$

$$\Delta h_w = h_{w\gamma} - h_{w\lambda}$$

Bilan de la masse de la phase liquide :

→ Hypothèse : phase liquide ={ eau w + sel s }

$$\dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda\dot{\varepsilon}_v + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda\vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma$$

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$$\rho C_p\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}}\hat{\pi}^\gamma$$

$$\Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}$$

Bilan de la masse de la phase liquide :

$\rightarrow$ Hypothèse : phase liquide $=\{$ eau w + sel s $\}$

$$\dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda\dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} + \overrightarrow{\nabla}.(\rho_\lambda\overrightarrow{V}) = -\hat{\pi}^\gamma$$

Bilan de la masse du sel s dans la phase liquide λ :

$$\rho^\lambda\dot{c} + \rho_\lambda\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}c + \overrightarrow{\nabla}.(\rho_\lambda\overrightarrow{J}) = c\hat{\pi}^\gamma$$

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\vec{\vec{\nabla}}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\vec{g} = \vec{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$$\rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\vec{V}.\vec{\nabla}T + \vec{\vec{\nabla}}.\vec{\psi} = -\Delta h_w \hat{\pi}^\gamma$$

$$\Delta h_w = h_{w\gamma} - h_{w\lambda}$$

Bilan de la masse de la phase liquide :

$\rightarrow$ Hypothèse : phase liquide $=\{$ eau w + sel s $\}$

$$\dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda\dot{\varepsilon}_v + \vec{\vec{\nabla}}.(\rho_\lambda\vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma$$

Bilan de la masse du sel s dans la phase liquide λ :

$$\rho^\lambda\dot{c} + \rho_\lambda\vec{V}.\vec{\nabla}c + \vec{\vec{\nabla}}.(\rho_\lambda\vec{J}) = c\hat{\pi}^\gamma$$

- $\vec{J}$: vitesse de diffusion du sel s dans la phase liquide.

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\overrightarrow{g} = \overrightarrow{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = nS_\lambda\rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$$\rho C_p\,\dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda}\,\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}\,T + \overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}}\hat{\pi}^\gamma$$

$$\Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}$$

Bilan de la masse de la phase liquide :

$$\dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda\dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} + \overrightarrow{\nabla}.(\rho_\lambda\,\overrightarrow{V}) = -\hat{\pi}^\gamma$$

Bilan de la masse du sel s dans la phase liquide λ :

$$\rho^\lambda\dot{c} + \rho_\lambda\,\overrightarrow{V}.\overrightarrow{\nabla}\,c + \overrightarrow{\nabla}.(\rho_\lambda\,\overrightarrow{J}) = c\hat{\pi}^\gamma$$

Équations de bilan

Bilan de la quantité de mouvement :

$$\vec{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho \vec{g} = \vec{0}$$

$$\rho = (1-n)\rho_\sigma + \rho^\lambda + \rho^\gamma \quad , \quad \rho^\lambda = n S_\lambda \rho_\lambda \quad , \quad \rho^\gamma = n(1-S_\lambda)\rho_\gamma$$

Équation de la chaleur :

$$\rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda} \vec{V}.\vec{\nabla} T + \vec{\nabla}.\vec{\psi} = -\Delta h_\mathrm{w} \hat{\pi}^\gamma$$

$$\Delta h_\mathrm{w} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}$$

Bilan de la masse de la phase liquide :

$$\dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda \dot{\varepsilon}_\mathrm{v} + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma$$

Bilan de la masse du sel s dans la phase liquide λ :

$$\rho^\lambda \dot{c} + \rho_\lambda \vec{V}.\vec{\nabla} c + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{J}) = c\hat{\pi}^\gamma$$

Bilan de la masse de la phase glace γ :

$\rightarrow$ Hypothèse : la glace suit le mouvement du squelette.

$$\dot{\rho}^\gamma + \rho^\gamma \dot{\varepsilon}_\mathrm{v} = \hat{\pi}^\gamma$$

Lois complémentaires

Système d'équations de bilan

$$\begin{cases} \vec{\vec{\nabla}}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\vec{g} = \vec{0} \\ \rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda} \vec{V}.\vec{\nabla}\,T + \vec{\nabla}.\vec{\psi} = -\Delta h_w \hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda \dot{\varepsilon}_v + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma \\ \rho^\lambda \dot{c} + \rho_\lambda \vec{V}.\vec{\nabla} c + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{J}) = c\hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\gamma + \rho^\gamma \dot{\varepsilon}_v = \hat{\pi}^\gamma \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \rho = \sum \rho^\alpha \\ \rho C_p = \sum \rho^\alpha C_{p\alpha} \\ \rho^\lambda = n S_\lambda \rho_\lambda \\ \rho^\gamma = n(1 - S_\lambda)\rho_\gamma \\ \Delta h_w = h_{w\gamma} - h_{w\lambda} \end{cases}$$

- **Loi de Darcy** : $\vec{V} = -\frac{k_\lambda}{\eta_\lambda}\left(\vec{\nabla} p_\lambda - \rho_\lambda \vec{g}\right)$; $k_\lambda = k_0\ k_r(S_\lambda)$

Lois complémentaires

Système d'équations de bilan

$$\begin{cases} \vec{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\vec{g} = \vec{0} \\ \rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda} \vec{V}.\vec{\nabla} T + \vec{\nabla}.\vec{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}} \hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda \dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma \\ \rho^\lambda \dot{c} + \rho_\lambda \vec{V}.\vec{\nabla} c + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{J}) = c\hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\gamma + \rho^\gamma \dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} = \hat{\pi}^\gamma \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \rho = \sum \rho^\alpha \\ \rho C_p = \sum \rho^\alpha C_{p\alpha} \\ \rho^\lambda = n S_\lambda \rho_\lambda \\ \rho^\gamma = n(1 - S_\lambda)\rho_\gamma \\ \Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda} \end{cases}$$

- **Loi de Darcy** : $\vec{V} = -\dfrac{k_\lambda}{\eta_\lambda} \left(\vec{\nabla} p_\lambda - \rho_\lambda \vec{g}\right) \; ; \quad k_\lambda = k_0 \; k_{\mathrm{r}}(S_\lambda)$
- **Loi de Fick** : $\vec{J} = -D_\lambda \vec{\nabla} c$

Lois complémentaires

Système d'équations de bilan

$$
\begin{cases}
\vec{\vec{\nabla}}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\vec{g} = \vec{0} \\
\rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda} \vec{V}.\vec{\nabla} T + \vec{\nabla}.\vec{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}} \hat{\pi}^\gamma \\
\dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda \dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma \\
\rho^\lambda \dot{c} + \rho_\lambda \vec{V}.\vec{\nabla} c + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{J}) = c\hat{\pi}^\gamma \\
\dot{\rho}^\gamma + \rho^\gamma \dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} = \hat{\pi}^\gamma
\end{cases}
\quad \text{avec} \quad
\begin{cases}
\rho = \sum \rho^\alpha \\
\rho C_p = \sum \rho^\alpha C_{p\alpha} \\
\rho^\lambda = n S_\lambda \rho_\lambda \\
\rho^\gamma = n(1 - S_\lambda)\rho_\gamma \\
\Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda}
\end{cases}
$$

- **Loi de Darcy** : $\vec{V} = -\dfrac{k_\lambda}{\eta_\lambda}\left(\vec{\nabla} p_\lambda - \rho_\lambda \vec{g}\right)$; $k_\lambda = k_0\ k_{\mathrm{r}}(S_\lambda)$
- **Loi de Fick** : $\vec{J} = -D_\lambda \vec{\nabla} c$
- **Loi de Fourrier** : $\vec{\psi} = -\Lambda\ \vec{\nabla} T$

Lois complémentaires

Système d'équations de bilan

$$\begin{cases} \vec{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\vec{g} = \vec{0} \\ \rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda} \vec{V}.\vec{\nabla} T + \vec{\nabla}.\vec{\psi} = -\Delta h_w \hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda \dot{\varepsilon}_v + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma \\ \rho^\lambda \dot{c} + \rho_\lambda \vec{V}.\vec{\nabla} c + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{J}) = c\hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\gamma + \rho^\gamma \dot{\varepsilon}_v = \hat{\pi}^\gamma \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \rho = \sum \rho^\alpha \\ \rho C_p = \sum \rho^\alpha C_{p\alpha} \\ \rho^\lambda = n S_\lambda \rho_\lambda \\ \rho^\gamma = n(1 - S_\lambda)\rho_\gamma \\ \Delta h_w = h_{w\gamma} - h_{w\lambda} \end{cases}$$

- **Loi de Darcy** : $\vec{V} = -\dfrac{k_\lambda}{\eta_\lambda}\left(\vec{\nabla} p_\lambda - \rho_\lambda \vec{g}\right)$; $k_\lambda = k_0\ k_r(S_\lambda)$
- **Loi de Fick** : $\vec{J} = -D_\lambda \vec{\nabla} c$
- **Loi de Fourrier** : $\vec{\psi} = -\Lambda\ \vec{\nabla} T$
- $\hat{\pi}^\gamma$ régi par **l'équilibre chimique** $\Rightarrow \mu_{w\gamma}(p_\gamma, T) = \mu_{w\lambda}(p_\lambda, T, c)$

Lois complémentaires

Système d'équations de bilan

$$\begin{cases} \vec{\vec{\nabla}}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\vec{g} = \vec{0} \\ \rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda} \vec{V}.\vec{\nabla}\,T + \vec{\nabla}.\vec{\psi} = -\Delta h_{\mathrm{w}} \hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda \dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma \\ \rho^\lambda \dot{c} + \rho_\lambda \vec{V}.\vec{\nabla} c + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{J}) = c\hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\gamma + \rho^\gamma \dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} = \hat{\pi}^\gamma \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \rho = \sum \rho^\alpha \\ \rho C_p = \sum \rho^\alpha C_{p\alpha} \\ \rho^\lambda = n S_\lambda \rho_\lambda \\ \rho^\gamma = n(1 - S_\lambda)\rho_\gamma \\ \Delta h_{\mathrm{w}} = h_{\mathrm{w}\gamma} - h_{\mathrm{w}\lambda} \end{cases}$$

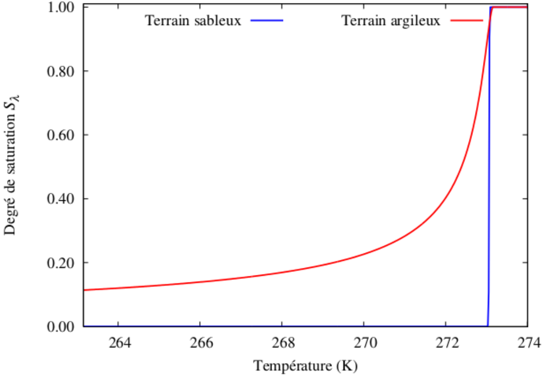
- **Loi de Darcy** : $\vec{V} = -\dfrac{k_\lambda}{\eta_\lambda}\left(\vec{\nabla} p_\lambda - \rho_\lambda \vec{g}\right)$; $k_\lambda = k_0\ k_{\mathrm{r}}(S_\lambda)$
- **Loi de Fick** : $\vec{J} = -D_\lambda \vec{\nabla} c$
- **Loi de Fourrier** : $\vec{\psi} = -\Lambda\ \vec{\nabla}\,T$
- $\hat{\pi}^\gamma$ régi par **l'équilibre chimique** $\Rightarrow \mu_{\mathrm{w}\gamma}(p_\gamma, T) = \mu_{\mathrm{w}\lambda}(p_\lambda, T, c)$
- Relation entre $(\underline{\underline{\sigma}}, p_\lambda, p_\gamma)$ et $\underline{\underline{\varepsilon}}$; loi d'évolution de la porosité n.

Plan de la présentation

Avancement du front de congélation

$$S_\lambda = \mathcal{S}(p_c = p_\gamma - p_\lambda, T, c)$$

- L'apparition de la phase glace est synonyme de : $S_\lambda < 1 \iff p_c > 0$.
- $\mathcal{S}$ est une fonction empirique qui dépend du type de terrain.



- $\mathcal{S}$ est indépendante du type d'essais (gel ou dégel).

Thermodynamique de changement de phase

$$\mu_{w\gamma}(p_\gamma, T) = \mu_{w\lambda}(p_\lambda, T, c)$$

$$\Downarrow$$

$$g_\gamma(p_\gamma, T) = (g_\lambda - c\partial_c g_\lambda)(p_\lambda, T, c)$$

$$\Downarrow$$

$$p_c(p_\lambda, T, c) = (1 - \rho_\gamma(T)/\rho_{w\lambda}(T, c))\, {p'}_{\lambda\gamma}(c)(T - T_{\lambda\gamma}(p_\lambda, c))$$

Lois complémentaires

Système d'équations de bilan

$$\begin{cases} \vec{\nabla}.\underline{\underline{\sigma}} + \rho\,\vec{g} = \vec{0} \\ \rho C_p \dot{T} + \rho_\lambda C_{p\lambda} \vec{V}.\vec{\nabla}T + \vec{\nabla}.\vec{\psi} = -\Delta h_w \hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\lambda + \rho^\lambda \dot{\varepsilon}_v + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{V}) = -\hat{\pi}^\gamma \\ \rho^\lambda \dot{c} + \rho_\lambda \vec{V}.\vec{\nabla}c + \vec{\nabla}.(\rho_\lambda \vec{J}) = c\hat{\pi}^\gamma \\ \dot{\rho}^\gamma + \rho^\gamma \dot{\varepsilon}_v = \hat{\pi}^\gamma \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \rho = \sum \rho^\alpha \\ \rho C_p = \sum \rho^\alpha C_{p\alpha} \\ \rho^\lambda = n S_\lambda \rho_\lambda \\ \rho^\gamma = n(1 - S_\lambda)\rho_\gamma \\ \Delta h_w = h_{w\gamma} - h_{w\lambda} \end{cases}$$

- **Loi de Darcy** : $\vec{V} = -\dfrac{k_\lambda}{\eta_\lambda}\left(\vec{\nabla}p_\lambda - \rho_\lambda \vec{g}\right)$; $k_\lambda = k_0\ k_r(S_\lambda)$
- **Loi de Fick** : $\vec{J} = -D_\lambda \vec{\nabla}c$
- **Loi de Fourrier** : $\vec{\psi} = -\Lambda\,\vec{\nabla}T$
- $\hat{\pi}^\gamma$ régi par **l'équilibre chimique** $\Rightarrow \mu_{w\gamma}(p_\gamma, T) = \mu_{w\lambda}(p_\lambda, T, c)$
- Relation entre $(\underline{\underline{\sigma}}, p_\lambda, p_\gamma)$ et $\underline{\underline{\varepsilon}}$; loi d'évolution de la porosité n.

Plan de la présentation

Comportement mécanique

Partition des contraintes

$$\dot{\underline{\underline{\hat{\sigma}}}} = \dot{\underline{\underline{\sigma}}} + B\dot{\varpi}\,\underline{\underline{1}}$$

$\underline{\underline{\hat{\sigma}}}$ tenseur des contraintes effectives ;

$\varpi = p_\lambda + \int_0^{p_c} (1 - S_\lambda(x))\,\mathrm{d}x$: pression de pore équivalente.

Comportement mécanique

Partition des contraintes

$$\dot{\hat{\underline{\underline{\sigma}}}} = \dot{\underline{\underline{\sigma}}} + B\dot{\varpi}\,\underline{\underline{1}}$$

$\hat{\underline{\underline{\sigma}}}$ tenseur des contraintes effectives ;

$\varpi = p_\lambda + \int_0^{p_c} (1 - S_\lambda(x))\,\mathrm{d}x$: pression de pore équivalente.

Partition des déformations

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathsf{e}} + \mathcal{A}\dot{T}\,\underline{\underline{1}} + \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathsf{ne}}$$

Comportement mécanique

Partition des contraintes

$$\dot{\underline{\underline{\hat{\sigma}}}} = \dot{\underline{\underline{\sigma}}} + B\dot{\varpi}\,\underline{\underline{1}}$$

$\underline{\underline{\hat{\sigma}}}$ tenseur des contraintes effectives ;

$\varpi = p_\lambda + \int_0^{p_c} (1 - S_\lambda(x))\,\mathrm{d}x$: pression de pore équivalente.

Partition des déformations

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{e}} + \mathcal{A}\dot{T}\,\underline{\underline{1}} + \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{ne}}$$

Loi de Hooke

$$\dot{\underline{\underline{\hat{\sigma}}}} = \underset{\sim}{\boldsymbol{H}} : \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{e}}$$

Comportement mécanique

Partition des contraintes

$$\dot{\underline{\underline{\hat{\sigma}}}} = \dot{\underline{\underline{\sigma}}} + B\dot{\varpi}\,\underline{\underline{1}}$$

$\underline{\underline{\hat{\sigma}}}$ tenseur des contraintes effectives ;

$\varpi = p_\lambda + \int_0^{p_c} (1 - S_\lambda(x))\,\mathrm{d}x$: pression de pore équivalente.

Partition des déformations

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{e}} + \mathcal{A}\dot{T}\,\underline{\underline{1}} + \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{ne}}$$

Loi de Hooke

$$\dot{\underline{\underline{\hat{\sigma}}}} = \underset{\sim}{\boldsymbol{H}} : \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{e}}$$

Évolution de la porosité

$$\dot{n} = (B - n)\dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} - B\,\dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{ne}} - A_n\dot{T} + S_\lambda\dot{p}_\lambda/M + (1 - S_\lambda)\dot{p}_\gamma/M$$

Comportement mécanique

Partition des contraintes

$$\dot{\hat{\underline{\underline{\sigma}}}} = \dot{\underline{\underline{\sigma}}} + B\dot{\varpi}\,\underline{\underline{1}}$$

$\hat{\underline{\underline{\sigma}}}$ tenseur des contraintes effectives ;

$\varpi = p_\lambda + \int_0^{p_c} (1 - S_\lambda(x))\,\mathrm{d}x$: pression de pore équivalente.

Partition des déformations

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} = \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{e}} + \mathcal{A}\dot{T}\,\underline{\underline{1}} + \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{ne}}$$

Loi de Hooke

$$\dot{\hat{\underline{\underline{\sigma}}}} = \underset{\sim}{\boldsymbol{H}} : \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}^{\mathrm{e}}$$

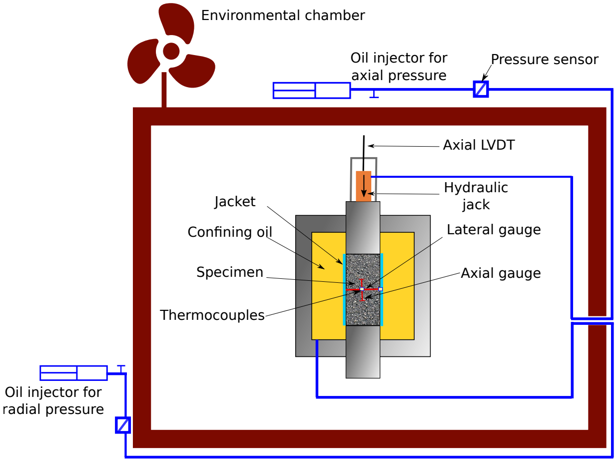
Évolution de la porosité

$$\dot{n} = (B - n)\dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}} - B\,\dot{\varepsilon}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{ne}} - A_n\dot{T} + S_\lambda\dot{p}_\lambda/M + (1 - S_\lambda)\dot{p}_\gamma/M$$

$\underline{\underline{\varepsilon}}^{\mathrm{ne}}$?

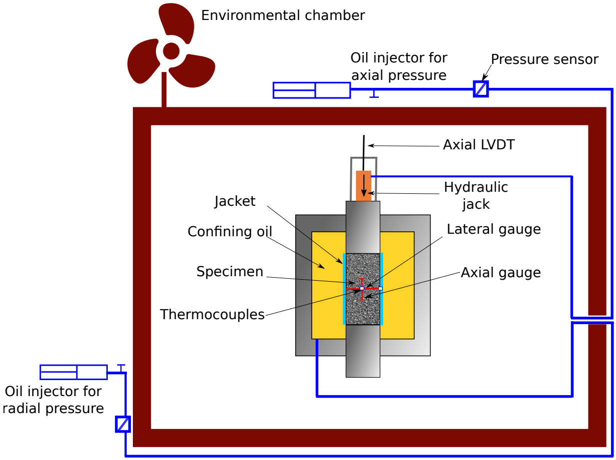
Nouveau dispositif expérimental

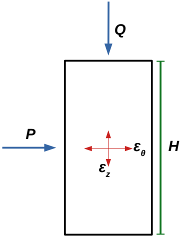
Essais de compression triaxiale à vitesse de déformation et à température contrôlées



Nouveau dispositif expérimental

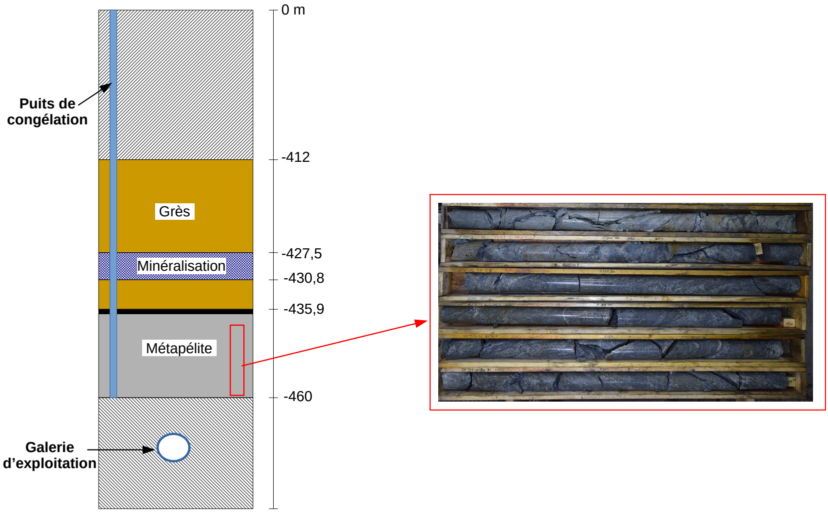
Essais de compression triaxiale à vitesse de déformation et à température contrôlées





- Déviateur : $Q - P$
- Déformation axiale globale : $\varepsilon_H = -(H - H_0)/H_0$
- Déformation volumique locale : $\zeta = -\varepsilon_z - 2\varepsilon_\theta$

Matériau testé



Préparation des échantillons

Problèmes au carottage

Problèmes à la saturation

Préparation des échantillons

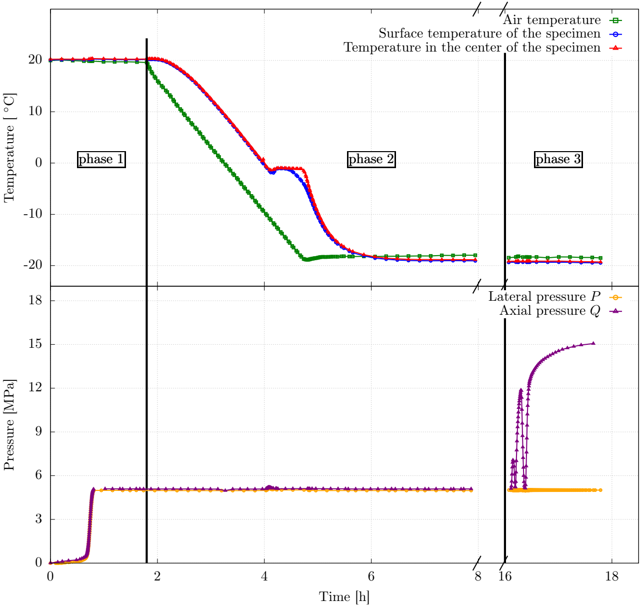
Problèmes au carottage

Problèmes à la saturation

Éprouvettes reconstituées (R)

Éprouvettes naturelles (N) : préparées à partir de carottes congelées

Phases d'un essai triaxial sur matériau congelé



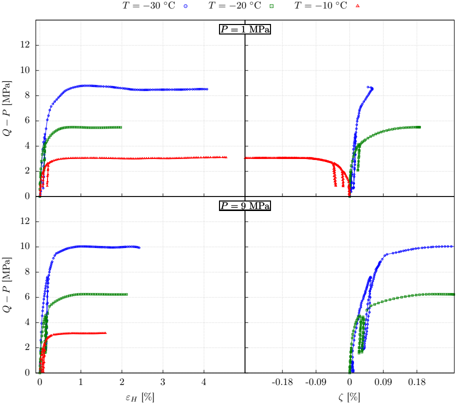
Campagne expérimentale

- Les conditions de température, de pression de confinement et de vitesse de déformation sont représentatives des conditions *in situ*.
- Douze essais triaxiaux sur des éprouvettes naturelles (N).
- Six essais triaxiaux sur des éprouvettes reconstituées (R).

Type d'éprouvette	Température (°C)	Pression de confinement (MPa)	Vitesse de déformation (10^{-6} s^{-1})
(N)	-10 ; -20 ; -30	1 ; 5 ; 9	4.5
(N)	-20	5	2.5 ; 4.5 ; 8
(R)	-10 ; -20 ; -30	1 ; 9	4.5

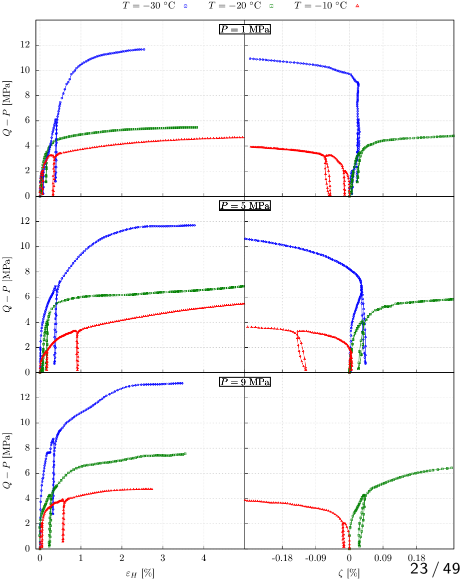
Effets de la température et de la pression de confinement

Éprouvettes reconstituées



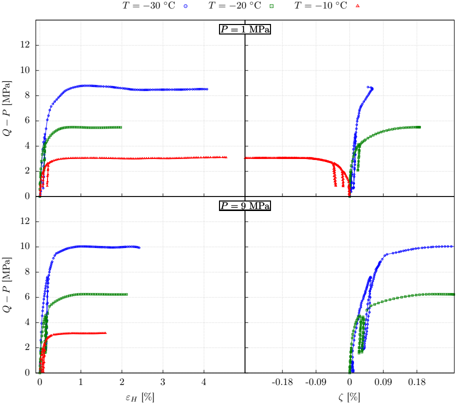
- Comportement naturel durcissant.

Éprouvettes naturelles



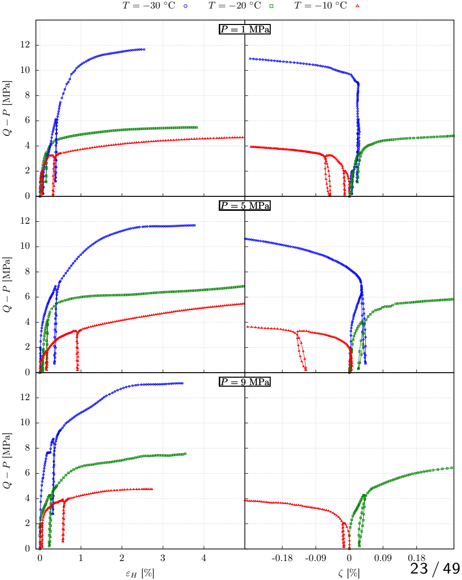
Effets de la température et de la pression de confinement

Éprouvettes reconstituées



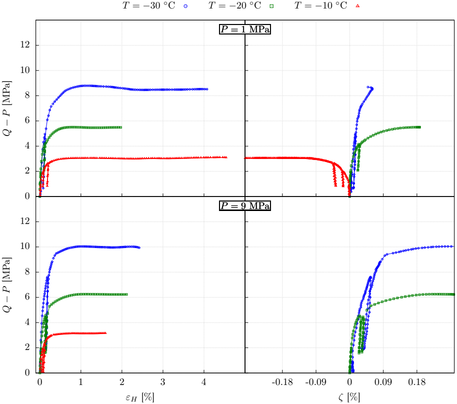
- Comportement naturel durcissant.
- La résistance à la compression augmente lorsque T diminue.

Éprouvettes naturelles



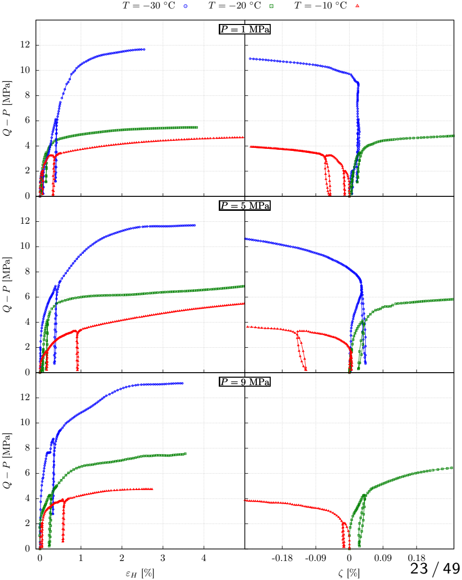
Effets de la température et de la pression de confinement

Éprouvettes reconstituées



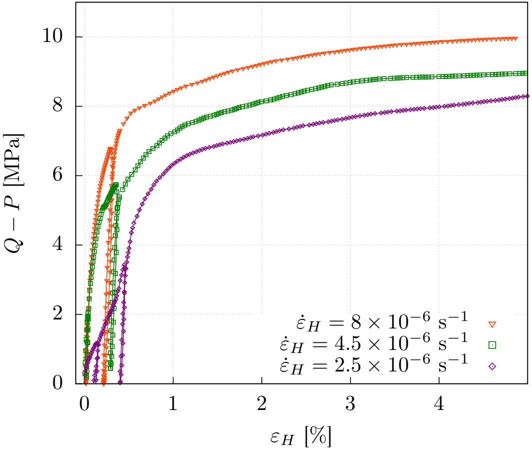
- Comportement naturel durcissant.
- La résistance à la compression augmente lorsque T diminue.
- L'apparition de la dilatance dépend de T.

Éprouvettes naturelles



Effet de la vitesse de déformation

Éprouvettes naturelles ($T = -20$ °C et $P = 5$ MPa)



$\Rightarrow$ Comportement élasto-viscoplastique : $\underline{\underline{\varepsilon}}^{\text{ne}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^{\text{vp}}$

Modèle constitutif élasto-viscoplastique

- Modèle de Rouabhi, 2019, enrichi par l'effet de la température.
- Approche phénoménologique.

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}_{\mathsf{vp}} = \sqrt{3/2}\; \dot{\gamma}_{\mathsf{vp}}\; \underline{\underline{\hat{\sigma}}}' / \| \underline{\underline{\hat{\sigma}}}' \| \; - 1/3\; \dot{\zeta}_{\mathsf{vp}}\; \underline{\underline{1}}$$

Modèle constitutif élasto-viscoplastique

- Modèle de Rouabhi, 2019, enrichi par l'effet de la température.
- Approche phénoménologique.

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}_{\mathsf{vp}} = \sqrt{3/2}\ \dot{\gamma}_{\mathsf{vp}}\ \underline{\underline{\hat{\sigma}}}'/\|\underline{\underline{\hat{\sigma}}}'\|\ -1/3\ \dot{\zeta}_{\mathsf{vp}}\ \underline{\underline{1}}$$

- Distorsion : $\dfrac{d\left(\gamma_{\mathsf{vp}}\right)^{1/a}}{dt} = \left(\varphi\left(p, q, \gamma_{\mathsf{vp}}, T\right)\right)^{1/a}$
- Déformation volumique : $\dot{\zeta}_{\mathsf{vp}} = \psi\left(p, \gamma_{\mathsf{vp}}, T\right)\ \dot{\gamma}_{\mathsf{vp}}$

$$\varphi\left(p, q, \gamma_{\mathsf{vp}}, T\right) = \left\langle \frac{q - {\gamma_{\mathsf{vp}}}^{b} Bp - C}{K(T)} \right\rangle^{k}\ ,\ \psi\left(p, \gamma_{\mathsf{vp}}, T\right) = v(T)\frac{\langle p/N(T)\rangle^{n} - \gamma_{\mathsf{vp}}}{\langle p/M(T)\rangle^{m} + \gamma_{\mathsf{vp}}}$$

Modèle constitutif élasto-viscoplastique

- Modèle de Rouabhi, 2019, enrichi par l'effet de la température.
- Approche phénoménologique.

$$\dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}_{\mathrm{vp}} = \sqrt{3/2}\ \dot{\gamma}_{\mathrm{vp}}\ \underline{\underline{\hat{\sigma}}}' / \|\underline{\underline{\hat{\sigma}}}'\| \ - 1/3\ \dot{\zeta}_{\mathrm{vp}}\ \underline{\underline{1}}$$

- Distorsion : $\dfrac{d\left(\gamma_{\mathrm{vp}}\right)^{1/a}}{dt} = \left(\varphi\left(p, q, \gamma_{\mathrm{vp}}, T\right)\right)^{1/a}$
- Déformation volumique : $\dot{\zeta}_{\mathrm{vp}} = \psi\left(p, \gamma_{\mathrm{vp}}, T\right)\ \dot{\gamma}_{\mathrm{vp}}$

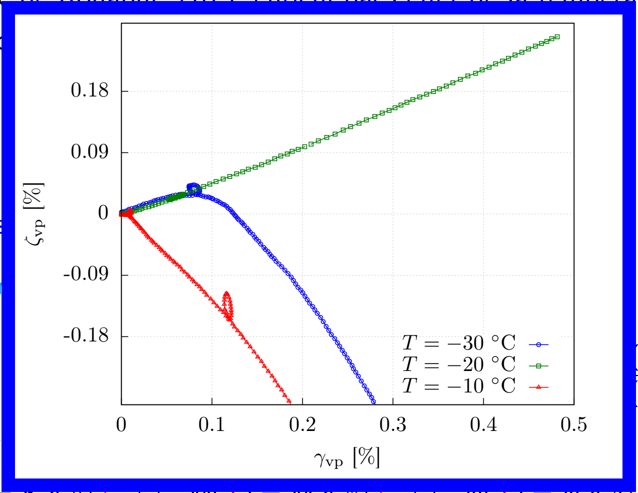
$$\varphi\left(p, q, \gamma_{\mathrm{vp}}, T\right) = \left\langle \frac{q - {\gamma_{\mathrm{vp}}}^{b} Bp - C}{K(T)} \right\rangle^{k}, \quad \psi\left(p, \gamma_{\mathrm{vp}}, T\right) = v(T) \frac{\langle p/N(T)\rangle^{n} - \gamma_{\mathrm{vp}}}{\langle p/M(T)\rangle^{m} + \gamma_{\mathrm{vp}}}$$

- Expressions de type Arrhénius pour K, M et N :

$$K(T) = K_{\mathrm{r}} e^{A_K\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\mathrm{r}}}\right)},\ M(T) = M_{\mathrm{r}} e^{A_M\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\mathrm{r}}}\right)},\ N(T) = N_{\mathrm{r}} e^{A_N\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\mathrm{r}}}\right)}$$

Modèle constitutif élasto-viscoplastique

- Modèle de Rouabhi, 2019, enrichi par l'effet de la température.
- Approc



- Distors
- Déforn

$\varphi\,(p, q, \gamma_{\mathrm{vp}},$ … $T))^{n} - \gamma_{\mathrm{vp}}$ / … $T))^{m} + \gamma_{\mathrm{vp}}$

- Expres

$K(T) = K_{\mathrm{r}}e$ … , $M(T) = M_{\mathrm{r}}e$ … , $N(T) = N_{\mathrm{r}}e$ … $\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\mathrm{r}}}\right)$

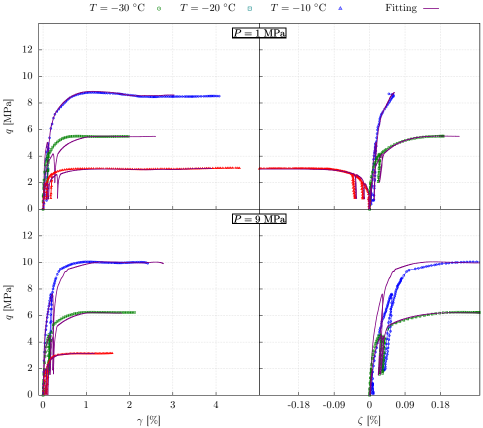
- Variation linéaire pour v : $v(T) = v_{\mathrm{cr}} + \alpha_v \left(1 - \dfrac{T}{T_{\mathrm{cr}}}\right)$

Ajustement des essais

- Hypothèses : état de contraintes homogène $(q = Q - P\ ,\ p = (2P + Q)/3)$ et conditions drainées $\left(\hat{\underline{\underline{\sigma}}} = \underline{\underline{\sigma}}\right)$.
- Les courbes de chaque type d'éprouvettes ont été ajustées avec un seul jeu de paramètres.
- Méthode d'ajustement :
  1. ajustement des paramètres élastiques **E** et $\boldsymbol{\nu}$ en utilisant les cycles de charge/décharge $\Rightarrow$ déduction des valeurs expérimentales de γ_{vp} et ζ_{vp} ;
  2. ajustement de la loi d'évolution de γ_{vp} ;
  3. ajustement de la loi d'évolution de ζ_{vp} de manière indépendante en utilisant les valeurs expérimentales de γ_{vp}.

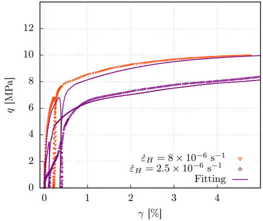
Exemples d'ajustement

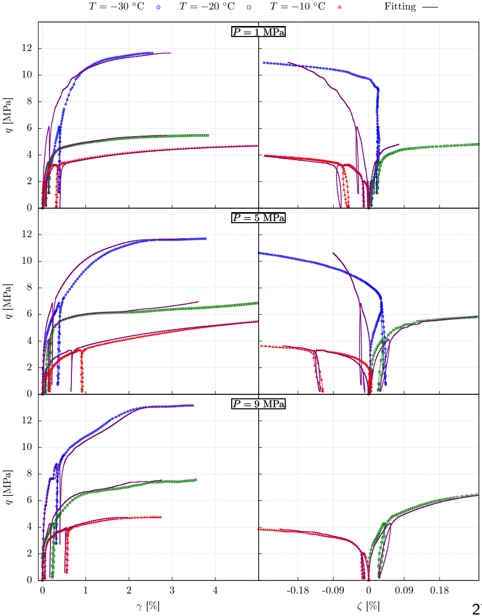
Éprouvettes reconstituées



Exemples d'ajustement

Éprouvettes naturelles



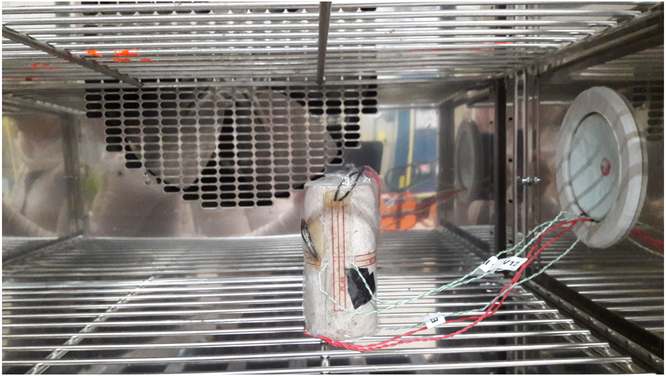


Plan de la présentation

Essais de gonflement libre

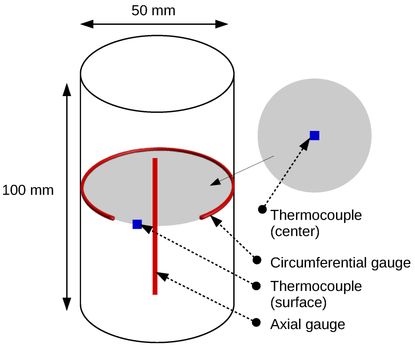
- **Objectif** : analyse de la déformation induite par le gel uniquement.

1. Saturation de l'éprouvette avec de l'eau pure ou avec une solution aqueuse de NaCl.
2. Congélation de l'éprouvette.



Essais de gonflement libre

- **Objectif** : analyse de la déformation induite par le gel uniquement.
- **Mesures** de température via des thermocouples et de la déformation via des jauges.

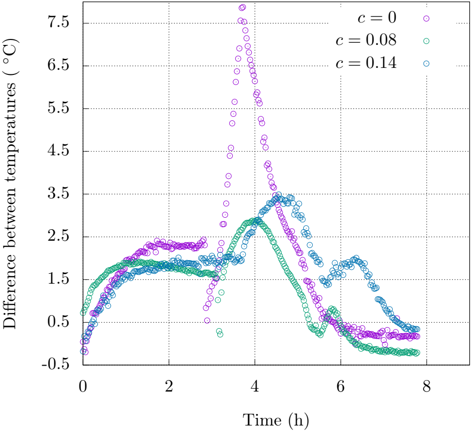


Essais de gonflement libre

- **Objectif** : analyse de la déformation induite par le gel uniquement.
- **Mesures** de température via des thermocouples et de la déformation via des jauges.
- **Matériau utilisé** : le calcaire d'Anstrude, pour :
  - sa porosité initiale (20%) ;
  - sa composition minérale (son homogénéité) ;
  - ses propriétés hydromécaniques (connues).

Essais de gonflement libre : méthode d'analyse

Différence entre les températures mesurées en surface et au centre de l'éprouvette.



- L'éprouvette est assimilée à une structure (modèle 2D axisymétrique).
- Code éléments finis utilisé : COMSOL Multiphysique.

Modélisation numérique des essais de gonflement

Conditions aux limites aux parois :

- $\overrightarrow{\psi}.\overrightarrow{n} = H\left(T - T_a\right)$, $p_\lambda = p_0$, $\overrightarrow{J}.\overrightarrow{n} = 0$

Modélisation numérique des essais de gonflement

Conditions aux limites aux parois :

- $\overrightarrow{\psi}.\overrightarrow{n} = H\left(T - T_a\right)$, $p_\lambda = p_0$, $\overrightarrow{J}.\overrightarrow{n} = 0$

Hypothèses :

- Pas de précipitation du sel : $c \leq c_{\mathrm{sat}}\left(T\right)$
- Matériau élastique : $\mathbf{E} = S_\lambda \mathbf{E}_0 + \left(1 - S_\lambda\right)\mathbf{E}_{\mathrm{f}}$, $\boldsymbol{\nu} = S_\lambda \boldsymbol{\nu}_0 + \left(1 - S_\lambda\right)\boldsymbol{\nu}_{\mathrm{f}}$

Modélisation numérique des essais de gonflement

Conditions aux limites aux parois :

- $\overrightarrow{\psi} . \overrightarrow{n} = H \left(T - T_a \right)$, $p_\lambda = p_0$, $\overrightarrow{J} . \overrightarrow{n} = 0$

Hypothèses :

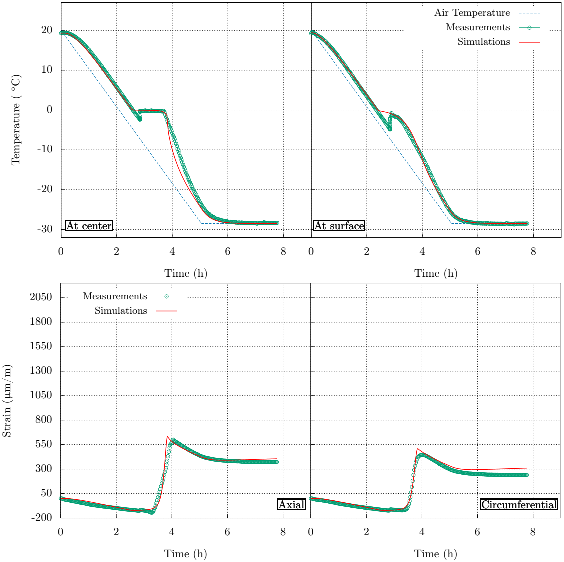
- Pas de précipitation du sel : $c \leq c_{\mathrm{sat}} \left(T \right)$
- Matériau élastique : $\mathbf{E} = S_\lambda \mathbf{E}_0 + \left(1 - S_\lambda \right) \mathbf{E}_{\mathrm{f}}$, $\boldsymbol{\nu} = S_\lambda \boldsymbol{\nu}_0 + \left(1 - S_\lambda \right) \boldsymbol{\nu}_{\mathrm{f}}$

Détermination des paramètres

- Conductivité thermique : $\Lambda = \Lambda_\sigma^{1-n} \Lambda_\lambda^{n S_\lambda} \Lambda_\gamma^{n(1 - S_\lambda)}$
- Viscosité dynamique : $\eta_\lambda = \eta_0 (T, p_\lambda) \left(1 + \sum a_i c^{b_i} \right)$
- Coefficient de dilatation thermique drainé $\mathcal{A}(T)$: à partir d'un essai de refroidissement sur éprouvette sèche
- Degré de saturation liquide : $S_\lambda (p_c) = \left(1 + \left(p_c / P \right)^{1/(1-m)} \right)^{-m}$
- Perméabilité relative : $k_{\mathrm{r}} \left(S_\lambda \right) = \sqrt{S_\lambda} \left(1 - \left(1 - S_\lambda^{1/r} \right)^r \right)^2$

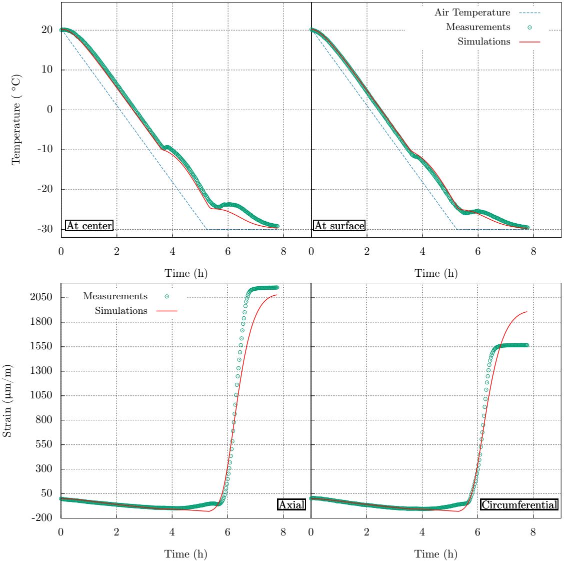
Effet de la salinité

c=0



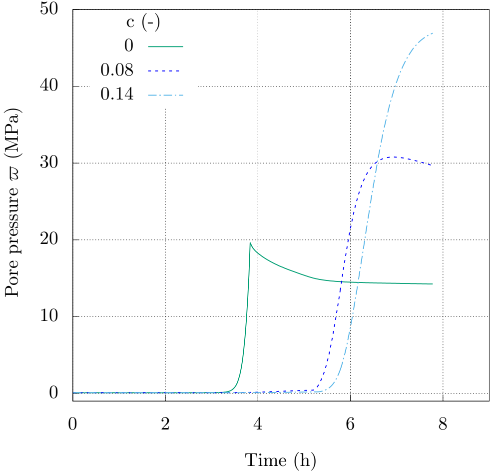
Effet de la salinité

c=0.14



Évolution de la pression de pore équivalente

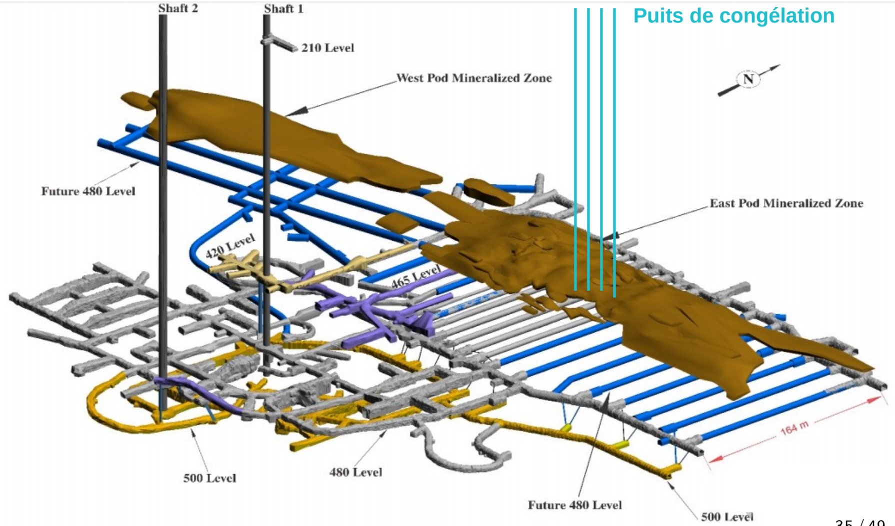
$$\dot{\hat{\underline{\underline{\sigma}}}} = \dot{\underline{\underline{\sigma}}} + B\dot{\varpi}\,\underline{\underline{1}}\ ,\ \varpi = p_\lambda + \int_0^{p_c} (1 - S_\lambda(x))\,\mathrm{d}x$$



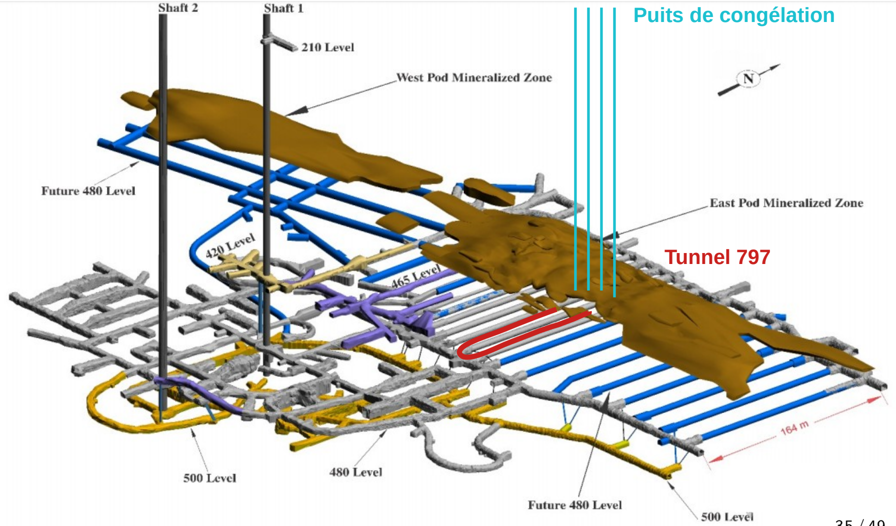
Pression de pore équivalente au centre de l'éprouvette

Plan de la présentation

Application à la mine de Cigar Lake



Application à la mine de Cigar Lake



Application à la mine de Cigar Lake : Étape 1

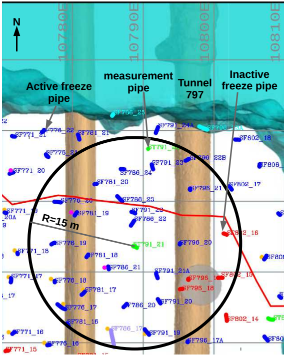
1. Analyser les mesures de température dans le massif et du déplacement dans le tunnel afin de sélectionner des sections qui permettent d'isoler l'influence de la congélation.

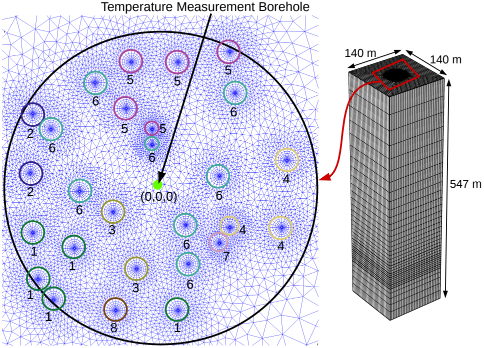
Application à la mine de Cigar Lake : Étape 2

2. Déterminer les paramètres thermo-hydro-mécaniques permettant d'expliquer les mesures de déplacement observées *in situ*, à partir :

    - de modèles hydrogéologiques de la mine (perméabilités) ;
    - d'essais mécaniques de laboratoire (modules de Young et coefficients de Poisson) ;
    - d'une analyse rétrospective des mesures de température afin de déterminer les paramètres (m,P) de $\mathcal{S}$.

Analyse rétrospective des mesures de température





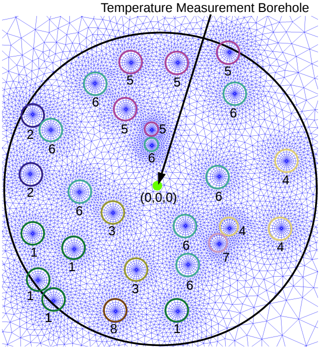
500000 éléments

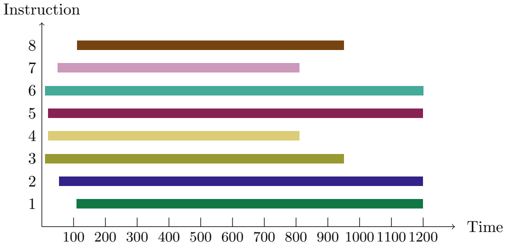
- Le puits de mesure de température comprend 8 thermocouples placés à différentes profondeurs.

Analyse rétrospective des mesures de température

Conditions aux limites :

- Aux parois des puits : $\overrightarrow{\psi} . \overrightarrow{n} = H_c \, (T - T_c)$



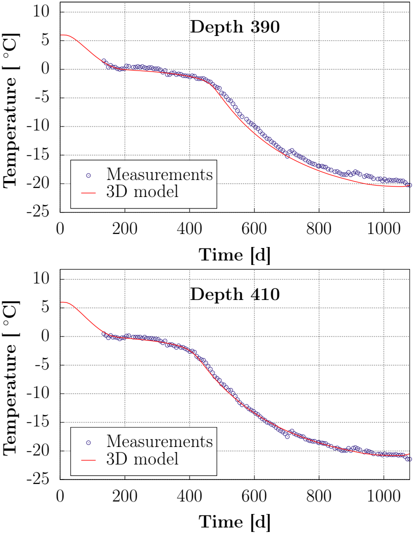


Température consigne du réfrigérant T_c

- A l'interface air/terrain : $\overrightarrow{\psi} . \overrightarrow{n} = H_a \, (T - T_a)$
- A l'infini : $T = T_{ini}$, débit nul.

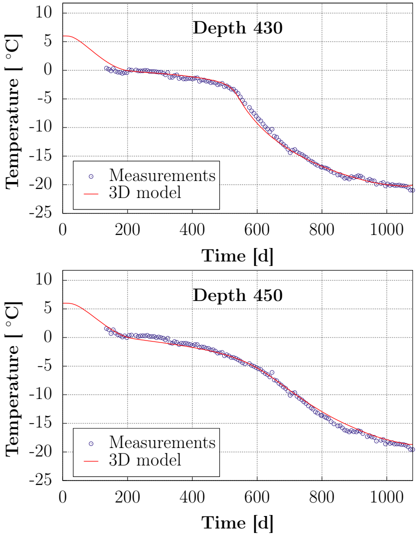
Analyse rétrospective des mesures de température

Résultats des simulations TH :



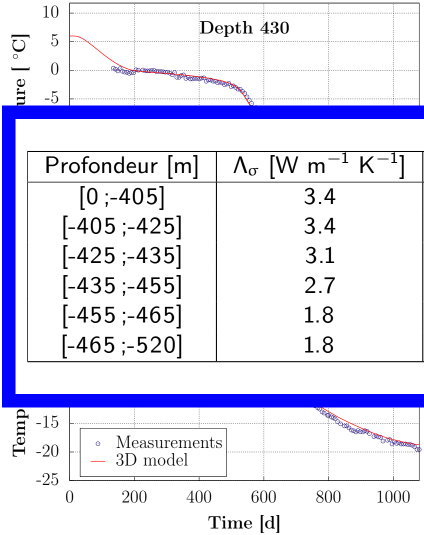
Analyse rétrospective des mesures de température

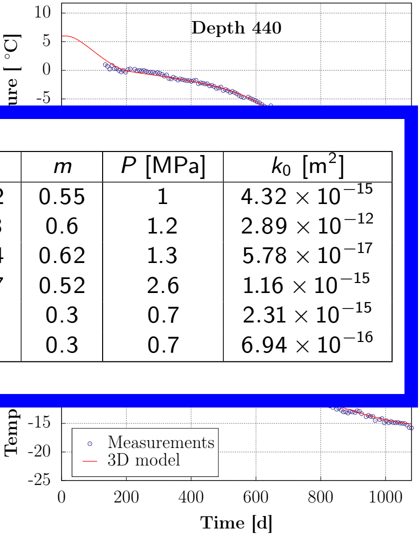
Résultats des simulations TH :



Analyse rétrospective des mesures de température

Résultats des simulations TH :





Profondeur [m]	Λ_σ [W m^{-1} K^{-1}]	n	m	P [MPa]	k_0 [m^2]
[0 ;-405]	3.4	0.22	0.55	1	4.32×10^{-15}
[-405 ;-425]	3.4	0.18	0.6	1.2	2.89×10^{-12}
[-425 ;-435]	3.1	0.24	0.62	1.3	5.78×10^{-17}
[-435 ;-455]	2.7	0.27	0.52	2.6	1.16×10^{-15}
[-455 ;-465]	1.8	0.2	0.3	0.7	2.31×10^{-15}
[-465 ;-520]	1.8	0.2	0.3	0.7	6.94×10^{-16}

Application à la mine de Cigar Lake : Étape 3

3. Simulations thermo-hydro-mécaniques de l'excavation de l'ouvrage souterrain sous un massif soumis à la congélation.

    - Challenge majeur : la forme élancée des puits de congélation : $R = 57.15$ mm, $H = 465$ m $\Rightarrow$ un nombre important d'éléments du maillage.

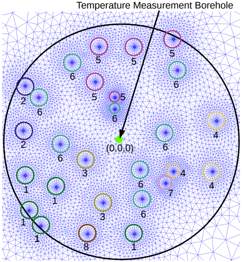
Application à la mine de Cigar Lake : Étape 3

Simplification de la géométrie :

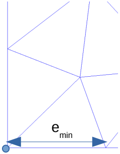
Piste de solution étudiée

Substitution des puits de congélation cylindriques par des lignes.

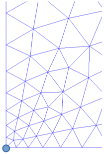
Source surfacique



Source linéique maillage grossier



Source linéique maillage fin



Calcul	Nombre d'éléments	Nombre de degrés de liberté	Temps de calcul	erreur maximum absolue [$^\circ$C]
Source surfacique	15569	78674	$t_s = 148$ s	-
Source linéique ($e_{min} = 10R_p$)	7740	34489	$1.17 \times t_s$	0.5
Source linéique ($e_{min} = R_p$)	16830	73255	$2.09 \times t_s$	0.75

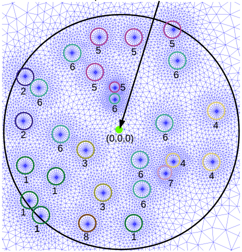
Application à la mine de Cigar Lake : Étape 3

Simplification de la géométrie :

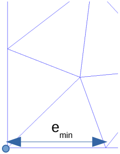
Piste de solution étudiée

Substitution des puits de congélation cylindriques par des lignes.

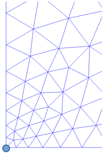
Source surfacique



Source linéique maillage grossier



Source linéique maillage fin



Calcul	Nombre d'éléments	Nombre de degrés de liberté	Temps de calcul	erreur maximum absolue [°C]
Source surfacique	15569	78674	$t_s = 148$ s	-
Source linéique ($e_{min} = 10R_p$)	7740	34489	$1.17 \times t_s$	0.5
Source linéique ($e_{min} = R_p$)	16830	73255	$2.09 \times t_s$	0.75

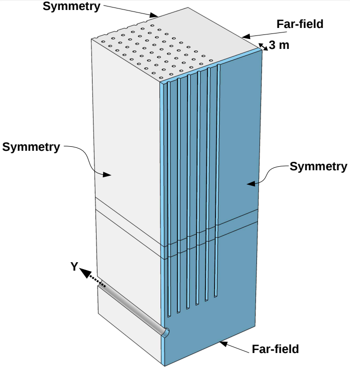
$\Rightarrow$ Piste écartée

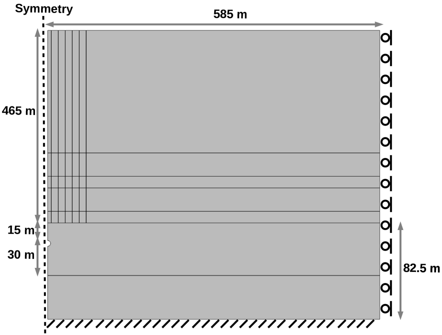
Application à la mine de Cigar Lake : Étape 3

Simplification de la géométrie :

Piste retenue

- On suppose que la grille de puits de congélation est régulière avec un espacement moyen de 6 m.
- On suppose que le tunnel et la grille sont infinis dans la direction (Y).

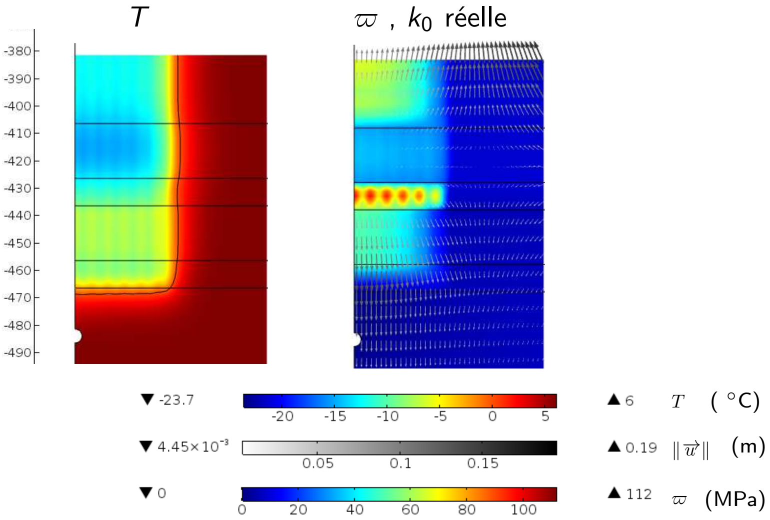




5,643,949 degrés de libertés

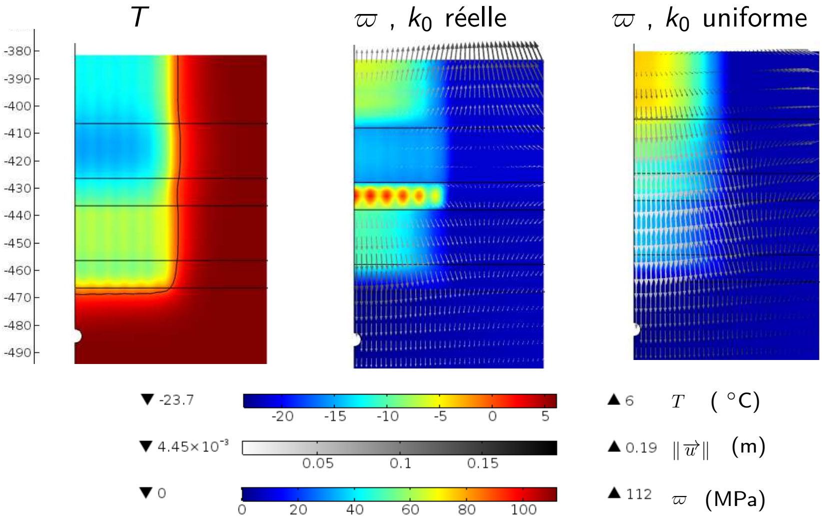
Application à la mine de Cigar Lake : Étape 3

Résultats : à 700 jours



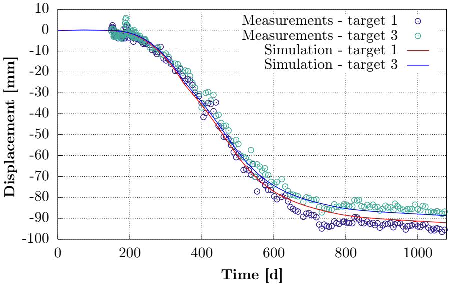
Application à la mine de Cigar Lake : Étape 3

Résultats : à 700 jours



Application à la mine de Cigar Lake : Étape 3

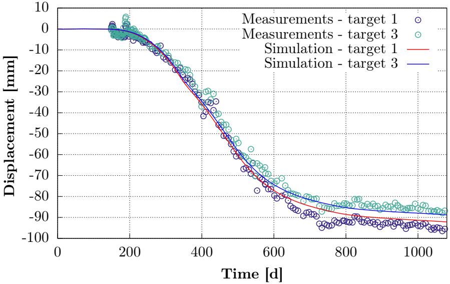
Résultats :

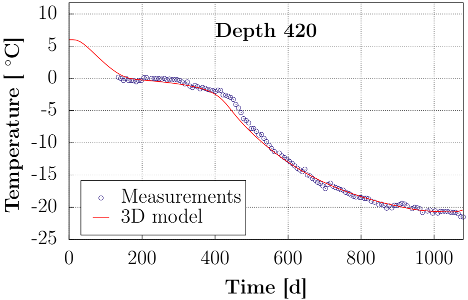


	Grès	Roche de base S26
$\mathbf{E}_0$ [MPa]	250	3500
$\mathbf{E}_f$ [MPa]	1125	15750
$\boldsymbol{\nu}$	0.4	0.25
$\mathcal{A}$ [$^\circ$C $^{-1}$]	10×10^{-6}	

Application à la mine de Cigar Lake : Étape 3

Résultats :





Plan de la présentation

Conclusion

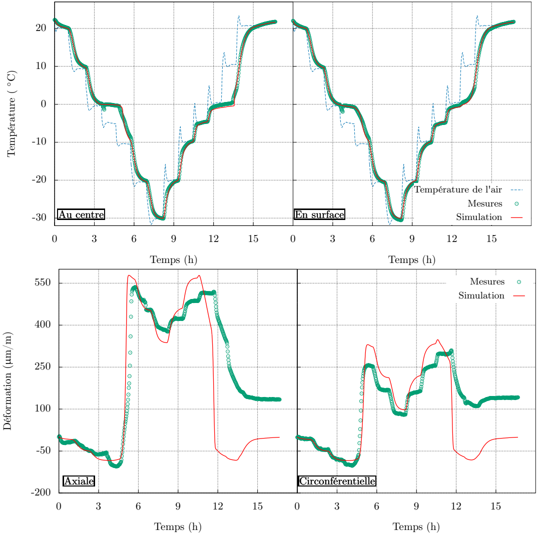
1. **Proposition d'un modèle THMC de la congélation artificielle des terrains**.

2. **Mise en place d'un dispositif expérimental qui nous a permis de mieux comprendre les phénomènes physiques liés à la congélation des sols et de formuler une loi de comportement phénoménologique.**

3. **Validation du modèle THMC à l'échelle du laboratoire et à l'échelle de l'ouvrage.**

Perspectives

Modélisation



Perspectives

Modélisation

- étudier la validité de la fonction $\mathcal{S}(p_c)$ pour un dégel ;
- étudier le phénomène de cristallisation de sel dans les pores lors du gel.

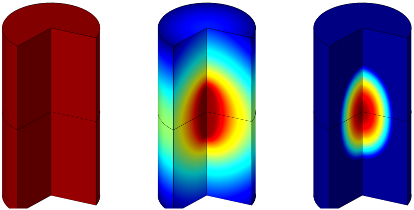
Perspectives

Modélisation

- étudier la validité de la fonction $\mathcal{S}(p_c)$ pour un dégel ;
- étudier le phénomène de cristallisation de sel dans les pores lors du gel.

Expérimentation

- assurer un meilleur contrôle de la température de l'huile de confinement pour pouvoir exploiter les mesures de variation de volume d'huile ;
- congeler les échantillons du centre vers l'extérieur pour reproduire la propagation thermique radiale lors de l'utilisation de la technique de la congélation artificielle.



Perspectives

Modélisation

- étudier la validité de la fonction $\mathcal{S}(p_c)$ pour un dégel ;
- étudier le phénomène de cristallisation de sel dans les pores lors du gel.

Expérimentation

- assurer un meilleur contrôle de la température de l'huile de confinement pour pouvoir exploiter les mesures de variation de volume d'huile ;
- congeler les échantillons du centre vers l'extérieur pour reproduire la propagation thermique radiale lors de l'utilisation de la technique de la congélation artificielle.

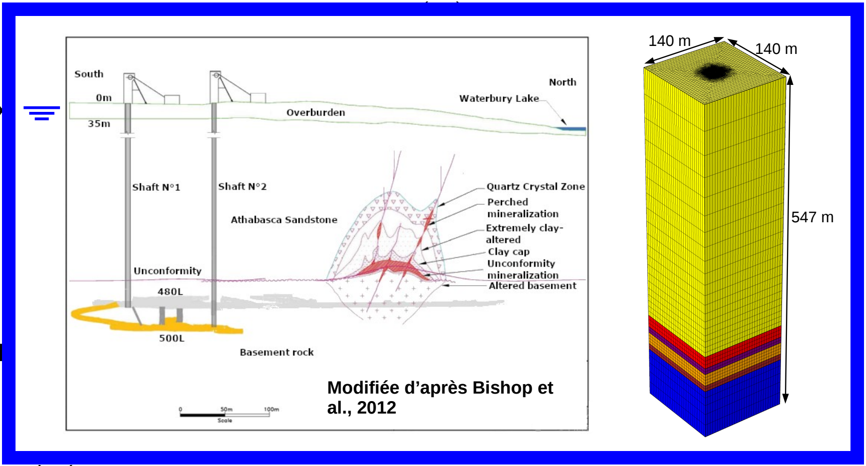
Application à la mine de Cigar Lake

- mettre en place un test pilote pour isoler l'effet de la congélation ;
- améliorer la performance numérique de la solution de sources de chaleur linéiques ;
- tenir compte des hétérogénéités réelles des terrains dans la mine.

Perspectives

Modélisation

Ex



Ap

linéiques ;

- tenir compte des hétérogénéités réelles des terrains dans la mine.

Publications

Articles publiés

Tounsi, H., Rouabhi, E., Jahangir, M., & Guérin, F. (2020).**Mechanical behavior of frozen Metapelite : Laboratory investigation and constitutive modeling**. *Cold Regions Science and Technology*.

Tounsi, H., Rouabhi, A., Jahangir, E. (2020). **Thermo-Hydro-Mechanical modeling of artificial ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid**. *Computers and Geotechnics*.

Tounsi, H., Rouabhi, A., Tijani, M., & Guérin, F. (2019). **Thermo-Hydro-Mechanical modeling of artificial ground freezing : Application in mining engineering**. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.

Rouabhi, A., Jahangir, E., & **Tounsi, H.** (2018). **Modeling heat and mass transfer during ground freezing taking into account the salinity of the saturating fluid**. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 523-533.

Communications dans des congrès

Tounsi, H. & Rouabhi, A. **Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Modeling of Artificial Ground Freezing : Application to a Mine in a Complex Hydrogeological Context**. *Coufrac 2020, November 11-13, 2020, Seoul, Korea*.

Tounsi, H., Rouabhi, A., Tijani, M., & Guérin, F. **3D Numerical modeling of artificial ground freezing in mining engineering**. *Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress, May 3-9, 2019, Naples, Italy*.

Merci pour votre attention