

Développement d'un protocole de prédiction de la dégradation du béton en période hivernale.

Sara AL HAJ SLEIMAN^{1,2}

¹ Association Technique de l'Industrie des Liants Hydraulique, 7, place de la Défense 92974 Paris-la-Défense Cedex, France

² Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR 6183, Centrale Nantes, 1 Rue de la Noë, 44300 Nantes, France

RESUME

Les infrastructures en béton situées dans des régions froides souffrent de l'effet de l'action du gel en hiver où, de plus, les sels sont régulièrement utilisés pour déglacer les surfaces et les routes. Afin d'assurer la longévité du matériau et de protéger l'utilisateur, un contexte normatif a été mis en place tel que les méthodes d'essais développées par la NF, le CEN, l'ASTM et le BNQ... Ces méthodes consistent à exposer le béton à une série de cycles de gel-dégel allant de +20 à -20°C suivant un taux de gel pouvant atteindre 10°C/h. Cependant, un manque de reproductibilité de ces essais a été remarqué et d'ailleurs la fiabilité des méthodes appliquées est remise en question. Une étude des évolutions de la température de la masse d'air de plusieurs pays à climats réputés sévères a été réalisée et confirme l'absence de corrélation entre le cycle imposé dans les méthodes d'essai actuelles et les conditions météorologiques réelles. Une proposition d'un nouveau cycle thermique, plus pertinent et représentatif, est donc avancée sur la base des observations météorologiques réalisées, mais aussi à l'aide d'une modélisation multi-échelles couplée à des mesures expérimentales mettant en évidence chaque phénomène physique. Les résultats sont prometteurs et la dispersion des résultats d'écaillage est réduite, permettant une caractérisation plus fiable de ce phénomène. Un essai inter-laboratoires (Français et Suisses) est en cours de réalisation afin de tester la reproductibilité avec le cycle proposé.

Mots-clés : Béton, durabilité, gel-dégel, écaillage, cycle thermique.

I. INTRODUCTION

Dans des conditions d'exposition sévères, le béton souffre de nombreux types de pathologies qui conduisent à la dégradation de la structure comme la lixiviation, le retrait, la carbonatation, l'attaque sulfatique, l'attaque des chlorures et l'action des cycles de gel/dégel. Cette dernière est l'une des principales pathologies des ouvrages urbains. Il en résulte un écaillage superficiel du béton résultant du gel de la solution saline en surface ainsi qu'une fissuration au sein du matériau provoquée par les cycles de gel/dégel sous l'effet des pressions hydraulique [1], osmotique [2] et de cristallisation [3] accompagnant le changement de phase de l'eau et la formation de glace dans la

porosité. Le rapport d'expansion de la glace η est donné en termes des masses volumiques de l'eau ρ_L et de la glace ρ_C en fonction de la température T. Sa valeur est estimée à 9% ($\eta = \frac{\rho_L}{\rho_C} - 1 \approx 9\%$).

Afin d'assurer la longévité du matériau et de protéger l'utilisateur, un contexte normatif a été développé. Suite aux périodes de cure propres à chaque norme, les méthodes d'essai consistent à exposer des éprouvettes de béton, à l'intérieur d'une enceinte climatique, à une série de cycles de gel-dégel de durée 12 ou 24 h, dans une plage commune allant de +20 à -20°C. Les vitesses de refroidissement et de réchauffement sont spécifiques à chaque méthode et peuvent atteindre 10°C/h [4]. Finalement, une évaluation de la résistance du matériau, à l'écaillage par exemple, se fait par la mesure des masses solides écaillées et la comparaison des valeurs obtenues à des seuils propres à chaque essai. Afin de tester la représentativité de ces méthodes d'essai vis-à-vis des conditions réelles d'exposition, une campagne expérimentale a été proposée : des mesures de température et un suivi de l'écaillage ont été effectués sur des blocs de béton placés au Mont Aigoual en France. De plus, une étude des évolutions de la température de la masse d'air dans plusieurs pays à climats réputés sévères a été réalisée dans le but de confirmer les résultats de la campagne du Mont Aigoual. Un nouveau cycle de gel-dégel est finalement proposé basé sur les études météorologiques réalisées ainsi que sur un modèle numérique multi-échelles permettant de prendre en compte les effets des différentes pressions impliquées dans le processus de changement de phase dans les matériaux poreux à base de ciment.

II. Méthodologie

A. Conditions d'exposition réelles

Lorsque l'on s'interroge sur la représentativité de la méthode d'essai de durabilité au gel-dégel, nous devons commencer par la caractérisation du comportement du béton exposé dans un environnement naturel. Cet environnement doit être caractérisé aussi largement que possible afin d'interpréter pleinement la réponse du béton. Le Mont Aigoual, une région montagneuse française, a été choisi pour notre programme expérimental pour deux raisons principales : premièrement, parce que c'est une zone classée comme "zone de gel sévère" (selon les classes d'exposition de la NF EN 206-1 [5] et Koppen-Geiger) à 1567 m d'altitude; deuxièmement, il y a la présence d'une station météo complète qui est un centre d'essai officiel en France. De ce fait, l'accès est rendu possible aux données météorologiques telles que la température de la masse d'air (connue par la température sous-abri), le rayonnement solaire,... qui peuvent être utiles pour notre étude. Deux blocs de béton, de dimensions 60×46×17 cm³, équipés de thermocouples en surface et au centre sont utilisés pour le suivi de la réponse thermique du béton exposé. Huit éprouvettes, de dimensions 15×15×7 cm³, sont utilisées pour le suivi de la dégradation par écaillage sous conditions réelles. Les éprouvettes et les blocs de béton sont configurés conformément au « slab test » du CEN/TS 12390-9 [6]. Les mesures de température sur les blocs ont été effectuées sur une large période entre 2013 et 2015. Une nouvelle campagne expérimentale a été reconduite pour la saison d'hiver 2019-2020.

B. Conditions des essais de laboratoire

Des éprouvettes de dimensions 15×15×15 cm³ ont été confectionnées ayant la même formulation que ceux déposées au Mont Aigoual pour le suivi de dégradation. L'étude fait l'objet de deux types de surface d'essai : la surface sciée représentant le cœur du cube et la surface fond du moule étant

la face décoffrée. La face du fond de moule est considérée comme étant la surface d'essai dans la norme française d'écaillage XP P18-420. Pourtant, la surface sciée est considérée comme étant la surface d'essai selon les spécifications européennes des essais d'écaillage, tel que le slab test du CEN/TS 12390-9. Ceci sous l'hypothèse que la peau du béton sera détachée rapidement suite à l'exposition de l'ouvrage aux conditions climatiques et c'est donc la surface du cœur qui sera exposée à long terme. Le plan d'essai suivi est basé sur celui du slab test [6], sauf l'âge à la phase du sciage a été modifié en l'avancant de 21 jours à 12 jours permettant le séchage de la surface sciée. Huit éprouvettes sont exposées aux conditions réelles du Mont Aigoual, tandis que huit autres sont exposées aux cycles de gel-dégel au sein d'une enceinte climatique de laboratoire. Les essais d'écaillage consistent à exposer les éprouvettes configurées à 56 cycles allant de +20 à -20°C et surmontées par 3 mm de solution saline à 3% NaCl.

C. Modèle multi-échelles thermo-hydro-chemo-mécanique

Une étude numérique multi-échelles intégrant les effets de la température minimale, du degré de saturation et de la concentration en sel de déverglaçage a été réalisée en utilisant une approche micromécanique développée dans [7]. Le principe de cette approche consiste à appliquer un modèle physique, intégrant les effets de pressions développées, sur une microstructure de pâte de ciment hydratée générée par le logiciel VCCTL (Figure 1). Dans le modèle, les lois de comportement appliquées sur la porosité et les CSH sont les suivantes :

$$\bar{\sigma}(\bar{\mathbf{y}}) = \mathbb{C}^0(\bar{\mathbf{y}}, \bar{\epsilon}(\bar{\mathbf{y}})) : \{ \bar{\epsilon}(\bar{\mathbf{y}}) - \bar{\alpha}_p(\bar{\mathbf{y}}, T) \Delta T - [\mathcal{H}(S-1) \mathbf{p}_{hyd} + \mathcal{H}(1-S) \mathbf{p}_{cap}] \bar{\mathbf{I}} \} \quad \bar{\mathbf{y}} \quad (1)$$

$$\in V_p$$

$$\bar{\sigma}(\bar{\mathbf{y}}) = \mathbb{C}^d(\bar{\mathbf{y}}, \bar{\epsilon}(\bar{\mathbf{y}})) : [\bar{\epsilon}(\bar{\mathbf{y}}) - \bar{\alpha}_{CSH}(\bar{\mathbf{y}}, T) \Delta T - \mathbf{p}_{osm}(T, S_c) \bar{\mathbf{I}}] \quad \bar{\mathbf{y}} \quad (2)$$

$$\in V_{CSH}$$

\mathbb{C}^0 et \mathbb{C}^d sont les tenseurs de rigidité élastique non endommagé et endommagé respectivement, $\bar{\alpha}$ est le coefficient d'expansion thermique. \mathbf{p}_{hyd} , \mathbf{p}_{cap} et \mathbf{p}_{osm} sont les pressions hydraulique, capillaire et osmotique dont les équations sont données dans [7]. S et S_c sont les degrés de saturation liquide et du cristal de glace respectivement et \mathcal{H} la fonction de Heaviside.

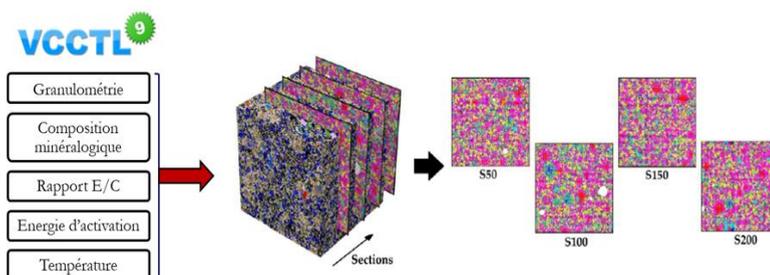


Figure 1 : Modèle d'hydratation avec le logiciel VCCTL [8].

III. Résultats et discussions

Un extrait des mesures des données météorologiques du Mont Aigoual est présenté dans la Figure 2. 12 cycles de gel-dégel ont été comptés pour le mois de Mars 2020 en surface du bloc de béton. Ces cycles fluctuent entre +5 et -5°C, l'amplitude de 40°C du cycle normatif n'est jamais repérée. Les fuseaux de tolérance des cycles de gel-dégel de la norme française et du slab test sont aussi placés sur le graphique de la Figure 2.

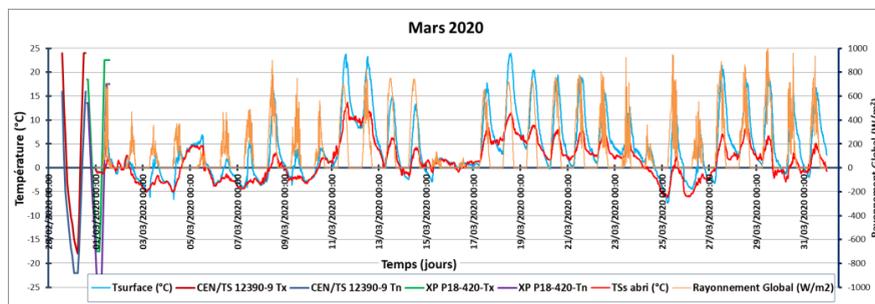


Figure 2 : Extrait des mesures de température en surface du béton, de la température de la masse d'air et du flux solaire pour le mois de Mars 2020, Mont Aigoual, France.

Nous remarquons que les valeurs minimales de la température sous-abri et de la surface du bloc coïncident surtout en périodes diurnes, mais aussi en journée lorsque le flux solaire global est inférieur à 300 W/m² (cas du 15 au 17 Mars 2020). Des décalages plus importants entre les valeurs maximales de ces températures sont enregistrés en journée, lorsque la densité du flux solaire est supérieure à 300 W/m². Une étude des évolutions de la température de la masse d'air de plusieurs pays à climats réputés sévères (Norvège, Suède, Mongolie, Russie,...) a été réalisée en suivant les données disponibles sur les sites météorologiques nationaux. Cette étude confirme les résultats obtenus à partir de la campagne du Mont Aigoual en ce qui concerne l'absence d'amplitude de 40°C du cycle normatif [9]. Les cycles de gel-dégel dans ces pays froids apparaissent plutôt avec une amplitude de 15 à 20 °C. Celle-ci se manifeste par des cycles de gel-dégel au début (mois de Novembre) et à la fin (mois de Mars) de la période hivernale, et des cycles de gel en plein hiver où la température demeure en-dessous de zéro. Ce sujet fera l'objet d'un prochain article. Les évolutions de températures dans les saumures à 3% NaCl des éprouvettes testées en laboratoire et placées à différentes positions dans l'enceinte climatique sont présentées dans la Figure 3.

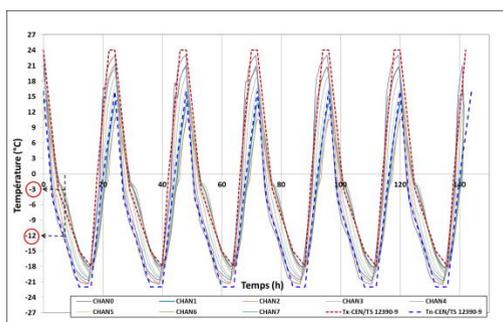


Figure 3 : Evolutions de températures dans les saumures des éprouvettes placées à différentes positions dans l'enceinte climatique.

Les températures dans l'enceinte sont très dispersées. Le fuseau de tolérance du slab test est très balayé, les températures minimales et maximales atteintes ainsi que les vitesses de gel et de dégel sont différentes selon la position dans l'enceinte. A un instant t , il existe une différence de température de l'ordre de 10°C entre deux éprouvettes à deux positions différentes. Ces dispersions dans les conditions thermiques de l'essai sont liées à la grande amplitude thermique imposée dans la consigne. La répartition de la température dans l'enceinte est donc rendue difficile et perturbe la répartition des conditions thermiques aux différentes positions. En outre, l'amplitude imposée n'est pas corrélée à l'amplitude réelle des cycles de gel-dégel observées dans les conditions météorologiques, même dans les pays à climats réputés « sévères ».

Les résultats d'écaillage des éprouvettes testées au laboratoire et celles exposées au Mont Aigoual sont donnés dans la Figure 4 (gauche) et (droite) respectivement. Les moyennes des pertes cumulées calculées sur 4 éprouvettes sont présentées pour chaque série. Les écarts des valeurs d'écaillage maximales et minimales par rapport à la moyenne sont présentés en pointillé sur les graphes. Nous constatons que les résultats d'écaillage du laboratoire sont très dispersés, l'hétérogénéité des cycles thermiques dans les saumures des différentes éprouvettes testées provoque cette dispersion. Les coefficients de variation calculés après 56 cycles sont de 40% pour la face sciée et 77% pour la face fond de moule. Ces coefficients prennent en compte la variabilité liée à l'hétérogénéité dans la composition du matériau mais aussi celle liée aux conditions thermiques imposées, dépendamment de la position dans l'enceinte.

La face fond de moule présente plus de dégradation que la face sciée (1700 g/m^2 contre 1000 g/m^2 pour les éprouvettes de laboratoire, après 56 cycles de gel-dégel de $[\pm 20/-20\text{ }^{\circ}\text{C}]$ et 10 g/m^2 contre 2 g/m^2 pour les éprouvettes exposées au Mont Aigoual après 29 cycles de gel-dégel fluctuant entre $+5$ et $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ceci est bien évidemment lié à la structure poreuse de la face fond de moule affectée par les effets de bords. De plus, la quantité de pâte susceptible d'écailler est plus importante dans le cas du fond de moule que la surface sciée, où les granulats sont présents et occupent environ 70% de la surface.

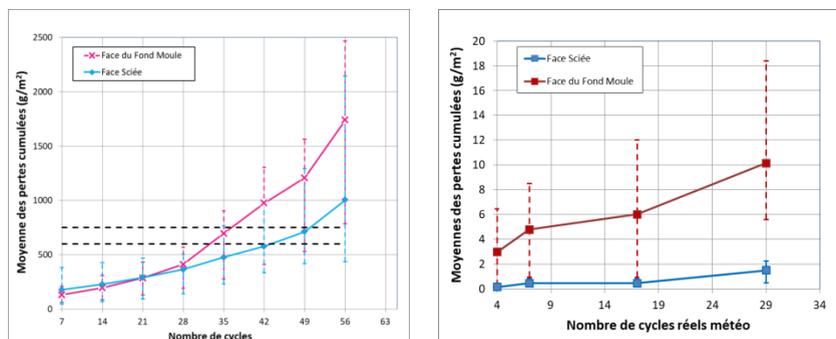


Figure 4 : Résultats d'écaillage sur les deux types de surfaces d'essai des éprouvettes : testées au laboratoire (à gauche), exposées au Mont Aigoual (à droite).

Nous montrons donc que la réponse du matériau au gel-dégel dépend aussi du type de la surface d'essai choisie. Pourtant, le type de la surface d'essai n'est pas le même dans les essais de caractérisation de la résistance à l'écaillage actuels, tel qu'il est le cas de la norme française XP P18-420 et le slab test du CEN/TS 12390-9.

Cependant, l'ordre de grandeur de la dégradation après 56 cycles en laboratoire est très éloigné de celui atteint après une période hivernale d'exposition dans des conditions climatiques réelles du

fait de l'effet de la température minimale à laquelle le béton est soumis. Ceci met le point sur la sévérité du cycle imposé dans les essais normatifs et l'absence de représentativité des conditions réelles. Par ailleurs, il s'agit non seulement d'un essai « sévère », mais aussi non fiable, ceci à cause de l'hétérogénéité des conditions thermiques imposées dans l'enceinte pendant l'essai. Par exemple, des simulations numériques réalisées à l'aide du modèle multi-échelles sur des volumes élémentaires représentatifs de béton ont montré des résultats de déformation très éloignés des mesures expérimentales en appliquant en conditions aux limites la consigne de température de $[+20/-20\text{ °C}]$. Dans un deuxième temps, les conditions aux limites ont été modifiées en appliquant les températures réelles mesurées en surface des échantillons dans l'enceinte. Les amplitudes des déformations atteintes à la température minimale ainsi que les déformations résiduelles après la phase de dégel sont différentes d'une éprouvette à une autre, dépendamment du chargement thermique auquel l'éprouvette est exposée dans sa position dans l'enceinte. Ceci a été également vérifié au niveau des éprouvettes testées expérimentalement, le degré de dégradation de la surface varie d'une éprouvette à l'autre. La Figure 5 présente les résultats de simulations des déformations macroscopiques d'un volume élémentaire de béton de dimensions $5 \times 5\text{ cm}^2$ exposé à 3 cycles $[+20/-20\text{ °C}]$ normatif et $[+5/-15\text{ °C}]$ d'amplitude totale de 20 °C . L'amplitude de déformation atteinte à la température minimale dans le cas du cycle $[+5/-15\text{ °C}]$ est ($968,3\text{ }\mu\text{m/m}$) inférieure à celle obtenue sous le $+20/-20\text{ °C}$ ($1269,6\text{ }\mu\text{m/m}$). Ceci peut être expliqué par l'équation (3) de Gibbs-Thomson intégrée dans le modèle qui lie la température de fusion ($T_f = 273,15\text{ K}$) au rayon seuil des pores gelés r_f :

$$r_f(T) \geq -\frac{2\gamma_{LC}}{\mathcal{S}_f(T - T_f)} + \delta \quad (3)$$

où \mathcal{S}_f est l'entropie molaire de fusion et $\delta (\approx 0,9\text{ nm})$ l'épaisseur du film d'eau adsorbée couvrant le cristal de glace et assurant l'équilibre thermodynamique sur les parois du pore. Plus la température s'abaisse, plus des pores de rayons plus petits seront gelés. Il en résulte des déformations plus importantes provoquées par les pressions développées.

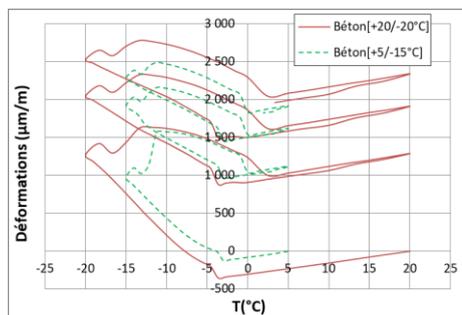


Figure 5 : Courbes de déformations macroscopiques en fonction de $T\text{ (°C)}$ de VER de béton exposés aux cycles $[+20/-20\text{ °C}]$ et $[+5/-15\text{ °C}]$.

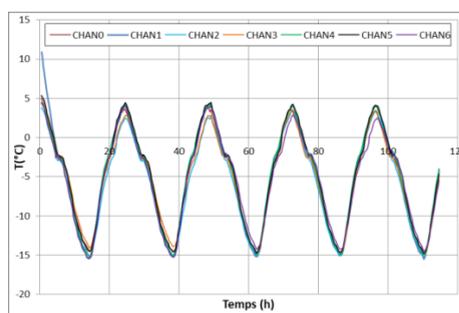


Figure 6 : Evolutions de température dans les saumures des éprouvettes placées à différentes positions dans l'enceinte sous le cycle $[+5/-15\text{ °C}]$.

Un cycle de gel-dégel $[+5/-15\text{ }^{\circ}\text{C}]$ d'amplitude totale de 20°C , selon des vitesses de gel et de dégel réalistes, est ainsi proposé sur la base des études météorologiques effectuées, mais aussi à l'aide de la modélisation numérique multi-échelles. La dispersion des températures mesurées dans les saumures des différentes éprouvettes est très réduite, les courbes sont serrées dans la phase de refroidissement et de réchauffement (Figure 6). Les courbes moyennes de pertes cumulées après 56 cycles de $[+20/-20\text{ }^{\circ}\text{C}]$ et $[+5/-15\text{ }^{\circ}\text{C}]$ pour les deux types de surfaces d'essai sont présentés dans la Figure 7. Nous montrons que la dispersion des résultats d'écaillage est réduite également pour la surface sciée, Figure 8. Le coefficient de variation passe de 77% après 56 cycles de $[+20/-20\text{ }^{\circ}\text{C}]$ à 24% après 56 cycles de $[+5/-15\text{ }^{\circ}\text{C}]$ uniformément réparties dans l'enceinte. Par contre, la face du fond moule semble peu sensible aux conditions thermiques imposées. Le coefficient de variation après 56 cycles est égal à 40% dans le cas des deux cycles imposés $[+20/-20\text{ }^{\circ}\text{C}]$ et $[+5/-15\text{ }^{\circ}\text{C}]$. La réponse du matériau est intrinsèque et déterminée par la composition poreuse (suite au ressuage) et hétérogène de la face fond de moule affectée par les effets de bords. L'homogénéisation des conditions thermiques n'a pas été suffisante pour réduire la dispersion des résultats d'écaillage, contrairement à la surface sciée. En outre, l'allure des courbes moyennes de pertes cumulées des deux types de surface d'essai est asymptotique, les pertes se stabilisent dès le 21^{ème} cycle pour les deux surfaces d'essai. Ceci confirme les résultats trouvés dans [10] qui montrent que les premiers cycles provoquent la dégradation la plus importante. Nous montrons cela aussi à travers les simulations numériques, la répétition des cycles conduit à une déformation résiduelle qui diminue de vitesse. Cette diminution est attribuée à l'expansion de la porosité capillaire qui accommode plus de volume d'eau. Ceci est visible à partir du deuxième cycle dans la Figure 5. Or, nous ne retrouvons pas ce comportement sous l'action du cycle $[+20/-20\text{ }^{\circ}\text{C}]$. Les courbes de pertes cumulées des deux types de surfaces d'essai sont à allure croissante exprimant un comportement aléatoire sous l'effet des cycles sévères appliqués.

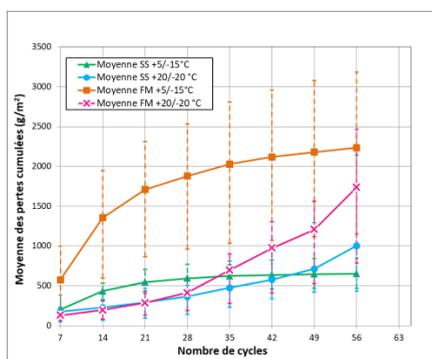


Figure 7: Résultats d'écaillage sur les deux types de surfaces d'essai sous les deux cycles $[+20/-20^{\circ}\text{C}]$ normatif et $[+5/-15^{\circ}\text{C}]$ proposé.

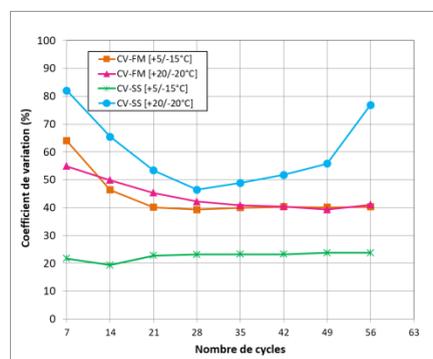


Figure 8: Evolution des coefficients de variation au cours des cycles de $[+20/-20^{\circ}\text{C}]$ normatif et $[+5/-15^{\circ}\text{C}]$ proposé pour les deux types de surfaces d'essai.

IV. CONCLUSIONS

Dans ce travail nous testons la fiabilité des conditions des essais actuels de caractérisation de la résistance du béton à l'écaillage. D'une part, nous montrons l'effet du choix du type de la surface d'essai sur les résultats d'écaillage. D'autre part, des études des conditions météorologiques au

Mont Aigoual en France et d'autres régions situées dans des pays à climats réputés sévères montrent que le cycle de gel/dégel de [+20/-20 °C] imposé dans les méthodes normatives actuelles n'est pas représentatif des conditions thermiques auxquelles le béton pourrait être exposé. Aussi, en laboratoire, l'amplitude importante du cycle provoque une dispersion dans les distributions de la température à différentes positions dans l'enceinte climatique. Ceci a un effet considérable sur la dispersion des résultats d'écaillage et remet en question la fiabilité des essais de caractérisation de la résistance au gel-dégel en présence de sels de déverglaçage.

Un nouveau cycle [+5/-15°C] plus pertinent est proposé sur la base des observations météorologiques effectuées et en se servant d'un outil de modélisation numérique multi-échelles. Les résultats sont prometteurs et la dispersion est considérablement réduite; ce qui améliore la répétabilité de l'essai. Un essai de reproductibilité est en cours de réalisation impliquant deux laboratoires Français et deux Suisses.

REFERENCES

- [1] Powers, T., The air requirement of frost resistant concrete, in *Proceedings of the Twenty-Ninth Annual Meeting of the Highway Research Board*, 1949, :184–211.
- [2] Powers, T. C. and Helmut, R. A., 1953. Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing *Proceedings of the Highway Research Board* 32:285–297.
- [3] Scherer, G. W., 2004. Stress from crystallization of salt *Cement and Concrete Research* 34:1613–1624.
- [4] Fagerlund, G. and Janssen, D. J., 1996. CDF Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - tests with sodium chloride solution (CDF) Recommendation 29:523–528.
- [5] AFNOR, NF EN 206-1/CN.
- [6] CEN/TC51 "Cement and building limes", FprCEN/TS 12390-9:2015-Testing hardened concrete – Part 9 : Freeze-thaw resistance - Scaling - Complementary element, 2015.
- [7] Rhardane, A., Al Haj Sleiman, S., Alam, S. Y., and Grondin, F., 2021. A quantitative assessment of the parameters involved in the freeze–thaw damage of cement-based materials through numerical modelling *Construction and Building Materials* 272:121838.
- [8] Rhardane, A., ALAM, S. ., and Grondin, F., 2020. Microscopically informed upscale approach of modelling damage in mortar by considering matrix-to-grain interface and grain micro-fracture characteristics *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*.
- [9] Izoret, L., Al Haj Sleiman, S., Matoiri-Chaibati, N., and Grondin, F., 2021. Concrete in a severe freezing environment: a meteorological characterization *Materials and Structures* 54:36.
- [10] Bager, D.H., Jacobsen, S., Model for the Destructive Mechanism in Concrete caused by Freeze-thaw Action, in *RILEM Proceedings PRO 25 Freeze-thaw Damage in Concrete*, 2002.