

## Comportement au gel-dégel d'une structure en ciment

Antonin Fabbri, Teddy Fen-Chong, Olivier Coussy & Aza Azouni

Institut Navier, UMR 113 LCPC – CNRS – ENPC  
Laboratoire des Matériaux et Structures du Génie Civil  
2, allée Kepler, 77420 Champs-sur-Marne  
fabbri@geologie.ens.fr

### Résumé :

*Ce travail vise à l'étude du comportement au gel-dégel des matériaux cimentaires. Le modèle poromécanique développé dans cette optique permet d'étudier l'influence sur la mécanique du couplage entre le changement de phase eau/glace, les transports en milieu poreux, la conduction thermique et le comportement de chacune des phases en présence. Nous pouvons ainsi prédire une pression de pore maximale au voisinage de la surface soumise au gel-dégel pouvant induire un endommagement localisé superficiel. Par la suite, l'influence relative des différents phénomènes physiques responsables de l'endommagement au gel-dégel est étudiée, permettant d'identifier les pressions hydrauliques de Powers comme prépondérantes.*

### Abstract :

*This study aims at investigating the behaviour of a cementitious structure submitted to frost action. The model allows coupling the liquid/ice crystal thermodynamic equilibrium, Darcy water transport, thermal conduction and thermoelastic properties of the different phases that form the porous material. It predicts that the maximum pore overpressure is reached near the surface, which can result in local damage. Then, the relative influences of the physical processes that produce frost defacement are investigated and the Powers' hydraulic pressure is found to be the most prejudicial one.*

### Mots-clés :

**Gel-dégel, poromécanique, perméabilité.**

### 1 Introduction

Un des défis de la recherche appliquée au génie civil est l'optimisation de la durée de vie des matériaux et structures ainsi que la mise au point de méthodes de certification rapides, peu coûteuses et sûres. Dans ce contexte, la politique de surveillance des ouvrages d'art instaurée en France à partir du début des années 1980 a mis en évidence des dégradations dues à l'action du froid dans plusieurs régions. Ainsi, un bon nombre de gestionnaires d'ouvrages sont confrontés aux conséquences, quelquefois très pénalisantes, des cycles de gel-dégel sur la durabilité du béton.

L'endommagement par le gel se présente sous deux formes : l'endommagement interne et l'écaillage (Marchand *et al.*, (1994)). L'endommagement interne se manifeste par la formation de microfissures au sein du matériau. Ses résistances mécaniques et aux transferts (i.e. perméabilité, coefficient de diffusion) se trouvent ainsi diminuées. L'écaillage se manifeste par un endommagement superficiel. En plus d'une dégradation esthétique de l'ouvrage, ce phénomène augmente sensiblement la perméabilité de surface et réduit l'épaisseur de recouvrement des aciers. Il favorise ainsi l'intrusion de substances délétères au sein du matériau et augmente le risque de corrosion des armatures. Notons que l'écaillage est favorisé et magnifié

par la présence de sels de déverglaçage. C'est pourquoi des dégradations caractéristiques au gel-dégel sont observées dans des régions de froid modéré mais où la praticabilité hivernale du réseau routier impose un salage fréquent.

Depuis les années 1930 (date des premiers travaux de Powers sur le gel des matériaux cimentaires), de nombreuses études théoriques et expérimentales ont été menées afin d'expliquer les dégradations des bétons par l'action du froid. Il a ainsi été montré que, lors du gel, l'ensemble de la solution interstitielle ne gèle pas à la même température, notamment en raison d'un confinement non homogène, la taille des pores variant du nanomètre au millimètre. Le matériau contient donc de l'eau restée liquide et de la glace dans le cas d'un milieu initialement saturé en eau. Les détériorations sont alors attribuées au couplage entre l'augmentation volumique de 9% due à la solidification de l'eau des pores et le transport de l'eau non gelée au sein du réseau poreux. De nos jours, même si la plupart des mécanismes semblent avoir été identifiés et compris, il manque une étude globale permettant d'évaluer l'influence relative de chaque mécanisme sur le comportement mécanique d'une structure soumise au gel-dégel. L'approche poromécanique développée dans cette étude s'inscrit dans cette problématique.

## 2 Poromécanique d'un milieu poreux partiellement gelé

### 2.1 Equilibre liquide-glace

Nous supposons que la glace est un solide élastique homogène isotrope soumis à un champ de contrainte hydrostatique. Dans ce cas, les équations constitutives de l'eau liquide ( $l$ ) et de la glace ( $c$ ) s'écrivent (Coussy, (2004)):

$$d\left(\frac{1}{\rho_j}\right) = \frac{1}{K_j} dp_j + \alpha_j dT ; ds_j = \frac{c_j}{T} dT - \frac{\alpha_j}{\rho_j} dp_j \quad (1)$$

avec  $K_j$ ,  $\alpha_j$ , et  $c_j$  le module de compressibilité isotherme, le coefficient de dilatation volumique et la capacité calorifique massique de la phase  $j$ , tandis que  $\rho_j$ ,  $p_j$ , et  $s_j$  sont respectivement la masse volumique, la pression et l'entropie massique de cette même phase.

L'équilibre thermodynamique entre l'eau et la glace nécessite l'égalité de leur potentiel chimique. Sa différentiation, combinée avec (1) et sous l'hypothèse de petite différence de masse volumique entre l'eau et la glace donne (Fabbri *et al.*, 2006) :

$$p_{cap} = S_f(T_0 - T) + C_f \left( T - T_0 + T \ln \frac{T_0}{T} \right) \quad (2)$$

où  $S_f = \rho_c^0 (s_l^0 - s_c^0)$  et  $C_f = \rho_c^0 (c_{p,l}^0 - c_{p,c}^0)$  sont respectivement l'entropie de fusion et la différence de capacité entre l'eau liquide et la glace par unité de volume de cristal de glace, tandis que  $p_{cap} = p_c - p_l$  représente la pression capillaire.

### 2.2. Equations constitutives du squelette solide

Considérons qu'à l'état initial,  $\underline{\underline{\sigma}}(\underline{x}, 0) = 0$ ,  $\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{x}, 0) = 0$ ,  $p_l(\underline{x}, 0) = p_c(\underline{x}, 0) = 0$ ,  $\varphi_j(\underline{x}, 0) = 0$ ,  $S(\underline{x}, 0) = S$ ,  $\underline{\underline{\sigma}}$  étant le tenseur de contrainte,  $\underline{\underline{\varepsilon}}$  le tenseur de déformation,  $\varphi_j$  la variation de porosité partielle de la phase  $j=l,c$  définie dans Coussy, (2005); et  $S$  l'entropie volumique du squelette solide. En supposant que les propriétés de la matrice solide sont constantes lors d'un cycle de gel-dégel, les équations constitutives du squelette solide s'écrivent :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \left( K - \frac{2}{3} G \right) \underline{\underline{\varepsilon}} \mathbb{1} + 2G \underline{\underline{\varepsilon}} - \left( \sum_{j=l,c} (b_j p_j) + \alpha K (T - T_0) \right) \underline{\underline{\mathbb{1}}} \quad (3a)$$

$$\varphi_j = b_j \varepsilon + \frac{1}{N_{jl}} p_l + \frac{1}{N_{jc}} p_c - \alpha_{\phi_j} (T - T_0); j = l \text{ or } c \quad (3b)$$

$$S - S_0 = \alpha K \varepsilon - \sum_{j=l,c} (\alpha_{\phi_j} p_j) + C_m \ln \frac{T}{T_f} \quad (3c)$$

où  $\varepsilon = tr(\underline{\underline{\varepsilon}})$  est la déformation volumique;  $K$ ,  $G$ ,  $C_m$  et  $\alpha$  sont respectivement le module de compressibilité, le module de cisaillement, la capacité calorifique, le coefficient de dilatation volumique du squelette solide; les  $b_j$  et  $N_{ij}$  sont les modules et coefficients de Biot généralisés et  $\alpha_{\phi_j}$  le coefficient de dilatation de la porosité occupée par la phase  $j$ . Ces trois derniers coefficients dépendent des propriétés thermo-élastiques du milieu poreux et des saturations en liquide et en glace (Coussy et Monteiro, (2006)):

$$\frac{1}{N_{jj}} + \frac{1}{N_{lc}} = \frac{b_j - \phi_0 S_j}{K_m}; b_c + b_l = 1 - \frac{K}{K_m}; \alpha_{\phi_j} = \alpha (b_j - \phi_0 S_j); b_j = S_j b = S_j \left( 1 - \frac{K}{K_m} \right) \quad (4)$$

Avec  $K_m$  le module de compressibilité de la matrice solide,  $S_j$  le degré de saturation de la phase  $j$ , et  $\phi_0$  la porosité initiale.

### 2.3 Conservation de la masse d'eau

La conservation de la masse d'eau totale (i.e. sous ses formes liquide et solide) d'un VER, combinée aux relations (1-4) et sous l'hypothèse des petites déformations mène à l'expression :

$$\text{div} \left[ \rho_l^0 \frac{\kappa(S_l)}{\eta_l(T, p_l)} \underline{\underline{\text{grad}}}(p_l) \right] = \frac{\partial}{\partial t} [A p_l] + \frac{\partial}{\partial t} [\Sigma_{\Delta p} + \Sigma_T + \Sigma_{p_{cap}}] \quad (5)$$

avec  $\underline{\underline{\omega}} = -\rho_l^0 \kappa(S_l) / \eta_l(T, p_l) \underline{\underline{\text{grad}}}(p_l)$  le vecteur flux massique d'eau liquide,  $\kappa(S_l)$  la perméabilité du milieu poreux et  $\eta_l(T, p_l)$  la viscosité de l'eau liquide, tandis que  $A = \phi_0 S_c (1/K_c - 1/K_l) + b^2/K + (b - \phi_0)/K_m + \phi_0/K_l$ . Le terme source de pression est divisé en trois contributions distinctes :  $\Sigma_{\Delta p} = \phi_0 S_c (\rho_c^0 / \rho_l^0 - 1)$  résulte de l'expansion volumique de 9% lors du gel dû à la différence de densité entre l'eau et la glace (pressions hydrauliques),  $\Sigma_T = \phi_0 ((\alpha - \alpha_l) + S_c (\alpha_l - \alpha_c)) (T - T_0)$  traduit l'effet des contraintes thermiques, et  $\Sigma_{p_{cryo}} = p_{cap} (\phi_0 S_c (1/K_m - 1/K_c) - b_c (b/K + 1/K_m))$  représente l'action de l'aspiration cryogénique (mouvement de l'eau restée liquide vers le cristal de glace à l'échelle microscopique).

### 2.4 Conduction thermique

Conformément à la loi de Fourier, le flux de chaleur ( $\underline{\underline{q}}$ ) est relié à la température ( $T$ ) par la relation :  $\underline{\underline{q}} = -\lambda(S_l) \frac{\partial T}{\partial x} \underline{\underline{x}}$ , où  $\lambda(S_l)$  est la conductivité thermique isotrope. Cette dernière est estimée à partir de la conductivité thermique de chacun des constituants suivant le modèle (n+1)-phases développé par Hervé, (2002). Sous ces conditions, le second principe de la thermodynamique appliqué au milieu poreux dans le cadre d'une transformation irréversible donne :

$$\text{div} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \underline{\underline{x}} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \left[ (C_m + \phi_0 (C_{pl} - S_c C_f)) - T \phi_0 \left( S_f + C_f \ln \frac{T}{T_f} \right) \frac{\partial S_c}{\partial T} \right] \quad (6)$$

où  $-T \phi_0 (S_f + C_f \ln T/T_f) \partial S_c / \partial T$  représente la chaleur latente de changement de phase eau/glace,  $C_{pl} = \rho_l^0 c_{p,l}^0$  la capacité calorifique volumique de l'eau, et  $C_m + \phi_0 (C_{pl} - S_c C_f)$  la capacité calorifique moyenne du milieu poreux.

### 3. Résultats numériques

#### 3.1. Conditions aux limites

L'échantillon est modélisé comme une structure unidimensionnelle composée d'un milieu isotrope de longueur  $L$  et de section  $S$ . Le système de coordonnées  $(O,x)$  est utilisé,  $O$  étant situé au niveau de la surface soumise aux cycles de gel-dégel. L'analyse sera faite en utilisant le volume élémentaire  $d\Omega = Sdx$ .

L'échantillon est initialement à 273.15 K. A  $t=0$ , la surface  $x=0$  est soumise à une décroissance en température de 20°C en 2 heures précédant un palier en température de 1 heure puis une remontée en température de 20°C en deux heures. La surface  $x=L$  est, quant à elle, mise à la température  $T_b = 283.15K$ . Ce fort gradient thermique a été imposé afin d'accentuer au maximum l'effet structural de l'échantillon.

Dans cette étude, on n'applique aucune contrainte mécanique extérieure à l'échantillon. Ainsi, la contrainte dans la matrice solide ne sera due qu'aux surpressions de pores causées par la solidification progressive du liquide interstitiel.

Nous supposons enfin qu'une couche de glace imperméable est formée au niveau de la surface soumise au gel-gel (ce qui correspond aux conditions des essais normalisés pour la tenue à l'écaillage des matériaux cimentaires). Dans ce cas, aucun flux d'eau ne se produit au travers de cette surface. Ainsi, la condition limite en flux d'eau en  $x=0$  s'exprime par  $\underline{\omega} \cdot \underline{n}_0 = 0$  avec  $\underline{n}_0$  le vecteur unitaire sortant perpendiculaire à la surface  $x=0$ .

#### 3.2. Résolution numérique

Le système d'équation non-linéaire (5-6) est résolu suivant la méthode des volumes finis présentée dans Eymard *et al.*, (2000).

Les calculs sont fait pour une pâte de ciment de rapport  $E/C=0,4$  de perméabilité intrinsèque égale à  $4,3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ . La perméabilité relative est estimée par le schéma différentiel auto-cohérent présenté dans Dormieux et Bourgeois, (2003), en supposant que les cristaux de glace sont de perméabilité nulle. Les profils de température, saturation en glace, pression de glace et pression d'eau obtenus sont reportés en figure 1.

Lors de la phase de gel, une augmentation de la surpression du liquide et de la glace au voisinage de la surface  $x=0$  est prédite. Les pressions atteintes au bout de 3 heures de test (30 MPa pour la glace et 8 MPa pour le liquide) sont du même ordre de grandeur que la résistance en traction des matériaux cimentaires (qui est autour de 10 MPa pour une pâte de ciment durcie de rapport  $E/C=0.4$  selon Taylor, (1997)). Nous pouvons ainsi prédire un endommagement localisé au voisinage de la surface soumise au gel. Remarquons que les suppressions restent localisées en raison de la faible perméabilité du milieu poreux étudié. Comme expliqué dans Fabbri *et al.*, 2007, dans un matériau plus perméable la surpression de pore serait réduite et s'étendrait à l'ensemble de la structure.

Il existe un hystérésis entre les courbes de pressions en gel et en dégel. Ceci est dû à un hystérésis dans l'évolution de la quantité de glace présente dans le matériaux en fonction de la température combiné au transport de liquide à l'échelle de la structure qui tend à faire migrer l'eau en surface vers le cœur de l'échantillon.

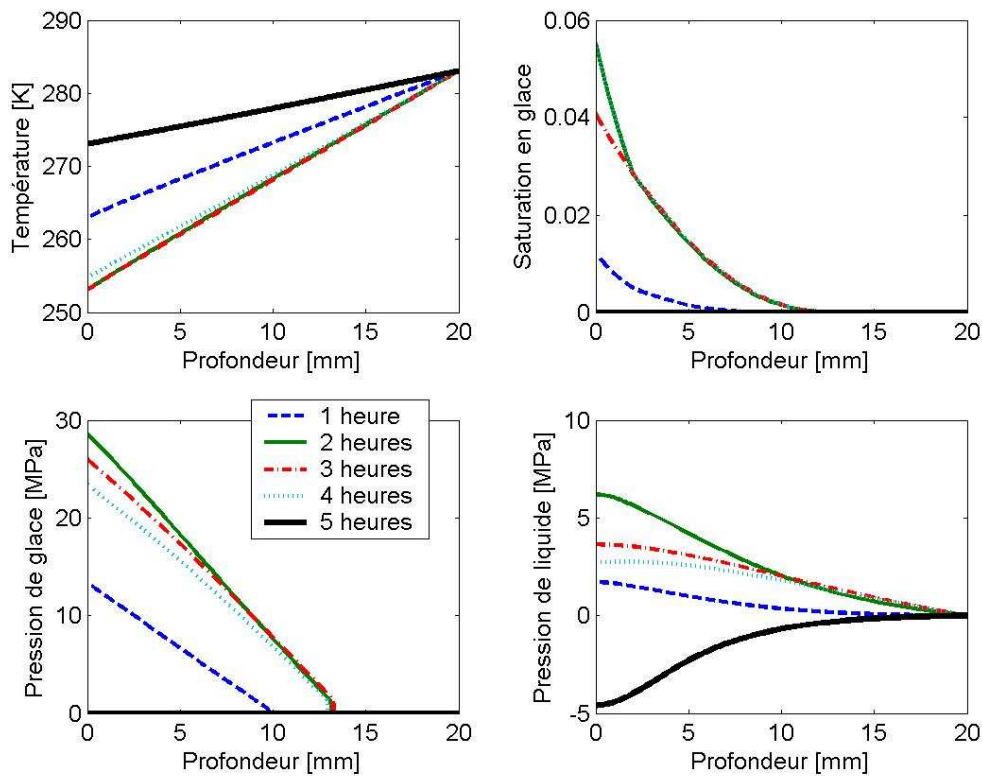


FIG 1: Température, degré de saturation en glace et pressions de liquide et de glace prédits par le modèle pour une pâte de ciment durcie de rapport E/C=0.4.

#### 4. Origine physique de l'endommagement au gel-dégel

L'équation (5) met en évidence que l'endommagement par le gel-dégel peut être attribué à la combinaison des pressions hydrauliques, des contraintes thermiques et de l'aspiration cryogénique. Par le biais du model développé dans cette étude, il est maintenant possible d'étudier l'importance relative de chacune de ces trois contributions. Afin de mener à bien cette comparaison, nous avons utilisé la contrainte dans la matrice solide ( $\sigma_m$ ). Comme reporté dans Coussy, (2004), dans le cas unidimensionnel considéré ici, cette dernière s'exprime comme :

$$\sigma_m = \frac{\sigma - (\phi_l p_l + \phi_c p_c)}{1 - \phi_0} \quad (7)$$

Les résultats obtenus sont reportés en figure 2.

Soit  $\Delta r$  la différence relative entre  $\sigma_m$  obtenu par le calcul complet et celui obtenu en négligeant un des termes source de pression. Lorsque l'on néglige  $\Sigma_{cryo}$ ,  $\Delta r$  est égal à 15% ; lorsqu'on néglige  $\Sigma_T$ ,  $\Delta r$  est égal à 25% ; et enfin, lorsqu'on néglige  $\Sigma_{\Delta p}$ ,  $\Delta r$  est égal à 55%. Ainsi, les pressions hydraulique appraissent comme l'effet le plus important vis-à-vis de l'endommagement au gel-dégel des matériaux cimentaire. C'est pourquoi l'utilisation d'un agent entraîneur d'air est si efficace pour améliorer la tenue au gel-dégel. L'effet des contraintes thermiques ne peut pas non plus être négligé. Enfin, l'effet de l'aspiration cryogénique apparait comme mineur vis-à-vis des deux autres.

En fait, l'importance des pressions hydrauliques dans les matériaux cimentaires peut s'expliquer par le caractère consolidé, rigide (module d'Young de l'ordre de 50 GPa) et résistant à la

tension (jusqu'à 5-10 MPa) du ciment. Ainsi, contrairement à ce qui est communément observé dans la cryo-succion des sols, la surpression de glace ne peut être dissipée par une grande modification de la microstructure qui mènerait à la création de lentilles de glace.

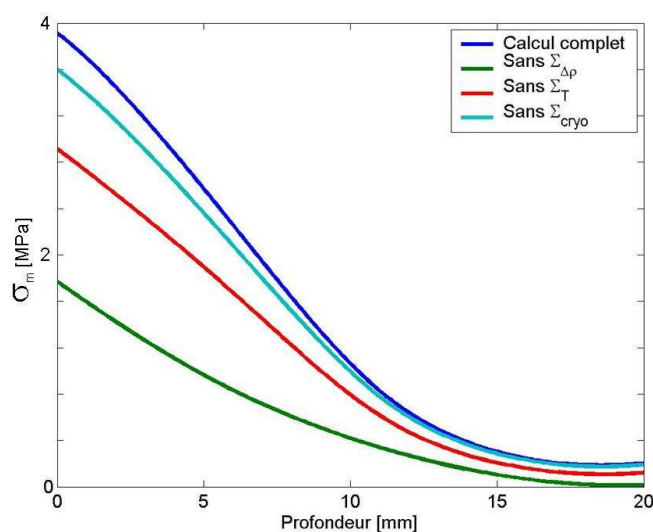


FIG. 2: Influence de chacun des termes source de pression sur  $\sigma_m$ .

## 6. Conclusion

Nous avons étudié le comportement au gel-dégel des matériaux cimentaires d'une structure poreuse. L'approche poromécanique retenue nous a alors permis d'investiguer l'influence relative des différents phénomènes physiques responsables de l'endommagement au gel-dégel des matériaux cimentaires

## Références

- O. Coussy, 2004, *Poromechanics*. John Wiley & Sons.
- O. Coussy, 2005, Poromechanics of freezing materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, p. 1689-1718.
- O. Coussy, Paulo J.M. Monteiro, 2006, Unsaturated poroelasticity for crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, submitted.
- L. Dormieux, E. Bourgeois, 2003, *Introduction à la micromécanique des milieux poreux*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- R. Eymard, T. Gallouet, R. Herbin, 2000, *Finite Volume Methods*, p.723-1020, *Handbook for numerical analysis*, Vol. VII, Editors: P.G. Ciarlet and J.L. Lions. North-Holland.
- A. Fabbri, T. Fen-Chong, O. Coussy (2006) Dielectric capacity, liquid water content, and pore structure of thawing-freezing materials, *Cold Regions Science and Technology*, 44, 52-66.
- A. Fabbri, O. Coussy, T. Fen-Chong, (2007) Influence of the permeability on the frost-thaw behaviour of concrete. *Revue Européenne de Génie Civil*, accepté.
- E. Hervé, 2002, Thermal and thermoelastic behaviour of multiply coated inclusion-reinforced composites. *International Journal of Solids and Structures*, p. 39, 1041-1058.
- J. Marchand, E.J. Sellevold, M. Pigeon, 1994, The deicer salt scaling deterioration of concrete - an overview. In V.M. Malhotra, editor, *Durability of concrete. Proceedings of third CAMNET-ACI International Conference*, Nice.
- H.F.W. Taylor, 1997, *Cement Chemistry - 2nd Edition*. Thomas Telford Publishing.