

Journées techniques Ouvrages d'Art 2013

Dijon, Mercredi 05 et Jeudi 06 juin

Outils de caractérisation et analyse du comportement des matériaux cimentaires soumis à des cycles de gel en présence de sels

Extrait des travaux de thèse soutenue le 18 avril 2013

S. BOUTEILLE, T. FEN-CHONG,
V. BAROGHEL-BOUNY et M. DIERKENS

Mercredi 5 juin 2013

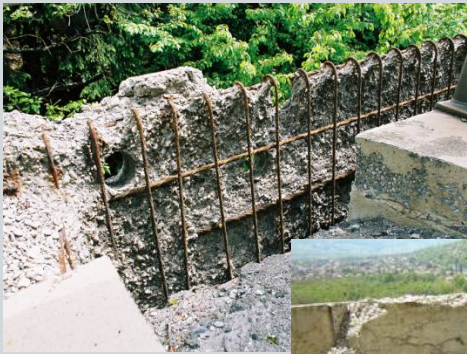


IFSTTAR

Motivations

Pathologies liées au gel - gel interne et écaillage

Gel interne



*Corniches du
viaduc des
Egratz*



Écaillage



*Culées du
viaduc de la
Ricammarie*

Endommagement

A cœur du béton : micro-fissuration de la pâte cimentaire, gonflement

Endommagement

A la surface du béton : éclats de pâte cimentaire



Plan de l'exposé

1- L'essai normalisé d'écaillage : jusqu'où peut-on aller?

Analyse statistique de la perte de masse à 56 cycles

Nouvelle interprétation de l'essai

2- Gélivité des matériaux cimentaires

2.1- Limite de la scission gel interne – écaillage?

Évaluation concomitante de la détérioration par le gel interne et l'écaillage

2.2- Phénoménologie et mécanismes de dégradation de surface

Changement de phase d'une solution à proximité d'une paroi

Scénarios de détérioration et phénoménologies observées

3- Conclusion, perspectives



1 – L'essai normalisé d'écaillage

Analyse statistique de la perte de masse à 56 cycles
Nouvelle interprétation de l'essai



1- Norme XP P 18-420

Etapas de réalisation de l'essai d'écaillage

Vibration



3 mois



Cure 24h

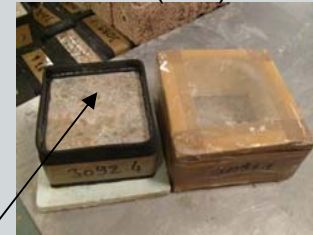
Conservation 13j
eau ou 95% HR à 20°C



Séchage (65% HR)
14j à 20°C



Pré-humidification
à l'eau (72h)



x4

31j

Résultat = médiane

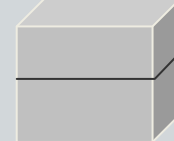
Mesures et seuils⁽¹⁾

$M_{\text{écaillage}} \leq 600 \text{ g/m}^2$ (étude, convenance)
et 750 g/m^2 (contrôle)

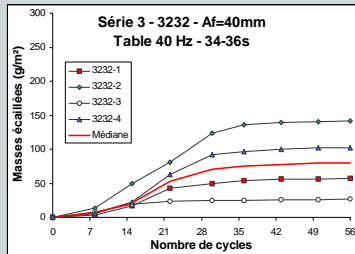
Surface sciée

Surface fond de moule

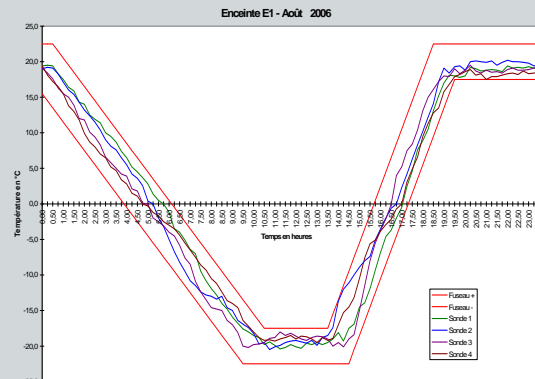
Surface libre



Chambre climatique



Masses écaillées (/7j)



56 cycles, (+20±2; -20±2) °C, 24h par cycles
taux de refroidissement : $t - \leq -4^\circ\text{C}$

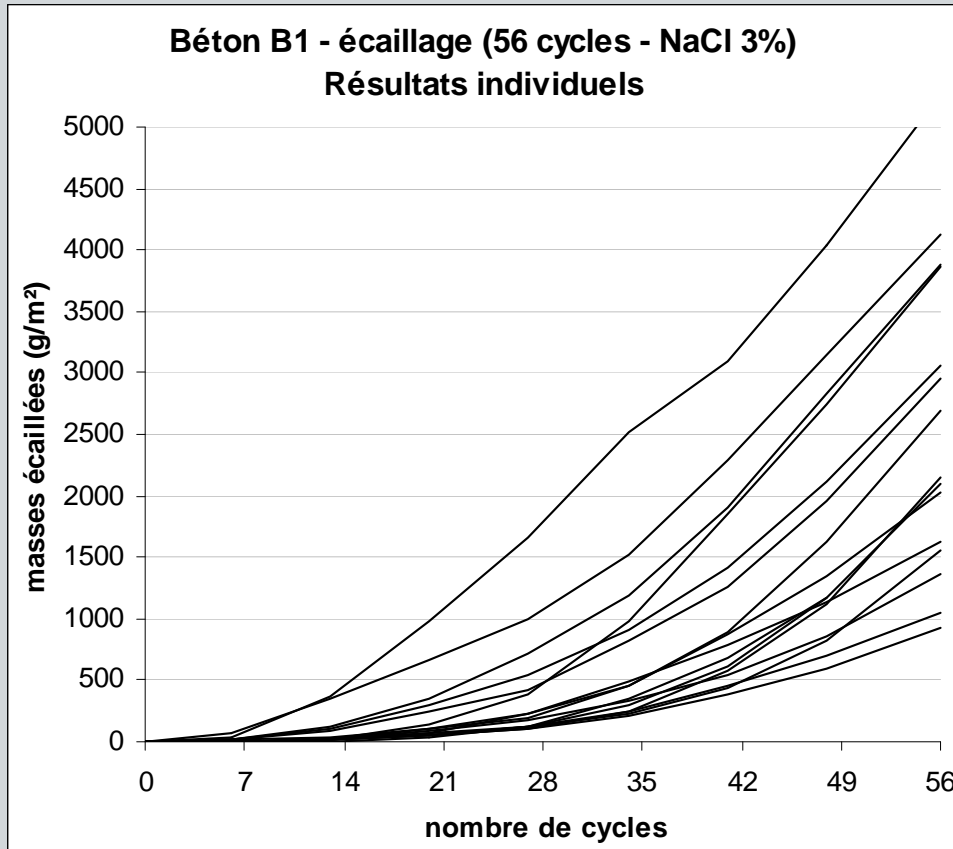


⁽¹⁾ [Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel, 2003]



1- Essai normalisé d'écaillage

Analyse statistique - 3 formules de béton

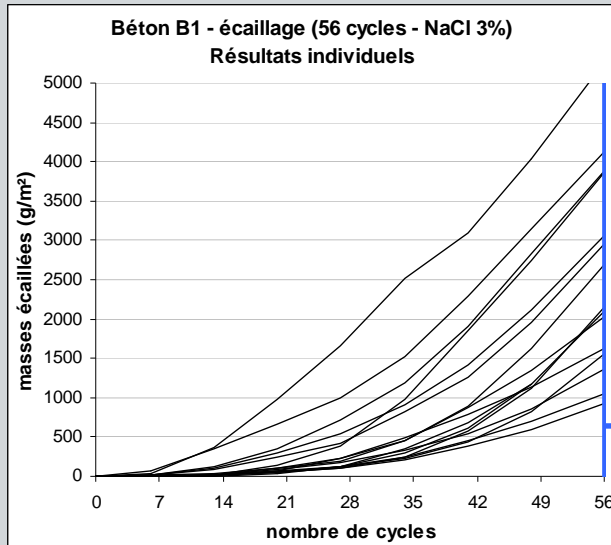


Fabrication			
Béton	C(kg/m ³)	Eeff/C	Air Occlus
B1	350	0,39	2,0%
B2	410	0,41	5,5%
B3	380	0,45	3,9%

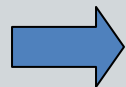
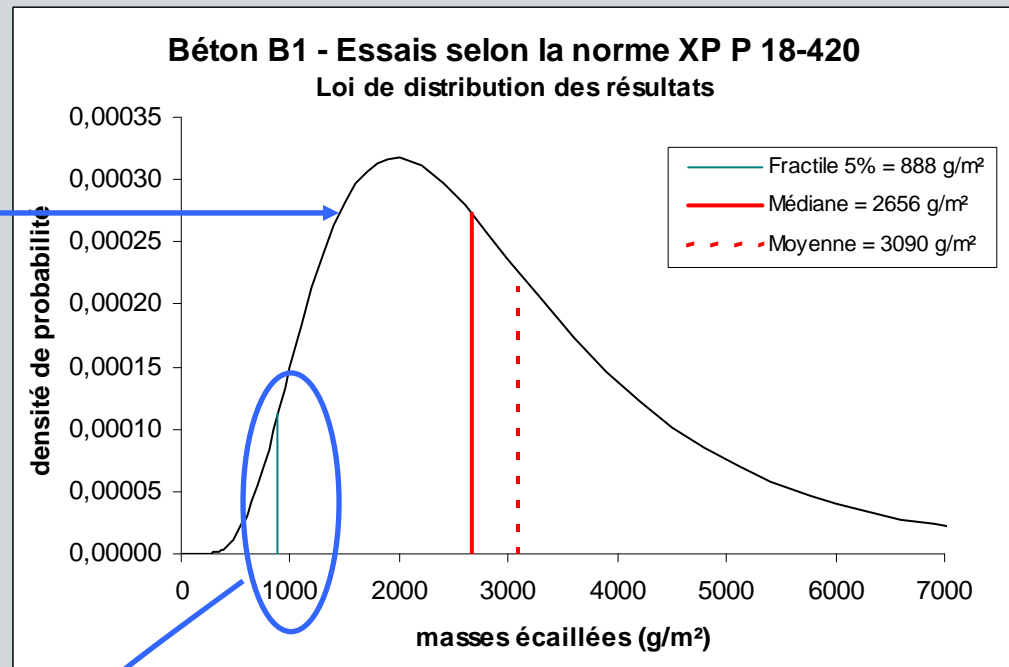


1- Essai normalisé d'écaillage

Analyse statistique - 3 formules de béton



Béton	Fabrication			Résultats individuels		Fractiles	
	C(kg/m ³)	Eeff/C	Air Occlus	μ (kg/m ²)	σ/μ	5%	95%
B1	350	0,39	2,0%	3090	0,59	888	377
B2	410	0,41	5,5%	172	0,63		208
B3	380	0,45	3,9%	76	0,96		

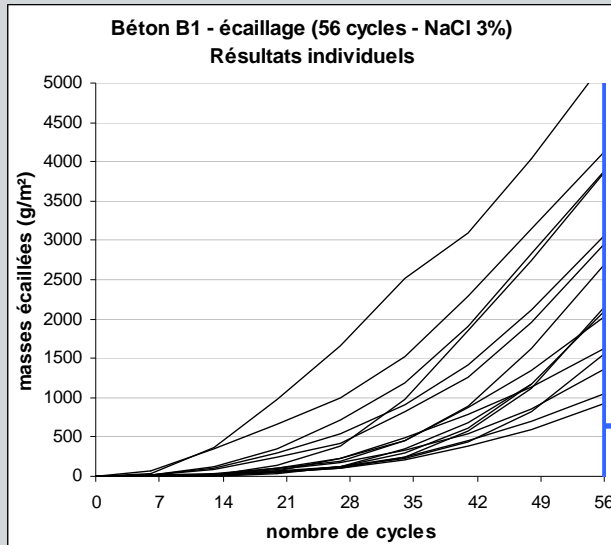


Essai discriminant par rapport au seuil de 600 g/m²

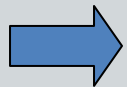
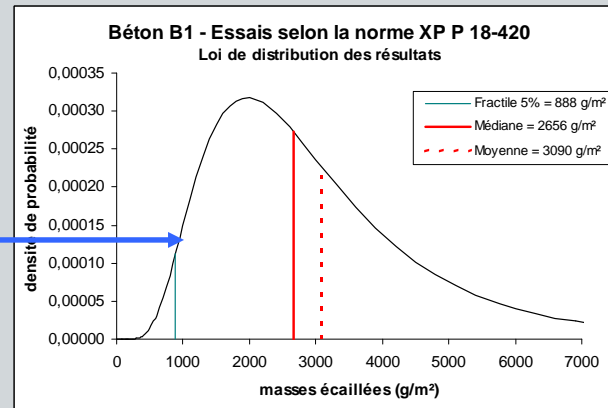


1- Essai normalisé d'écaillage

Analyse statistique - 3 formules de béton

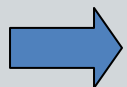


Béton	Fabrication			Résultats individuels		Fractiles	
	C(kg/m ³)	Eeff/C	Air Occlus	μ (kg/m ²)	σ/μ	5%	95%
B1	350	0,39	2,0%	3090	0,59	888	
B2	410	0,41	5,5%	172	0,63		377
B3	380	0,45	3,9%	76	0,96		208



Essai discriminant par rapport au seuil de 600 g/m²

Ensemble des valeurs $\sigma_{ind}/\mu_{ind} = 77\%$, en fixant $\mu \Rightarrow$ courbes statistiques générales
 $t_{25\%} = 600 \text{ g/m}^2 \Rightarrow$ médiane = 379 g/m², $t_{75\%} = 600 \text{ g/m}^2$, médiane = 949 g/m²

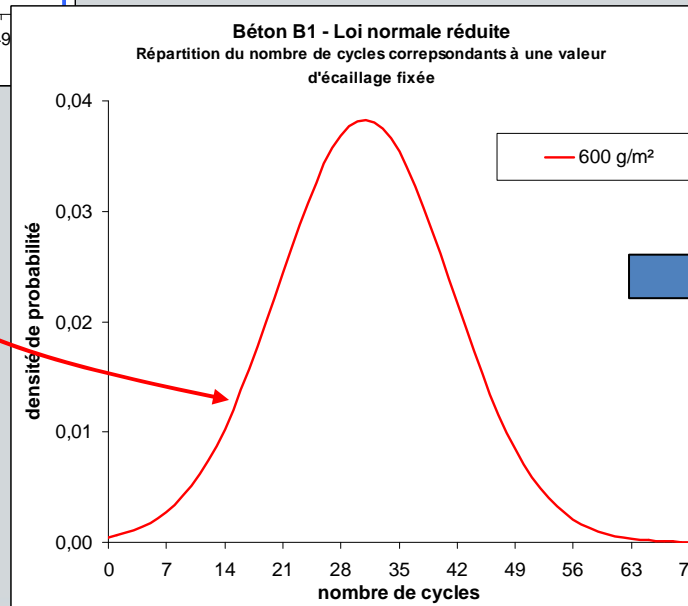
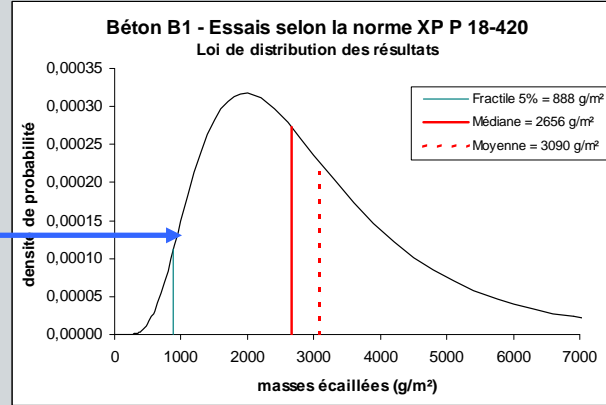
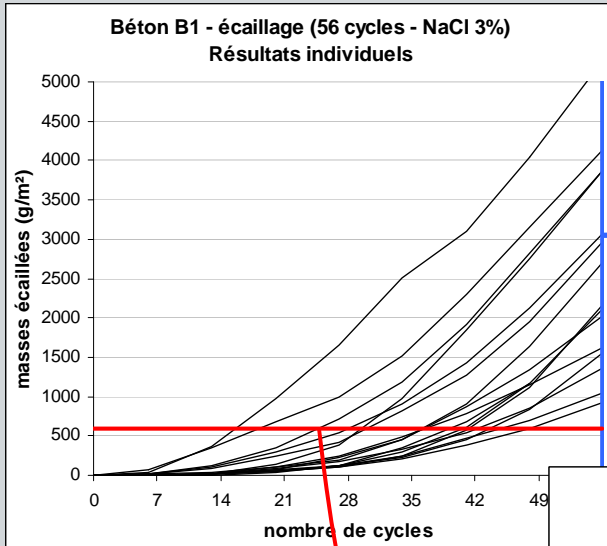


Médiane=600 g/m², sur 4 corps d'épreuve, incertitude statistique [379;949]



1- Essai normalisé d'écaillage

Analyse statistique - 3 formules de béton



Interprétation à
 $m=600 \text{ g/m}^2 \Rightarrow n$

Analyse équivalente avec
 $m = 200 \text{ ou } 900 \text{ g/m}^2$

Loi de distribution normale,
résultat centré autour de n ,

$$\sigma_{\text{ind.}} / \mu_{\text{ind.}} = 30 \text{ à } 35\%$$

Résultats similaires sur B2 et B3



2- Gélivité des matériaux cimentaires

Campagne expérimentale paramétrique



2- Paramètres matériau/exposition

Campagne d'essais paramétrique

- Exposition

Dim. 16x14x3,5 (en cm)



Surface / immersion

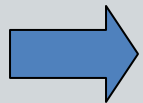
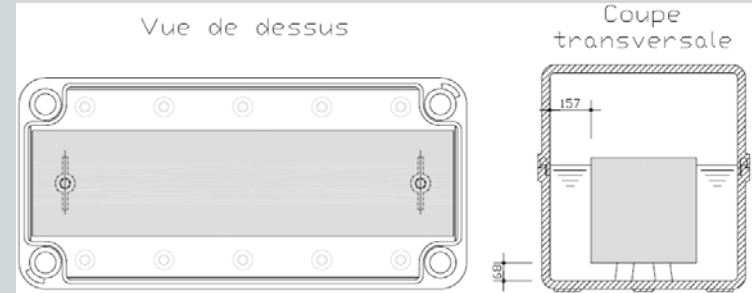
1 ou 4 cycles/jour (1 jour=24h)

Variation [NaCl] / répétabilité

- Formulation matériau

Ciment CEM I 52,5N.....**450 g**
Micro-billes plastiques (SIKA AER Solid).....0-6-**12-24 g**
Adjuvant entraîneur d'air (SIKA AER5).....0-0,65-**1,30 g**
Sable normalisé CEN.....0-775-**1350 g**

Dim. 4x4x16 (en cm)



192 corps d'épreuve testés, couple matériau / exposition



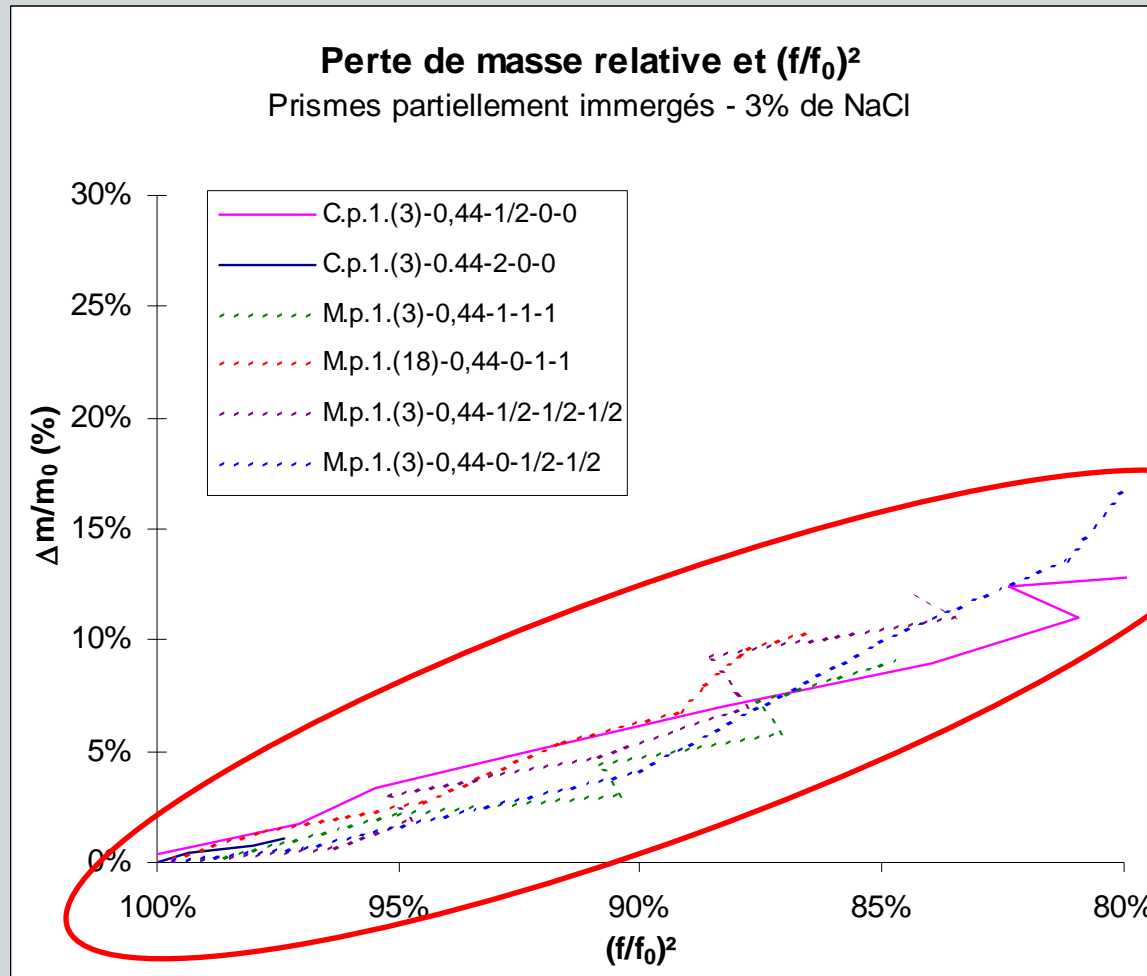
2- Gélivité des matériaux cimentaires

2.1 Limite de la scission gel interne – écaillage



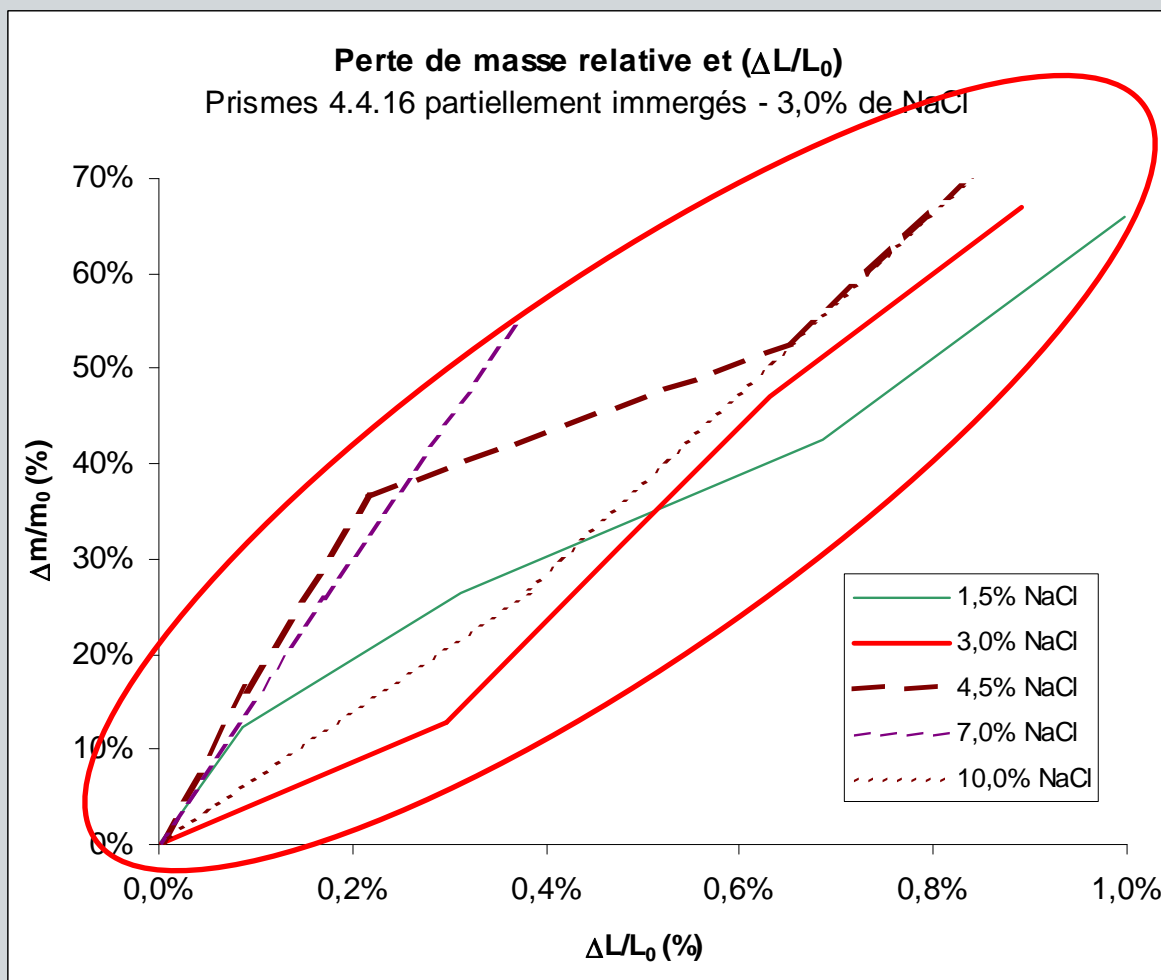
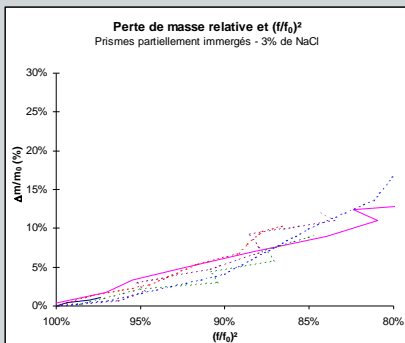
2.1- Scission gel interne-écaillage

Évaluation concomitante du gel interne et de l'écaillage



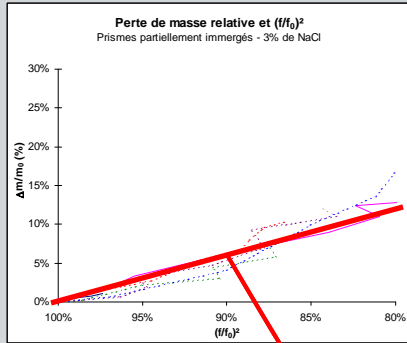
2.1- Scission gel interne-écaillage

Évaluation concomitante du gel interne et de l'écaillage

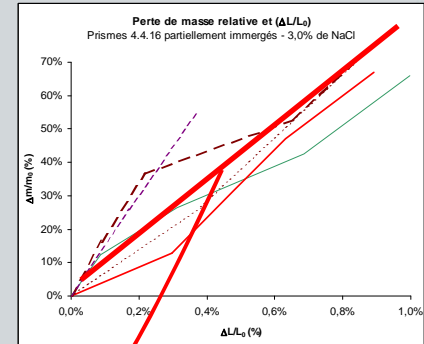
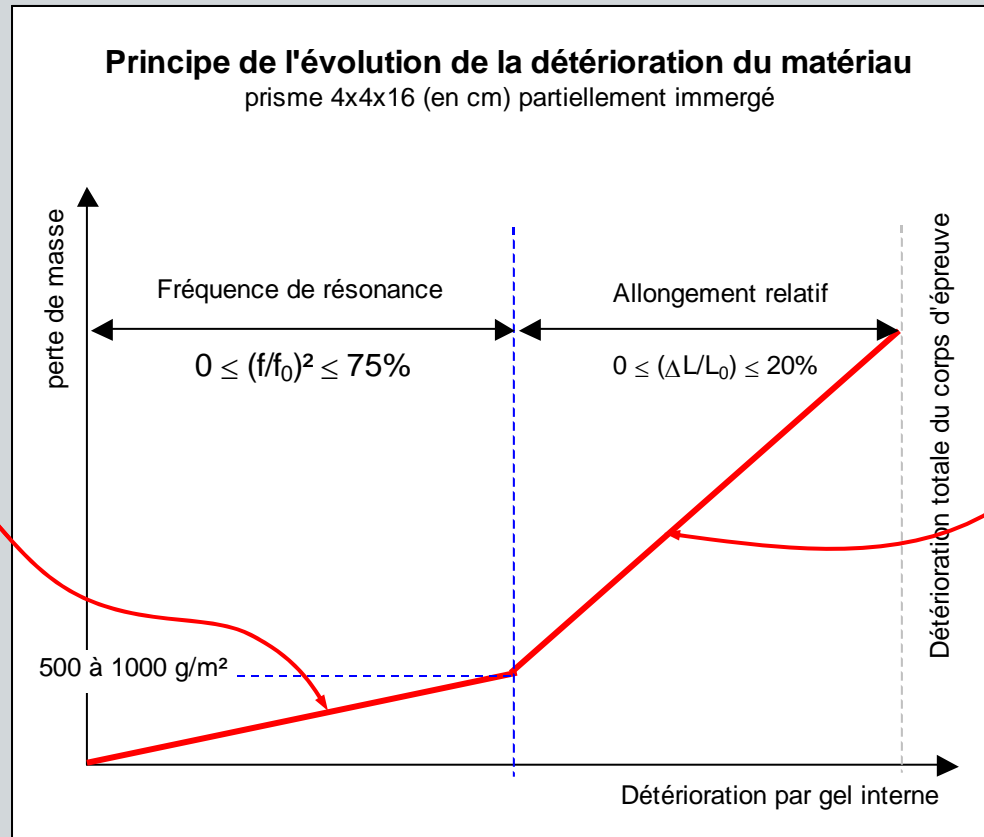


2.1- Scission gel interne-écaillage

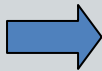
Évaluation concomitante du gel interne et de l'écaillage



Mesures $(f/f_0)^2$
distribution normale
très faible dispersion
 $\sigma/\mu = 2 \text{ à } 3\%$



Mesures $(\Delta L/L_0)$
distribution normale
très forte dispersion
 $\sigma/\mu = 100\%$



Pour une même pâte cimentaire et hormis les cas extrêmes, évolution continue du gel interne et de l'écaillage



2- Gélivité des matériaux cimentaires

2.2- Phénoménologie et mécanismes de dégradation de surface



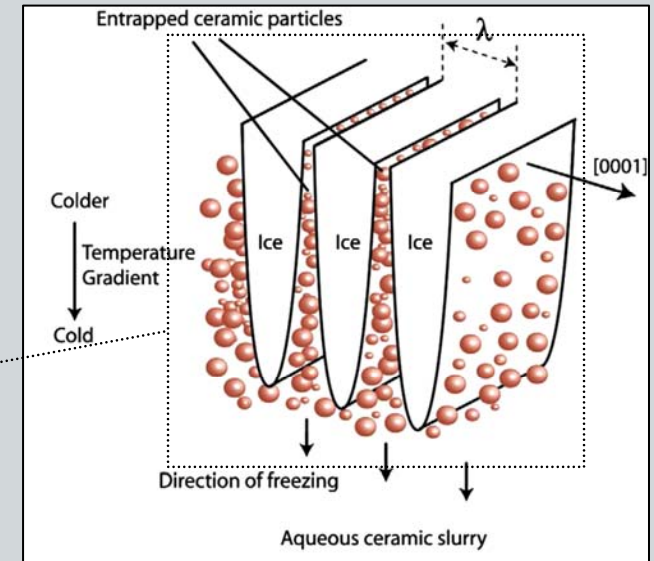
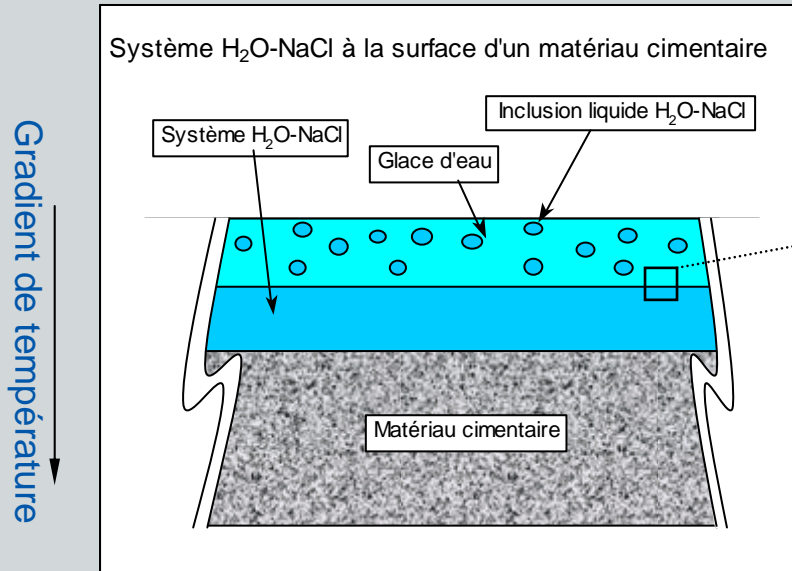
2.2- Mécanismes de dégradation

Solidification du système H₂O-NaCl

Principe de la solidification d'une solution aqueuse contenant 3% de NaCl proche d'une paroi

conditions d'essai ⇒ gradient de température
première couche de glace mince
front de solidification vers le matériau
répartition du NaCl inclusion / rejet au front

1ère température de solidification (3% de NaCl)
Théorique : -1,8°C, mesuré : -2,5°C



[S. Deville, E. Saiz, A. P. Tomisa. Ice-template porous alumina structure, 2007]



2.2- Mécanismes de dégradation

Solidification du système H₂O-NaCl

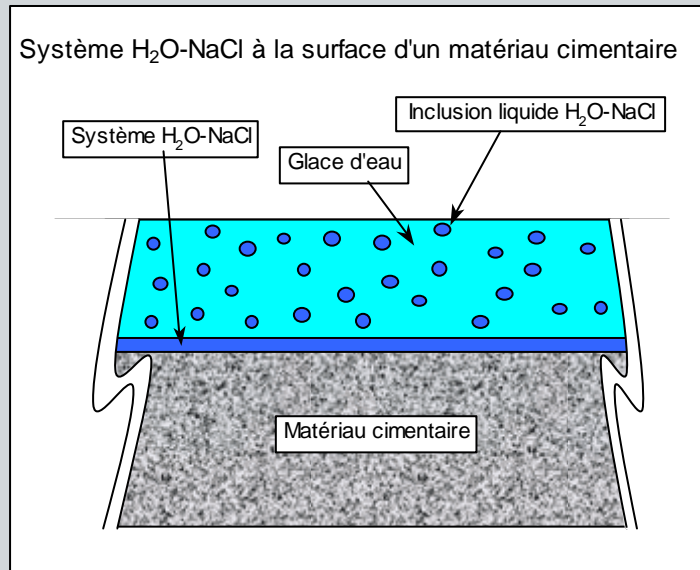
Principe de la solidification d'une solution aqueuse contenant 3% de NaCl proche d'une paroi

conditions d'essai \Rightarrow gradient de température
première couche de glace mince
front de solidification vers le matériau
répartition du NaCl inclusion / rejet au front

1ère température de solidification (3% de NaCl)
Théorique : $-1,8^{\circ}\text{C}$, mesuré : $-2,5^{\circ}\text{C}$

Température de solidification totale
Théorique : $-21,1^{\circ}\text{C}$, mesuré : $-23,5^{\circ}\text{C}$

Température minimale de palier $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$
Fraction liquide théorique restante
inclusion : 9,5%, front : 3,8%



Fraction liquide résiduelle à l'interface

$$\text{Épaisseur} = f([\text{NaCl}]_{\text{initiale}}, H_{\text{initiale}})$$

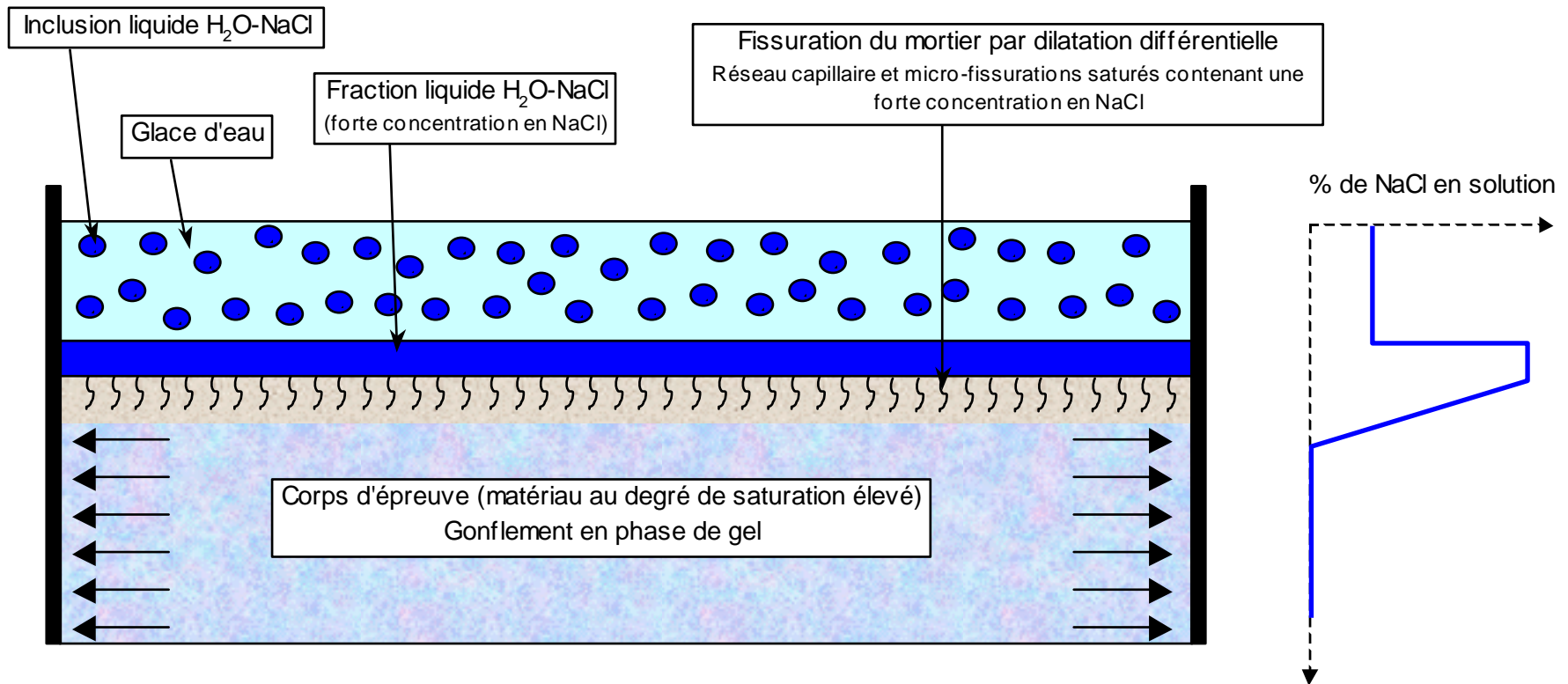
Mais également : taux de refroidissement, gradient thermique, température minimale, palier...



2.2- Mécanismes de dégradation

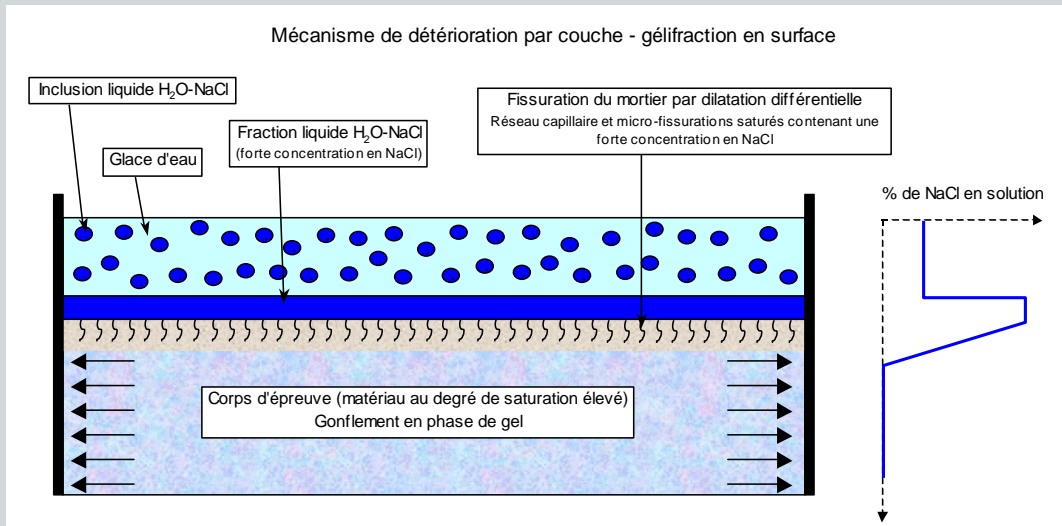
Mécanisme de dégradation par couche

Mécanisme de détérioration par couche - gélifraction en surface



2.2- Mécanismes de dégradation

Mécanisme de dégradation par couche



Capacité de rétention d'eau,
Évolution de la micro structure.

Mortier (gélifraction par couche)

156 cycles (4 cycles/jours) et 3% de $NaCl$



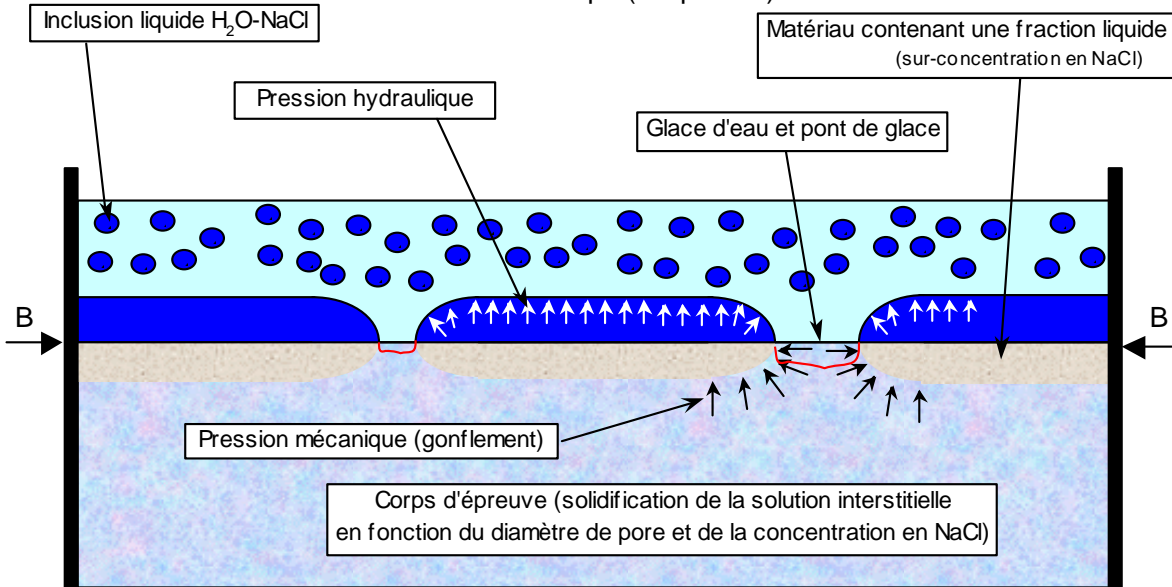
Sensibilité au gel
Pas de mesures $(f/f_0)^2$
Valeurs élevées $\Delta L/L_0$



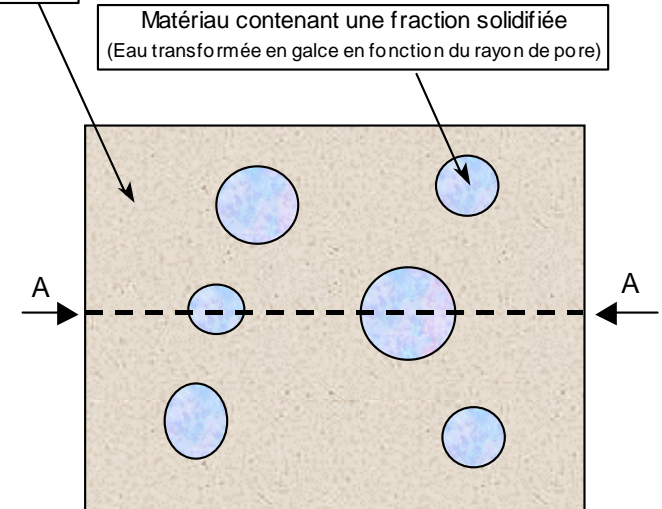
2.2- Mécanismes de dégradation

Mécanisme de dégradation par éclat de surface

Mécanisme de détérioration - éclat de surface
vue en coupe (coupe A-A)



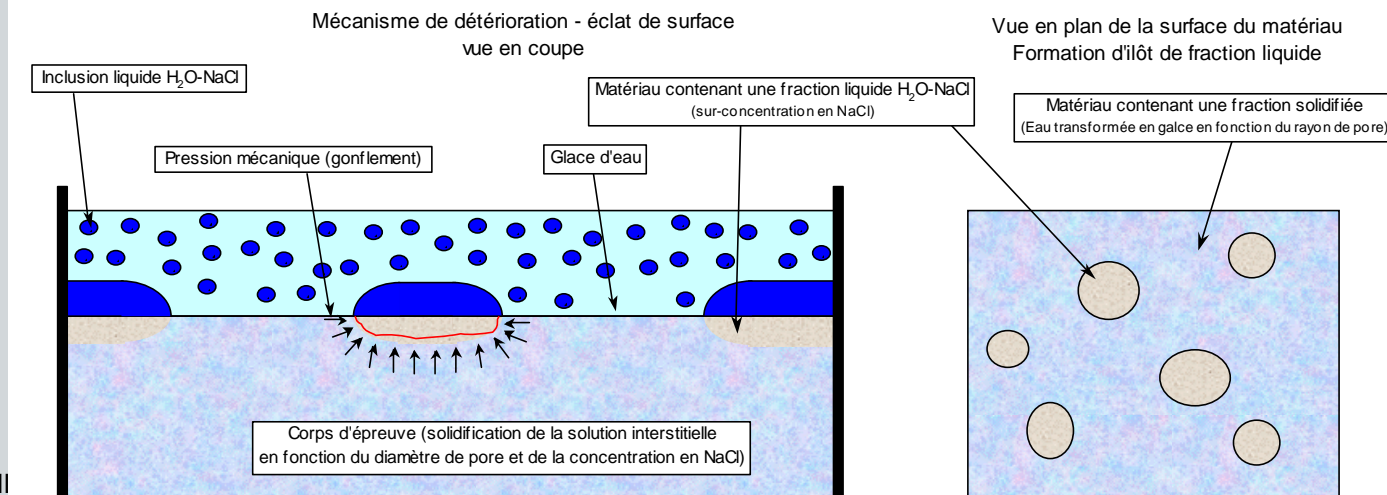
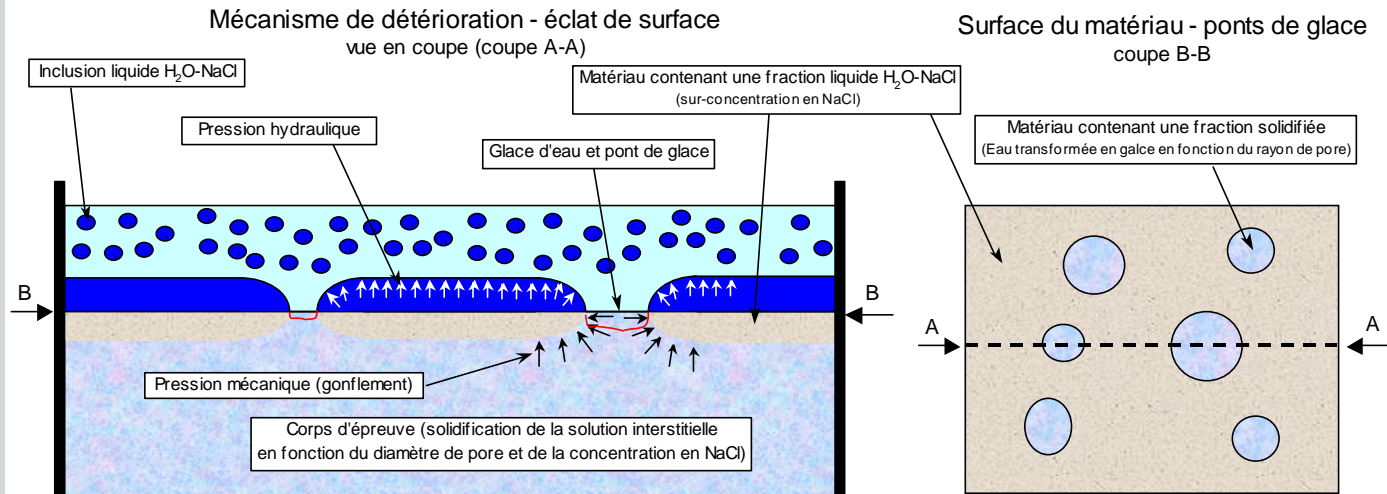
Surface du matériau - ponts de glace
coupe B-B



2.2- Mécanismes de dégradation

Mécanisme de dégradation par éclat de surface

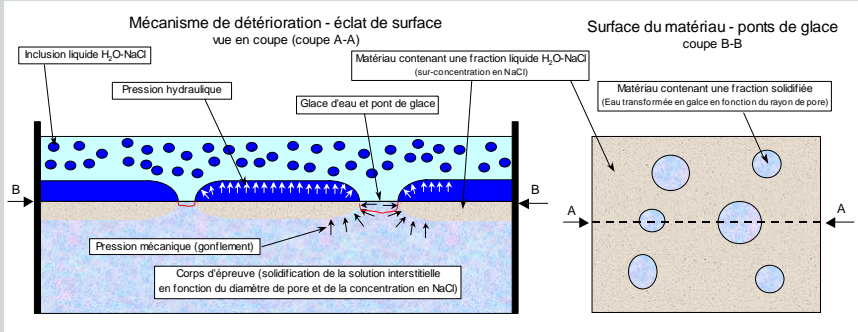
Conditions limites en fonction de la température (supérieure à TE)



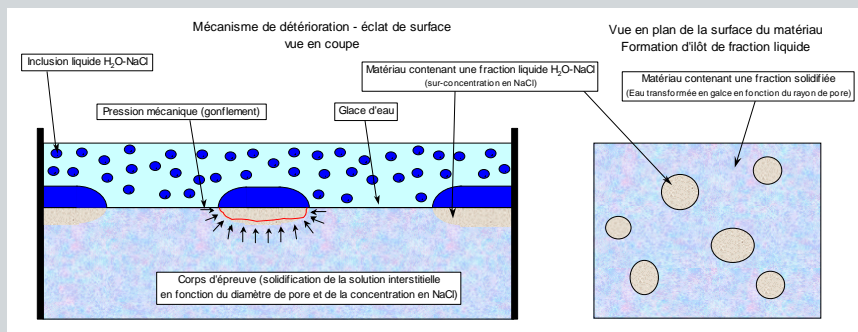
2.2- Mécanismes de dégradation

Mécanisme de dégradation par éclat de surface

Coulis et micro-billes plastiques (éclats de surface)



28 cycles (1 cycle/jour) et 3% de NaCl



Faibles rétention d'eau et
évolution de la micro-structure.



3 – Conclusion et perspectives

- Essai normalisé d'écaillage

Dispersion ($\sigma_{\text{indiv.}}/\mu_{\text{indiv.}} = 77\%$), distribution log-normale des résultats

Essai discriminant / seuil de 600 g/m², incertitude statistique [379,949]

Nouvelle interprétation du résultat (n,m), dispersion ($\sigma_{\text{indiv.}}/\mu_{\text{indiv.}} = 30 \text{ à } 35\%$)



Compléments de spécifications sur les granulats

Circonscription du domaine d'emploi de l'essai par rapport au matériau

Prise en compte de l'exposition de l'ouvrage dans l'analyse

- Scission gel interne et écaillage

Évolution concomitante du gel interne et de l'écaillage fonction du nombre de cycles



Existence d'une corrélation gel interne écaillage?

- Phénoménologie et mécanismes de dégradation

Scénarios de détérioration pour les phénoménologie de gélifraction par couche et d'éclats de surface intégrant le changement de phase de la solution en surface



Validation expérimentale du changement de phase de la solution

Modèles de sollicitations mécaniques (microstructure évolutive)

Autres modes de détériorations de surface



Merci pour votre attention

