

Liège, Belgique
7-8 Novembre 2018

DALLES EXPOSÉES A LA DESSICCATION : RELATIONS ENTRE GRADIENTS ET DÉFORMATIONS MACROSCOPIQUES

JAAFRI Reda^A, SOUAYFANE Faten^A, ROZIERE Emmanuel^A, ALAM Syed Yasir^A, LOUKILI Ahmed^A

A Ecole Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, 1 rue de la Noë, BP 92101, F-44321 Nantes, France.

Résumé : L'objectif de l'approche expérimentale décrite ici est d'étudier le lien entre le séchage progressif des structures et les déformations macroscopiques engendrées (tuilage et retrait). L'étude présentée vise aussi à identifier les principaux gradients qui apparaissent au sein d'une dalle soumise dès le jeune âge à un séchage par une seule face. Pour ceci, un suivi en continu de certains paramètres a été effectué durant les 28 premiers jours. Les résultats ont montré que des gradients d'humidité relative, de porosité et d'hydratation s'établissent entre les faces supérieures et inférieures de la dalle. Ces gradients résultent principalement de la compétition entre l'hydratation et le séchage du mortier. Les résultats montrent également que le tuilage est principalement piloté par la progression du front de séchage au sein du matériau. Les différents gradients et les déformations qui en sont induites risquent de compromettre la durabilité des structures si les précautions nécessaires ne sont pas prises.

Mots-clés : tuilage, retrait, humidité relative, gradient, durabilité

1. INTRODUCTION

Les matériaux cimentaires, tels que les chapes et les dallages, coulés sur de faibles épaisseurs et avec de grandes surfaces d'échange avec l'air sont soumis à des retraits importants dus au séchage rapide. Ces déformations entraînent un risque élevé de fissuration lorsque les mouvements sont restreints, et/ou un tuilage s'ils sont libres.

Le tuilage des chapes est principalement dû à l'évaporation de l'eau interne vers le milieu environnant afin d'atteindre un équilibre hydrique. Lorsque les deux côtés opposés sont soumis à des conditions d'humidité différentes, un retrait différentiel se développe dans l'épaisseur de la chape (Ytterberg 1987; Shadravan et al. 2015). La surface supérieure sèche et rétrécit, tandis que le fond reste humide et développe des déformations moins importantes. Ce gradient de retrait peut entraîner le tuilage des dalles lorsqu'elles ne sont pas liées à leur support. Le gradient thermique peut aussi causer le tuilage des dalles posées sur le sol (le cas des chaussées par exemple) ; mais dans le cas des chapes ou des dallages qui sont coulés à l'intérieur, son effet demeure beaucoup moins important que celui du gradient d'humidité relative interne. Néanmoins, les travaux existants traitent essentiellement du tuilage induit par des gradients thermiques (Ytterberg 1987; Eisenmann & Leykauf 1990; Wolf et al. 2016; Yinghong 2011) et le tuilage dû au séchage est resté relativement peu étudié (Hajibabae et al. 2016).

La teneur en eau étant un paramètre clé dans l'évolution des principales propriétés du matériau, le séchage différentiel peut aussi être à l'origine de plusieurs autres gradients qui se développent au sein de l'élément et qui peuvent nuire à sa durabilité.

L'objectif de l'approche expérimentale décrite dans ce papier est d'étudier la relation entre l'avancement progressif du front de séchage dans la profondeur et les déformations macroscopiques observées (tuilage et retrait). L'étude expérimentale présentée vise également à mettre en évidence les principaux gradients au sein d'une dalle en mortier soumise dès le jeune âge à un séchage par une seule face.

2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1 Matériaux et formulation

Les mesures ont été conduites sur un seul mortier formulé avec un rapport E/C de 0.6 (Tableau 1). Il est composé de ciment Portland (CEM I 52,5 N), de filler calcaire, de sable siliceux 0/4 et d'eau.

	REF
Ciment (kg/m^3)	455.1
Filler calcaire (kg/m^3)	273.0
Sable (kg/m^3)	1152.8
Eau (kg/m^3)	273.0

Tableau 1 Composition du mortier étudié

Les compositions physique et chimique du ciment sont présentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Le filler calcaire utilisé a une teneur en CaCO_3 de 96.9% et une surface spécifique BET de $1.15 \text{ m}^2/\text{g}$.

Ciment Portland CEM I 52.5 N				
Analyse chimique (%)				
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
63.7	19.8	4.4	2.2	3.2
Composition du clinker (%)				
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
68	11	8	7	
Propriétés physiques				
Classe vraie du ciment (MPa)		BET (m ² /g)		
61		0.77		

Tableau 2 Propriétés du ciment

2.2 Procédures expérimentales

2.2.1 Tuilage

Le tuilage a été mesuré à l'aide d'un moule en acier de dimensions internes de 1000 × 100 × 50 mm³ (Figure 1). Cela correspond à un volume représentatif du mortier étudié. Une enveloppe formée de deux plaques de PVC attachées à une feuille de plastique est placée dans le moule pour réduire le frottement avec les parois. Le mortier est coulé dans l'enveloppe. Trois capteurs laser d'une précision de 0,5 μm sont utilisés pour mesurer le déplacement vertical de la poutre. Les points de mesure sont indiqués par les points rouges sur la Figure 1. Le choix des capteurs laser a été fait pour permettre le suivi des déplacements sans contact à l'état frais.

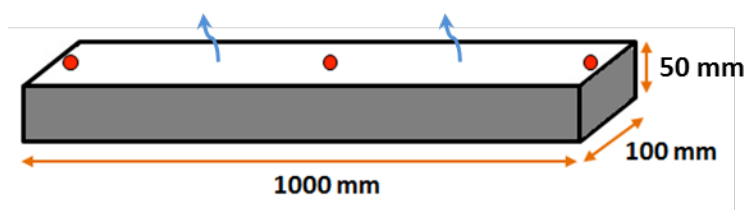


Figure 1 Banc de mesure du tuilage

L'échantillon est exposé à la dessiccation sur la surface supérieure (de dimensions de 1000 × 100 mm²). Les essais sont réalisés dans une salle régulée en température et en humidité relative (20±1 °C et 50±5%).

2.2.2 Retrait total

Les gradients d'humidité relative interne dans l'épaisseur de l'échantillon conduisent à des gradients de retrait. Le retrait total a été mesuré à partir de 24 heures sur des éprouvettes de dimensions 50 x 70 x 280 mm³ (Figure 2).

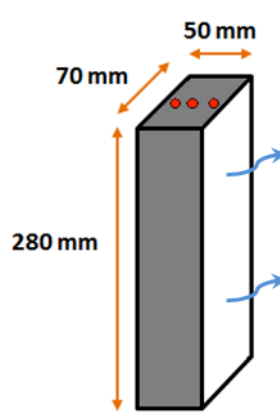


Figure 2 Éprouvette pour la mesure du retrait différentiel

Les dimensions de l'éprouvette ont été choisies de sorte à avoir le même rayon de séchage que pour le banc de mesure du tuilage, et ainsi réduire l'effet de la taille de l'échantillon sur la cinétique de séchage (Samouh et al. 2016). Le rayon de séchage est défini comme le rapport entre le volume V de l'échantillon et sa surface de séchage S (équation 1). Il est égal à 10 cm pour les deux éprouvettes de mesure du tuilage et du retrait.

$$h_0 = \frac{2V}{S} \quad (1)$$

A 24 heures les éprouvettes sont démoulées et placées sur des bâtis verticaux. Une seule face de dimensions $70 \times 280 \text{ mm}^2$ est exposée au séchage. Les autres faces ont été recouvertes d'une double couche d'aluminium. Les déformations longitudinales des éprouvettes ont été mesurées à l'aide de capteurs LVDT.

Pour chaque éprouvette, trois capteurs LVDT ont été utilisés : ils ont été placés aux positions $x = 10 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ et $x = 40 \text{ mm}$, x étant la distance par rapport à la surface de séchage. Les mesures sont lancées dans la même salle à température et à humidité relative contrôlées ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ et 50% HR).

2.2.3 Humidité relative interne

L'humidité relative interne a été mesurée sur une éprouvette de dimensions $50 \times 250 \times 250 \text{ mm}^3$ exposée à la dessiccation uniquement par sa face supérieure (la surface de dimensions de $250 \times 250 \text{ mm}^2$). Les dimensions de l'éprouvette ont été choisies de sorte à avoir le même rayon de séchage que pour les bancs de mesure du tuilage et du retrait.

Quatre capteurs de 5 mm de diamètre ont été placés dans des réservations de 7 mm de diamètre. Les réservations ont été réalisées en utilisant des tubes en plastique insérés lors du coulage du mortier. À l'âge de 1 jour, les tubes sont extraits, et les capteurs d'humidité installés. Un scellant spécial est utilisé par la suite pour bien fermer les réservations afin d'empêcher que les mesures ne soient impactées par un séchage direct. Les mesures ont été effectuées à des profondeurs $x = 10 \text{ mm}$, $x = 20 \text{ mm}$, $x = 30 \text{ mm}$ et $x = 40 \text{ mm}$, x étant la distance à partir de la surface de séchage. Les capteurs ont été placés dans différents plans verticaux afin de minimiser l'influence des capteurs les uns sur les autres.

Les essais sont effectués dans la même salle régulée en température et en humidité relative ($20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ et $50 \pm 5\%$).

2.2.4 Porosité accessible à l'eau

Des mesures de porosité à l'eau ont été réalisées à 28 jours sur des échantillons de mortier prismatiques prélevés sur l'éprouvette de mesure de l'humidité relative. Ils sont prélevés à des profondeurs correspondant aux emplacements des capteurs dans le banc d'humidité relative, à savoir

$x = 1 \text{ cm}, 2 \text{ cm}, 3 \text{ cm}$ et 4 cm . Les échantillons ont été coupés sous l'eau (Samouh et al. 2017) afin de limiter la dégradation du matériau. La procédure de l'essai de mesure de la porosité à l'eau est présentée dans (Samouh et al. 2017; Wilson et al. 1999).

2.2.5 Hydratation

Le suivi du dégagement de chaleur pendant l'hydratation se fait à température constante (20°C) à l'aide d'un calorimètre isotherme. Les données ont été extrapolées pour évaluer la cinétique et le degré d'hydratation des mortiers étudiés (Lenormand et al. 2015).

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les déplacements ont été mesurés dans les deux directions. Les résultats des mesures du déplacement dû au retrait à différentes profondeurs x (en mm) sont présentés sur la Figure 3. Le séchage induit des dépressions capillaires et un développement du retrait. Ce retrait ne se développe pas, cependant, d'une façon uniforme sur toute l'épaisseur. La Figure 3 montre qu'il existe un gradient de retrait entre la surface de séchage et la partie inférieure de la dalle. Le retrait à proximité de la surface d'échange est plus élevé.

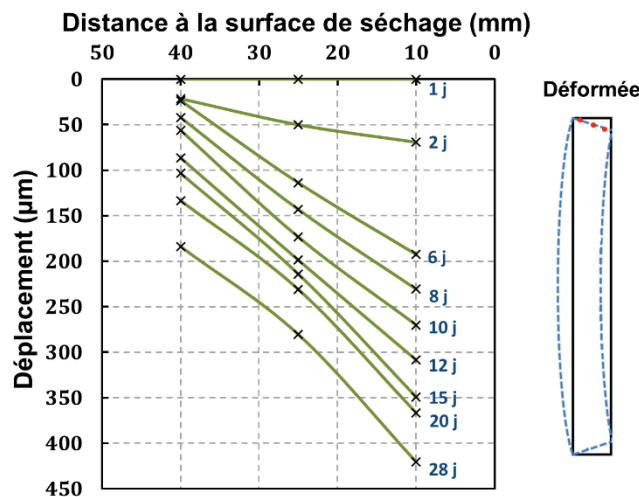


Figure 3 Déplacements dus au retrait en fonction de l'âge et de la distance à la surface de séchage

Les déplacements verticaux de tuilage mesurés sur la poutre aux trois points de mesure sont présentés dans la

Figure 4. Les mouvements de la poutre étant libres, les déplacements se développent de façon symétrique d'un côté et de l'autre avec un maximum aux extrémités. Un premier tassement est observé sur toute la longueur de la poutre avant 1 jour. Ce tassement est plus faible aux bords, ce qui est probablement dû à des effets de parois et à la présence des inserts d'ancrage des plaques PVC aux extrémités. À partir de 1 jour, le centre ne se déplace plus alors que les extrémités commencent à se relever. Ce relèvement des extrémités, dit tuilage, se développe rapidement pendant les 15 premiers jours avant de commencer à se stabiliser.

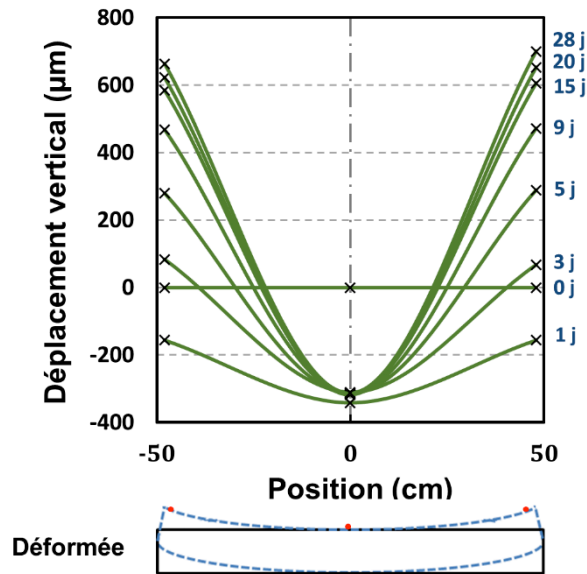


Figure 4 Déplacements verticaux en fonction de l'âge et de la position

Le gradient de retrait dans l'épaisseur de l'élément et le tuilage induit sont principalement dus au séchage qui se produit de façon différentielle entre la face exposée et le bas. Afin de mieux comprendre la relation entre le séchage et le tuilage, l'évolution de l'état hydrique du matériau a été suivie. La Figure 5 présente l'évolution dans le temps du tuilage et de l'humidité relative interne aux différentes profondeurs de mesure.

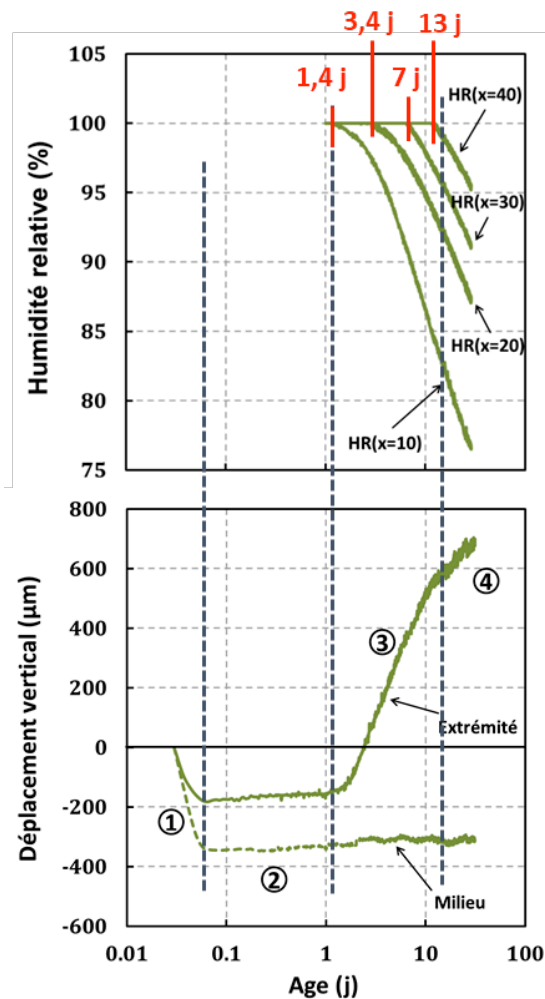


Figure 5 Évolution dans le temps de l'humidité relative à différentes profondeurs et du tuilage

La Figure 5 montre qu'au centre de la poutre, aucun déplacement n'a été mesuré après le premier tassement. La courbe du tuilage de l'extrémité de la poutre permet par contre de définir quatre phases principales :

i/ Dès le début des mesures, un tassement est observé sur toute la longueur de la poutre. En effet, juste après la mise en place, les particules solides sédimentent sous l'effet de la pesanteur ; l'eau et l'air remontent à la surface : le mortier se compacte. Au cours de cette consolidation, l'eau dite de ressuage remonte à la surface et s'évapore, contribuant ainsi au tassement (Slowik et al. 2009).

ii/ La deuxième phase où aucun déplacement n'est mesuré apparaît juste après le début de prise. En effet, un squelette solide commence à se former, augmentant ainsi la rigidité du matériau ; ce qui permet au mortier de résister aux déformations.

iii/ La troisième phase apparaît quand l'humidité relative interne de la couche située à 10 mm de profondeur commence à baisser suite au départ d'eau par évaporation. Suite au séchage différentiel de la dalle, un gradient d'humidité relative interne apparaît. L'humidité relative chute rapidement près de la surface de séchage, alors qu'elle reste élevée dans les parties inférieures de la dalle. Cette chute de l'humidité relative interne de la couche située à 10 mm de profondeur évolue à un taux plus important que pour les autres couches plus profondes. Le séchage de la partie supérieure de la dalle pendant les premiers jours entraîne en effet une perte d'eau très prononcée en raison de la forte perméabilité du matériau dont l'hydratation n'a pas encore beaucoup évolué. Des tensions capillaires sont ainsi générées dans la partie supérieure de la poutre et conduisent au développement d'un gradient de retrait dans l'épaisseur de l'élément (Figure 3).

Avec la progression du front de séchage dans la profondeur de la poutre, des couches de plus en plus profondes commencent à perdre de l'eau et à voir leurs humidités relatives baisser ; leur retrait augmente. Le gradient de retrait (défini ici comme la différence entre le retrait mesuré à 10 mm de profondeur et celui mesuré à 40 mm) augmente, ce qui génère des moments fléchissants plus importants aux extrémités et entraîne le tuilage (Figure 6).

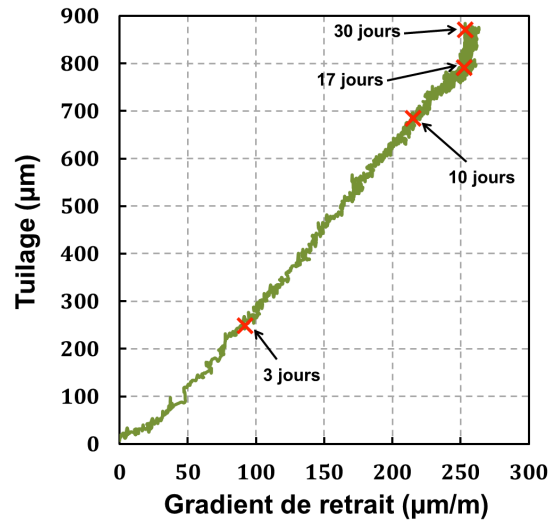


Figure 6 Tuilage en fonction de l'évolution du gradient de retrait

iv/ Lorsque le front de séchage atteint les couches inférieures de la poutre (4 cm), leurs humidités relatives internes diminuent et leur retrait augmente. Le gradient de retrait commence donc à se stabiliser, et le moment de tuilage qui en est induit devient moins important (Figure 6).

Le tuilage est ainsi principalement piloté par l'avancement du front de séchage au sein du matériau. La réponse aux contraintes hydriques qui sollicitent le squelette solide est cependant aussi fonction de la rigidité du matériau.

Afin de comprendre l'évolution des contraintes au sein de l'échantillon, la pression équivalente dans les pores $\xi(x, t)$ a été calculée à travers l'équation 2 proposée par Coussy et al. (Coussy et al. 2004) à partir des distributions spatio-temporelles de la pression capillaire $p_c(x, t)$ et de la saturation $S(x, t)$.

$$\xi(x, t) = S(x, t) \cdot p_c(x, t) + \int_S^1 p_c(S') dS' \quad (2)$$

S' est la variable d'intégration dénotant une saturation fictive.

L'évolution spatio-temporelle de la pression capillaire interne $p_c(x, t)$ est obtenue à partir de la distribution spatio-temporelle de l'humidité relative interne $HR(x, t)$, en utilisant l'équation 3 de Kelvin-Laplace :

$$p_c(x, t) = -\frac{R \cdot T}{v_l^w} \left[\ln \left(\frac{HR(x, t)}{100} \right) \right] \quad (3)$$

où x est la distance à la surface de séchage, v_l^w est le volume molaire de l'eau, R est la constante des gaz parfaits et T est la température.

La saturation est déduite des isothermes de désorption obtenues, comme présenté dans (Samouh et al. 2017), à partir de la porosité à l'eau et de la porosimétrie mercure.

L'expression de la pression équivalente dans les pores (équation 2) inclut les trois mécanismes du retrait : le premier terme tient en effet compte de la pression capillaire et des pressions de disjonction, et le second terme représente l'énergie de surface (associée aux pressions d'interface).

La Figure 7 présente l'évolution spatio-temporelle de la pression équivalente dans les pores et montre que les pressions les plus élevées sont situées dans la partie supérieure de la poutre, mais pas exactement à la surface d'échange. En effet, le gradient de séchage conduit à une humidité relative plus faible en surface, ce qui engendre des pressions capillaires plus élevées que dans le corps de l'échantillon, mais il conduit également à un très faible degré de saturation près de la surface supérieure. Comme l'expression de la pression équivalente dans les pores (équation 2) est une combinaison de la pression capillaire et du degré de saturation, la pression équivalente n'est pas maximale directement à la surface de séchage dont la saturation est très faible. Ceci est cohérent avec les résultats de la **Figure 5** qui montrent que le séchage des couches superficielles n'entraîne pas de retrait significatif et que front de séchage devrait atteindre une profondeur d'environ 10 mm pour que le retrait différentiel développé soit suffisamment élevé pour soulever les extrémités de la poutre.

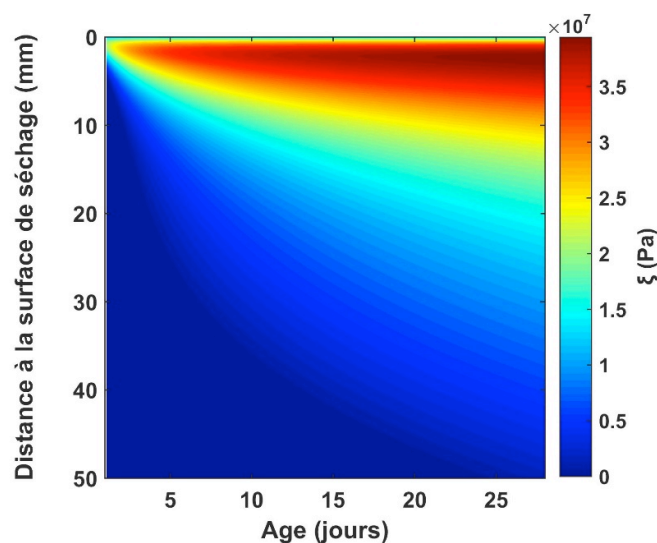


Figure 7 Evolution spatio-temporelle de la pression équivalente dans les pores

Il est à préciser que l'équilibre hydrique avec le milieu ambiant n'a toujours pas été atteint à la fin de l'essai (Figure 5). Le transfert d'humidité au sein des matériaux cimentaires est un phénomène assez lent et complexe dépendant de la diffusivité hydrique qui, elle, dépend de la teneur en eau et de la formation du squelette solide. Le séchage continu de l'échantillon conduit sur le long terme à une diminution de l'amplitude du gradient de retrait, une relaxation des contraintes se produit et le tuilage commence à diminuer. Ce comportement a été observé par Hajibabae et al. (Hajibabae et al. 2016) pour des poutres de 13 mm d'épaisseur, dont le séchage avance plus rapidement que dans le cas des poutres testées ici.

La teneur en eau étant un paramètre clé dans l'évolution des autres propriétés du matériau, le séchage différentiel conduit également à la formation d'autres gradients au sein du matériau. En considérant que l'hydratation est très ralentie lorsque l'humidité relative baisse significativement, un gradient d'hydratation peut apparaître dans l'épaisseur de la dalle. La Figure 8 présente le degré d'hydratation de chacune des couches au moment où elle commence à perdre de l'humidité relative et devient donc soumise aux effets du séchage. La Figure 8 présente également la porosité accessible à l'eau à cet âge.

Des gradients d'hydratation et de porosité sont observés entre les surfaces supérieure et inférieure de l'échantillon. Le degré d'hydratation est plus faible et la porosité plus élevée dans la partie supérieure de l'échantillon. Ces distributions auraient sans doute été encore plus marquées si le prélèvement a pu être fait au voisinage immédiat de la surface de séchage.

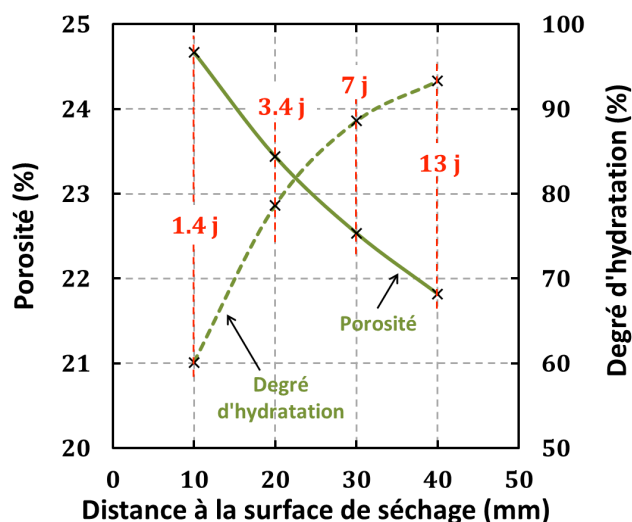


Figure 8 Gradients de porosité et d'hydratation

Ces gradients résultent de l'interaction entre deux phénomènes antagonistes qui ont lieu au sein du matériau : la consommation de l'eau libre par l'hydratation du ciment et le transfert de l'eau vers le milieu ambiant et son évaporation par séchage (Samouh et al. 2017). Les valeurs mesurées sont en effet le résultat de la compétition entre le séchage (plus important en surface) et l'hydratation (plus avancée en profondeur).

La porosité élevée en surface témoigne d'une hydratation gênée par le séchage à cet endroit. Cette porosité élevée facilite la progression du front de séchage dans la profondeur de la dalle. Les couches situées dans la partie inférieure de la dalle ont par contre très peu et tardivement été touchées par le séchage, ce qui justifie leurs plus faibles porosités. La porosité est en effet plus faible là où l'hydratation est avancée. Il est à noter qu'un effet de ségrégation peut aussi s'ajouter à ceci et accentuer ce gradient de porosité.

La meilleure hydratation du matériau dans la partie inférieure de la dalle pourrait conduire à la formation d'un réseau poreux plus fin, ce qui générerait des contraintes plus importantes. La déformation macroscopique observée semble ainsi traduire cette compétition entre les deux phénomènes de séchage et d'hydratation.

Le retrait plus important à proximité de la surface indique une prédominance de l'effet du séchage par rapport à l'hydratation. L'important départ d'eau en surface conduit au ralentissement ou à l'arrêt de l'hydratation dans la partie supérieure de la dalle, ce qui engendre une plus faible rigidité. Les plus fortes contraintes, jointes à cette faible rigidité, justifient la plus grande déformation observée en surface.

Il est à noter que le gradient des propriétés mécaniques induit par le gradient d'hydratation peut nuire à la durabilité de la structure. Étant donné son hydratation inachevée, la partie supérieure de la dalle est moins résistante et relativement vulnérable. Les précautions nécessaires doivent être prises afin de ralentir le séchage du matériau et ainsi maintenir une humidité relative interne élevée et atténuer les gradients au sein de la structure.

4. CONCLUSIONS

Dans cet article, la relation entre le phénomène du tuilage et le gradient d'humidité relative au sein d'une dalle a été étudiée. L'évolution de plusieurs paramètres tels que l'humidité relative interne, la porosité à l'eau, le retrait différentiel et le degré d'hydratation a été suivie pour le mortier étudié et a permis de mettre en évidence la présence de différents gradients pouvant nuire à la durabilité de la structure. Les résultats de l'étude permettent de dégager les conclusions suivantes :

- Un nouveau banc de mesure du tuilage a été développé et équipé de capteurs laser qui permettent d'effectuer des mesures sans contact et donc de suivre les déplacements verticaux dès le jeune âge. Deux autres bancs de rayon de séchage identique ont aussi été

conçus pour permettre le suivi, en parallèle, de l'humidité relative interne et du retrait longitudinal à différentes profondeurs.

- L'évolution du tuilage est principalement pilotée par l'avancement du front de séchage, et donc par la diminution progressive de l'humidité relative interne de couches de plus en plus profondes. Le séchage différentiel conduit à un gradient de retrait, des moments fléchissant apparaissent ainsi aux extrémités et entraînent le tuilage.
- Le séchage est à l'origine également d'un gradient d'hydratation qui génère un gradient de porosité et un gradient des propriétés mécaniques. Ces gradients résultent principalement de la compétition entre l'hydratation et le séchage du mortier.

Ces hétérogénéités génèrent certains effets néfastes pour les structures en béton, notamment la mauvaise hydratation de la partie supérieure exposée au séchage, le tuilage des dalles par le retrait différentiel, et le risque élevé de fissuration suite aux contraintes d'empêchement interne au sein du matériau. La durabilité de la structure peut ainsi être compromise si les précautions nécessaires ne sont pas prises, notamment au niveau de la cure.

RÉFÉRENCES

- Coussy, O., Dangla, P., Lassabatère, T. & Baroghel-Bouny, V., 2004. The equivalent pore pressure and the swelling and shrinkage of cement-based materials. *Materials and Structures*, 37(1), pp.15–20.
- Eisenmann, J. & Leykauf, G., 1990. Simplified Calculation Method Slab Curling Caused by surface Shrinkage. In *Second international workshop on the theoretical design of concrete pavements*. pp. 187–197.
- Hajibabaei, A., Grasley, Z. & Ley, M.T., 2016. Mechanisms of dimensional instability caused by differential drying in wet cured cement paste. *Cement and Concrete Research*, 79, pp.151–158.
- Lenormand, T., Rozière, E., Loukili, A. & Staquet, S., 2015. Incorporation of treated municipal solid waste incineration electrostatic precipitator fly ash as partial replacement of Portland cement: Effect on early age behaviour and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 96, pp.256–269.
- Samouh, H., Soive, A., Rozière, E., & Loukili, A., 2016. Experimental and numerical study of size effect on long-term drying behavior of concrete: influence of drying depth. *Materials and Structures*, 49(10), pp.4029–4048.
- Samouh, H., Rozière, E. & Loukili, A., 2017. The differential drying shrinkage effect on the concrete surface damage: Experimental and numerical study. *Cement and Concrete Research*, 102, pp.212–224.
- Shadravan, S., Ramseyer, C. & Kang, T.H.K., 2015. A long term restrained shrinkage study of concrete slabs on ground. *Engineering Structures*, 102, pp.258–265.
- Slowik, V., Hübner, T., Schmidt, M., & Villmann, B., 2009. Simulation of capillary shrinkage cracking in cement-like materials. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), pp.461–469.
- Wilson, M.A., Carter, M.A. & Hoff, W.D., 1999. British standard and RILEM water absorption tests: a critical evaluation. *Materials and Structures*, 32(8), pp.571–578.
- Wolf, H.E., Qian, Y., Edwards, J. R., Dersch, M. S., & Lange, D. A., 2016. Temperature-induced curl behavior of prestressed concrete and its effect on railroad crossties. *Construction and Building Materials*, 115, pp.319–326.
- Yinghong, Q., 2011. *Numerical study on the curling and warping of hardened rigid pavement slabs*. PhD Dissertation, Michigan Technological University.
- Ytterberg, R., 1987. Shrinkage and curling of slabs on grade (Part a). *Concrete international*, 9(4), pp.22–31.