

---

# Étude expérimentale de l'effet de la chaux sur le comportement différé des chapes et modélisation du tuilage associé

**Reda JAAFRI**

*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. Le séchage unidirectionnel des matériaux cimentaires, tels que les chapes ou les voiles, est une problématique courante en génie civil qui peut avoir des conséquences majeures sur le comportement structurel de ces éléments. Elle est à l'origine de retrait importants qui favorisent la fissuration et/ou le tuilage. Le recours à une cure adaptée s'avère donc nécessaire. L'objectif de l'approche décrite ici est d'évaluer le potentiel effet de cure de la chaux naturelle hydraulique (NHL) et d'étudier son impact sur le comportement structurel des matériaux cimentaires, et en particulier sur le tuilage. Dans cette optique, des outils expérimentaux et de modélisation sont utilisés conjointement. Les résultats ont montré que l'action combinée de l'effet de la chaux sur la microstructure et sur l'état hydrique du matériau entraîne la réduction de l'amplitude du tuilage et retarde son développement. Sur la base des résultats expérimentaux et principalement des évolutions spatio-temporelles de l'humidité interne, un modèle poroviscoélastique a été proposé. Les calculs ont montré que la chaux conduit à une profondeur d'endommagement plus importante, ce qui contribue à la diminution du tuilage.*

*ABSTRACT. Unidirectional drying of cementitious materials, such as screeds or sails, is a common problem that can have major consequences on the structural behavior of these elements. It may lead to important shrinkages which favor the cracking and/or the curling. The use of a suitable curing is therefore necessary. The objective of the approach described here is to evaluate the potential curing effect of natural hydraulic lime (NHL) and to study its impact on the structural behavior of cementitious materials, and in particular on curling. In this perspective, experimental and numerical tools are used together. The results showed that the combined action of the effect of lime on the microstructure and on the hydric state of the material leads to the reduction of the amplitude of the curling and delays its starting time. On the basis of the experimental results and mainly the spatio-temporal evolutions of the internal humidity, a poroviscoelastic model has been proposed. Calculations have shown that lime leads to a greater damage depth, which contributes to the decrease in curling.*

*MOTS-CLÉS : Tuilage, chaux naturelle hydraulique, humidité relative, profondeur d'endommagement, microstructure.*

*KEY WORDS: Curling, natural hydraulic lime, relative humidity, damage depth, microstructure.*

---

## 1. Introduction

L'exposition au séchage des chapes ou des voiles, coulés sur des épaisseurs relativement faibles et avec de grandes surfaces d'échange avec l'air est une problématique courante en génie civil. Les retraits induits ont des conséquences majeures sur le comportement structurel des matériaux cimentaires. Lorsque les deux faces opposées d'un élément sont soumises à des conditions d'humidité relative différentes, des déformations différentielles apparaissent dans l'épaisseur et peuvent entraîner un risque élevé de fissuration lorsque les mouvements sont empêchés et/ou de tuilage s'ils sont libres. Ce dernier phénomène traduit le soulèvement des coins et des bords des dalles minces.

Le gradient thermique peut aussi être à l'origine du tuilage des dalles posées sur le sol (cas des chaussées par exemple). Dans le cas des chapes, coulées sur de faibles épaisseurs, son effet demeure cependant beaucoup moins important que celui du gradient d'humidité relative interne. Cependant, les recherches existantes portent essentiellement sur le tuilage causé par un gradient de température, et le tuilage induit par le séchage est resté relativement peu étudié. Le travail de recherche présenté ici vise ainsi à contribuer à l'amélioration des connaissances sur le phénomène du tuilage et à vérifier l'intérêt de l'utilisation de la chaux pour en limiter l'amplitude.

La teneur en eau étant un paramètre clé dans l'évolution du tuilage hydrique, il s'avère essentiel de recourir à une cure appropriée afin de garder l'eau plus longtemps dans la dalle ou la chape, empêcher ainsi le séchage trop rapide de la surface supérieure et maintenir une humidité relative interne élevée et homogène. Cependant, des études récentes ont montré qu'une cure prolongée, quoique souvent recommandée pour assurer des performances optimales, n'est pas forcément favorable vis à vis du retrait de séchage et du tuilage. La cure permet en effet à la matrice de mieux s'hydrater, ce qui conduit à un raffinement des pores, une augmentation des tensions capillaires, et donc un retrait et un tuilage plus importants. Le choix d'une cure adaptée et cohérente avec la composition du matériau est donc crucial.

Dans cette optique, et en raison de la grande capacité de rétention d'eau de la chaux, et de la porosité grossière engendrée par son incorporation aux matériaux cimentaires, celle-ci entraîne de faibles pressions capillaires et se présente ainsi comme un matériau prometteur pour réduire l'amplitude du tuilage [ARA 06]. Des outils expérimentaux et de modélisation ont donc été utilisés conjointement en vue d'étudier son potentiel effet de cure interne. L'approche expérimentale adoptée est celle d'une étude systématique et rationnelle, avec une caractérisation globale des matériaux testés. Une modélisation analytique du phénomène a également été réalisée en vue d'étayer les conclusions de l'étude expérimentale. Le modèle utilisé est basé sur les équations de la poromécanique et tient compte du comportement viscoélastique des matériaux.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Matériaux et formulation

L'objectif de cette étude est de déterminer l'impact de la chaux naturelle hydraulique (NHL) sur le tuilage des dalles cimentaires. Un mortier de référence a d'abord été formulé avec un rapport E/C de 0,6. Il est composé de ciment Portland (CEM I 52,5 N), de filler calcaire (FC), de sable siliceux 0/4 et d'eau. La quantité de ciment dans le mortier de référence est par la suite substituée en masse, mais à volume de pâte constant, par 12,5%, 25% et 50% de NHL (Tableau 1).

**Tableau 1.** Compositions des mortiers étudiés

	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	FC (kg/m <sup>3</sup> )	NHL (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (kg/m <sup>3</sup> )
Reference FC	455	273	-	1152.8	280
FC + 12.5% NHL	390.2	273	55.7	1152.8	280
FC + 25% NHL	327.8	273	109.3	1152.8	280
FC + 50% NHL	210.3	273	210.3	1152.8	280

### 2.2. Procédures expérimentales

Le tuilage a été mesuré à l'aide d'un moule en acier de dimensions internes de 1000 × 100 × 50 mm<sup>3</sup> développé au sein du GeM (Figure 1). 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 électriques type Micro-Epsilon ILD1420-10 d'une précision de 0,5 µm sont utilisés pour mesurer

sans contact le déplacement vertical de la poutre. L'échantillon est exposé à la dessiccation sur la surface supérieure (de dimensions de  $1000 \times 100 \text{ mm}^2$ ).

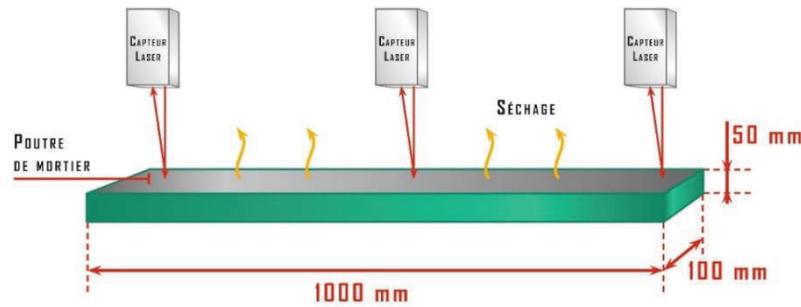


Figure 1. Banc de mesure du tuilage.

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 (Figure 2). Quatre réservations ont été réalisées dans la profondeur de l'éprouvette en utilisant des tubes en plastique insérés lors du coulage du mortier. À l'âge de 1 jour, les tubes sont extraits, et des capteurs d'humidité Rotronic HC2-C05 sont installés. Une colle est utilisée par la suite pour fermer les réservations et empêcher que les mesures ne soient impactées par un séchage direct. Les mesures ont été effectuées à des profondeurs de 10 mm, 20 mm, 30 mm et 40 mm. Les capteurs ont été placés dans différents plans verticaux afin de minimiser l'influence des capteurs les uns sur les autres.

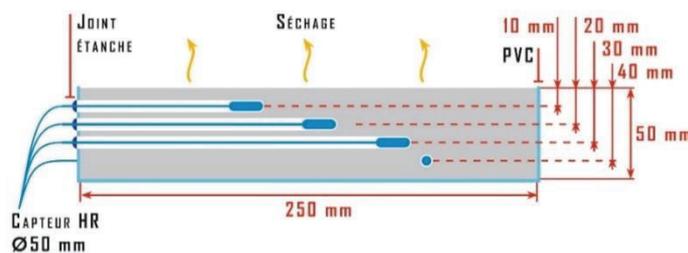


Figure 2. Banc de mesure de l'humidité interne (vue de côté).

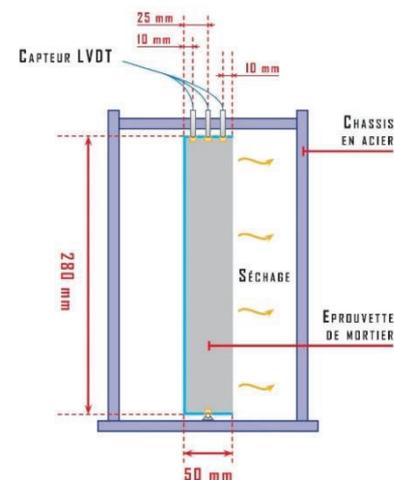


Figure 3. Mesure du retrait différentiel.

Les gradients d'humidité relative interne dans l'épaisseur de l'échantillon conduisent à des gradients de retrait. Les déformations différentielles du retrait total ont été mesurées à partir de 24 heures sur des éprouvettes de dimensions  $50 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$  (Figure 3). La 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 placés à 10 mm, 25 mm et 40 mm de la surface de séchage.

Les essais sont réalisés dans une salle régulée en température et en humidité relative ( $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $50 \pm 5\%$ ). Les dimensions des éprouvettes de mesure de l'humidité relative interne et des déformations différentielles sont choisies de sorte à avoir le même rayon de séchage que le banc de mesure du tuilage, et ainsi réduire l'effet de la taille de l'échantillon sur la cinétique de séchage.

### 2.3. Modélisation analytique du retrait à partir du tuilage

Un modèle poroviscoélastique a été utilisé pour estimer le tuilage induit par le séchage, et ce, à partir de résultats expérimentaux relativement accessibles. La méthodologie suivie est décrite dans la figure 4. Elle permet d'obtenir l'évolution dans le temps du tuilage à l'extrémité de la poutre. En faisant correspondre le tuilage calculé à celui mesuré expérimentalement, les paramètres viscoélastiques du matériau peuvent être déduits. Ceci permet

par la suite de recalculer le retrait, dit « correct », en tenant compte cette fois-ci du comportement viscoélastique du matériau.

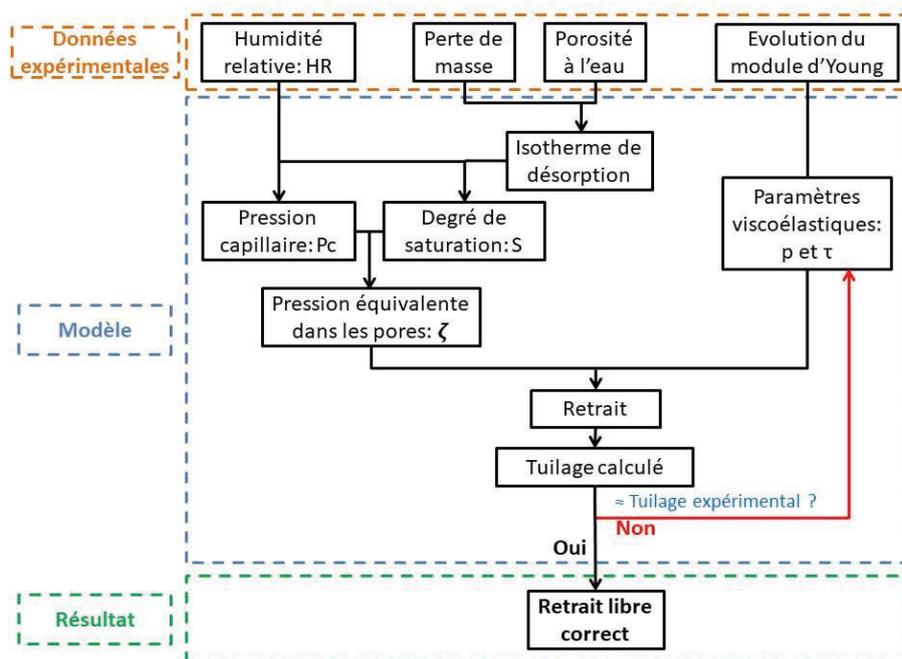


Figure 4. Diagramme de la procédure de modélisation.

L'évolution spatiotemporelle de la pression capillaire interne est obtenue, en utilisant l'équation de Kelvin-Laplace, à partir de la distribution spatiotemporelle de l'humidité relative interne.

L'évolution de la saturation moyenne a été calculée à partir de l'évolution de la porosité totale accessible à l'eau et de la perte de masse moyennes en utilisant l'équation [1] introduite dans [JAA 19]. En corrélant l'évolution dans le temps de la saturation de l'échantillon avec son humidité interne moyenne, une isotherme de désorption moyenne est obtenue. A partir de cette courbe moyenne, et en utilisant la distribution spatiotemporelle de l'humidité relative interne, une distribution spatiotemporelle de la saturation a été déduite.

$$S(t) = \frac{\phi(t)}{\phi(t) - \delta\phi(t)} - \frac{\delta m(t)}{(\phi(t) - \delta\phi(t)) \cdot V \cdot \rho_w} \quad [1]$$

La pression équivalente dans les pores a par la suite été calculée à partir des évolutions spatiotemporelles de la pression capillaire et du degré de saturation [SAM 17].

Finalement, l'évolution spatiotemporelle du retrait libre axial a été obtenue à partir de la pression équivalente dans les pores et du module viscoélastique vieillissant  $E_p(t)$  calculé à travers l'équation [2].

$$E_p(t) = \left( p \cdot e^{-t/\tau} + (1 - p) \right) \cdot E(t) \quad [2]$$

$E(t)$  est l'évolution dans le temps du module d'Young,  $p$  est un paramètre de relaxation et  $\tau$  est le temps caractéristique de relaxation viscoélastique. Les paramètres  $p$  et  $\tau$  dépendent des propriétés du matériau étudié. Un modèle d'optimisation a donc été inclus dans le calcul pour permettre de calibrer ces deux paramètres pour chacun des mortiers testés. En effet, le tuilage numérique étant calculé à partir de la déformation axiale due au retrait libre, un calcul itératif a permis de déterminer les paramètres  $p$  et  $\tau$  afin de reproduire le tuilage expérimental.

### 3. Résultats et discussion

Afin de cerner l'effet de NHL sur le tuilage des matériaux cimentaires, l'évolution du tuilage a été suivie pour des mortiers où le ciment a été substitué par des taux croissants en NHL. La figure 5 montre que l'incorporation de la chaux conduit à une diminution significative de l'amplitude du tuilage, avec un optimum observé pour un dosage de 25% en NHL. De surcroît, NHL conduit à un retard dans le développement du tuilage.

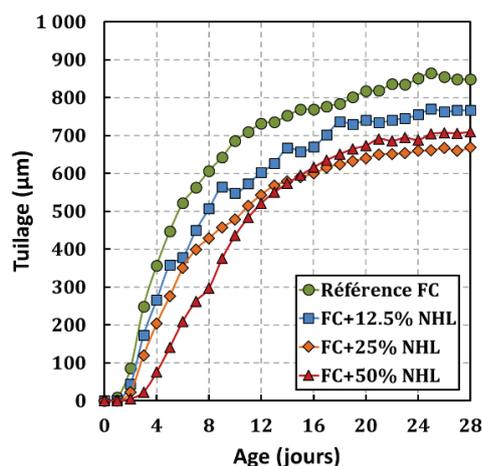


Figure 5. Evolution du tuilage des mortiers avec différents taux de NHL.

Cet effet sur le tuilage est le résultat de l'influence de NHL sur la microstructure et sur l'état hydrique du matériau. La chaux modifie en effet la structure poreuse des mélanges en conduisant à la formation de pores plus grossiers (Figure 6). Ceci est dû aux rapports E/C plus élevés pour les mélanges contenant NHL, et aux plus faibles quantités de ciment dans ces mélanges, ce qui entraîne la formation d'un plus faible volume d'hydrates et donc à un moindre raffinement des pores. Cet effet sur la microstructure conduit à de plus faibles pressions capillaires.

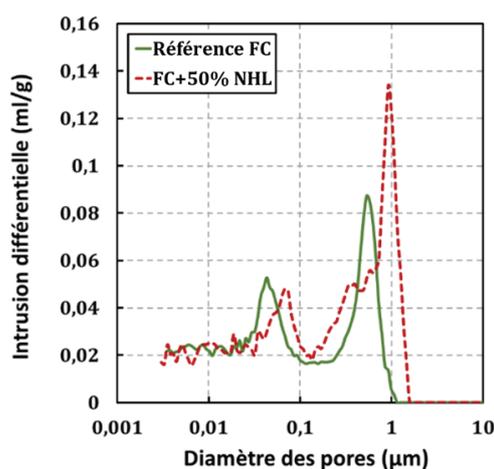


Figure 6. Distributions porales des mélanges Référence et FC+50% NHL.

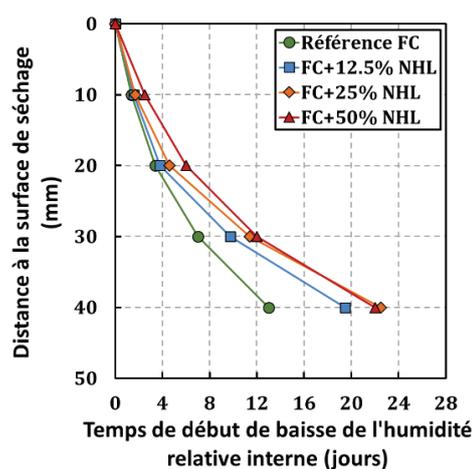


Figure 7. Temps de début de baisse de l'humidité interne à différentes profondeurs.

De surcroît, par sa grande capacité de rétention d'eau, NHL est capable de fixer une partie de l'eau de gâchage, contribuant ainsi à maintenir une humidité relative interne élevée. En effet, la figure 7 présente pour chacun des mélanges étudiés, le temps où l'humidité relative interne commence à baisser à différentes profondeurs au sein des échantillons. Il y apparaît que l'humidité interne reste élevée plus longtemps lorsque le taux de substitution du ciment par la chaux croît, ce qui indique que celle-ci agit effectivement comme un agent de cure qui garde l'eau plus longtemps au sein de la dalle. La Figure 8 présente le tuilage des matériaux étudiés en fonction de leurs profondeurs de séchage définie ici comme l'épaisseur de la couche, au-dessous de la surface, sur laquelle l'humidité relative interne mesurée est inférieure à l'humidité relative initiale de 100%. Elle montre qu'une seule courbe maîtresse permet pour tous les mélanges de décrire la relation entre le tuilage et la profondeur de séchage, et prouve que le tuilage est principalement piloté par l'avancement du front de séchage. Cependant, l'évolution dans le temps de cette profondeur de séchage est différente pour chaque mélange : le front de séchage avance plus lentement lorsque le dosage en NHL augmente.

L'action combinée de cet effet de cure interne et de l'effet de NHL sur la microstructure du matériau entraîne une réduction significative de l'amplitude du retrait. En plus des plus faibles retraits observés, l'incorporation de NHL induit de plus faibles gradients de déformation dans l'épaisseur de la dalle (Figure 9). Ces gradients étant les

principaux facteurs du tuilage, leur réduction est cohérente avec la diminution de l'amplitude finale du tuilage et avec le retard dans le début de son développement (Figure 5).

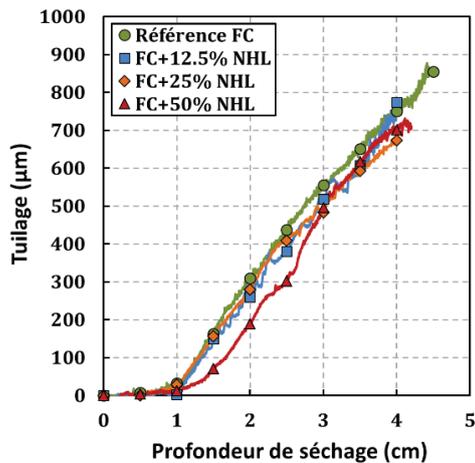


Figure 8. Tuilage en fonction de la profondeur de séchage des mortiers étudiés.

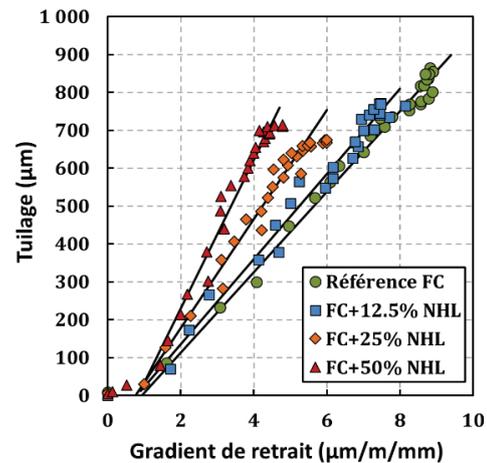


Figure 9. Evolution des gradients de retrait au sein des mortiers étudiés.

Il est à noter que l'influence de NHL sur le retrait différentiel semble plus marquée que sur le tuilage (Figure 9). La NHL influencerait donc également sur le comportement structural. Cet effet pourrait résulter des gradients de propriétés mécaniques dans l'épaisseur, ou de l'apparition d'une zone d'endommagement plus importante à la surface des dalles contenant de la chaux. Afin de vérifier ceci, la modélisation de l'état de contrainte interne s'avère essentielle.

L'approche de modélisation décrite dans la figure 4 permet d'obtenir le retrait libre calculé au sein de l'échantillon. Celui-ci est cependant différent du retrait libre total mesuré expérimentalement. Le retrait libre est en effet calculé avec l'hypothèse que les différentes couches de la dalle sont libre de se déformer indépendamment les unes des autres. Ceci n'est cependant pas le cas en réalité, en effet, les interactions entre les différentes couches de la dalle engendrent un empêchement des déformations [BAZ 82].

Le retrait libre total  $\varepsilon_{total}$  mesuré expérimentalement à chaque position est donc exprimé comme la somme du retrait libre  $\varepsilon_{libre}$ , d'une déformation de fluage  $\varepsilon_{fluage}$  et d'une déformation élastique  $\varepsilon_{élastique}$  (équation [3]). La déformation élastique est celle imposée par le principe de compatibilité des contraintes.

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{libre} + \varepsilon_{fluage} + \varepsilon_{élastique} \quad [3]$$

Les termes représentant les déformations de fluage et élastique s'écrivent sous la forme

$$\varepsilon_{fluage} + \varepsilon_{élastique} = J \cdot \sigma \quad [4]$$

Où  $J$  est la complaisance et  $\sigma$  est la contrainte d'empêchement interne

A partir des équations [3] et [4], l'état de contraintes au sein des dalles étudiées peut être déduit de l'écart entre les mesures réelles du retrait différentiel et l'évolution spatiotemporelle du retrait libre.

$$\sigma = \frac{\varepsilon_{total} - \varepsilon_{libre}}{J} \quad [5]$$

L'évolution du retrait total est obtenue à partir des mesures expérimentales du retrait aux trois différentes positions (Figure 3). Afin d'en obtenir une distribution spatiotemporelle, les retraites expérimentaux ont été interpolés selon la méthode décrite dans [JAA 19]. Lorsque le retrait total est supérieur au retrait libre calculé, des contraintes de compression se développent. Des contraintes de traction apparaissent par contre quand le retrait total est inférieur aux valeurs calculées.

La figure 10 présente l'évolution de l'état des contraintes au sein du mortier de référence. Elle montre qu'il existe une large zone où le mortier est comprimé. Les contraintes de compression dans le corps et au fond de l'échantillon sont largement inférieures à la résistance à la compression du matériau. Des contraintes de compression apparaissent également près de la surface de séchage dont le retrait libre calculé est nul en tout temps. Ceci est dû à l'expression mathématique du retrait qui contient une dérivation de la pression équivalente dans les pores qui, comme l'humidité relative et la saturation, est constante à la surface de séchage.

Le retrait élevé des couches proches de la surface d'échange est empêché par les couches inférieures qui développent un retrait moindre. Ainsi, des contraintes de traction apparaissent en surface dans la partie supérieure de la dalle juste au-dessous de la surface d'échange. Ces contraintes atteignent des valeurs maximales rapidement après le début du séchage. Avec la poursuite du séchage ces contraintes commencent à diminuer.

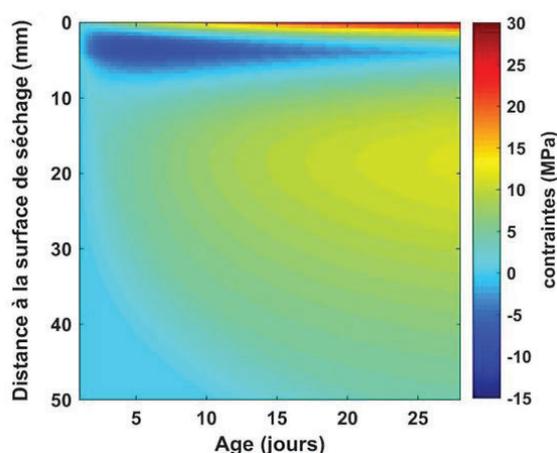


Figure 10. Simulation de l'état de contraintes au sein du mortier Référence.

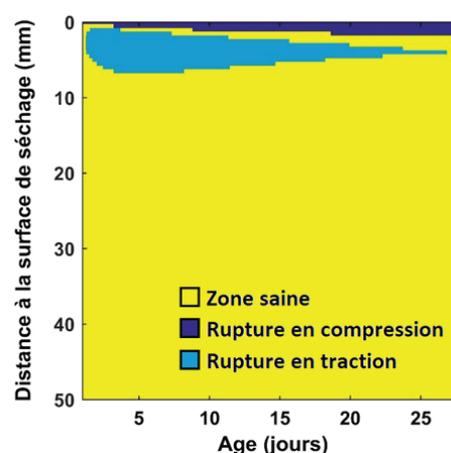


Figure 11. Simulation de l'état d'endommagement du mortier Référence.

Le développement des contraintes reste cependant limité par les résistances mécaniques du matériau. En effet, la faible résistance à la traction et à la compression du mortier, en particulier de la zone proche de la surface de séchage, risque éventuellement de conduire à une microfissuration.

A partir de l'état de contraintes au sein de la poutre et de la résistance à la traction et la compression du matériau, l'évolution d'une profondeur d'endommagement peut être déterminée. Cette profondeur est définie comme étant l'épaisseur de la couche où les contraintes dépassent les résistances mécaniques [SAM 17]. Des microfissures sont susceptibles d'apparaître dans cette zone, ce qui peut conduire à une relaxation des contraintes. La figure 11 présente pour le mélange de référence les zones où les résistances à la traction et à la compression sont dépassées. Une fine couche d'endommagement par compression apparaît à la surface de séchage et augmente légèrement avec le temps. Une zone plus importante d'endommagement par traction apparaît juste au-dessous de la surface de séchage et croît rapidement en fonction du temps avant de commencer à se dissiper.

La diminution de la profondeur endommagée au fur et à mesure que le séchage progresse est cohérente avec les observations de Hwang et Young [HWA 84] selon lesquelles des microfissures induites en surface par le retrait libre se forment d'abord, puis se referment avec le temps. Les contraintes de traction dans les couches superficielles induirait en effet un risque élevé de fissuration, cependant, ces couches atteignent rapidement l'équilibre hydrique alors que les couches les plus profondes continuent de sécher et donc de développer du retrait : la contrainte maximale de traction commence donc à diminuer [GRA 06], ce qui entraîne une fermeture des microfissures apparues à la surface [GRA 06].

Tableau 2. Profondeurs endommagées des mortiers étudiés

	Reference FC	FC + 12.5% NHL	FC + 25% NHL	FC + 50% NHL
<b>Profondeur endommagée (mm)</b>	6.5	7	11	10

En appliquant cette approche aux mélanges étudiés et en supposant que l'endommagement est irréversible, le tableau 2 présente la profondeur maximale endommagée pour chacun des échantillons. Il y apparaît que l'épaisseur endommagée augmente lorsque la teneur en NHL augmente, avec cependant un pessimum à 25% NHL. Les calculs ont montré que cet endommagement maximal est atteint pendant les dix premiers jours avec une évolution plus lente pour les mélanges contenant de la chaux.

Il est important de rappeler que la microfissuration est due non pas au retrait en lui-même mais aux contraintes d'empêchement interne qui provoquent des contraintes de traction au sein du matériau. La plus grande profondeur endommagée des mortiers contenant NHL est en effet due et à leurs plus faibles résistances à la traction et aux contraintes plus élevées au sein de ces mélanges. En effet, NHL garde une humidité relative élevée plus longtemps.

dans les couches inférieures de la dalle ; ces couches ne commencent donc à développer du retrait que très tard et empêchent ainsi fortement le retrait des couches proches de la surface. Inversement, le retrait des couches inférieures du mortier de référence commence à se développer assez tôt, ce qui conduit à de plus faibles contraintes d'empêchement. Les plus faibles contraintes du mortier de référence peuvent également être dues à un module viscoélastique faible, et donc à une relaxation des contraintes plus élevée. Ceci est en effet cohérent avec les conclusions d'une étude précédente indiquant une relaxation plus faible lorsque le dosage en NHL augmente [JAA 19].

Les microfissures générées dans la partie supérieure des dalles peuvent influencer l'évolution du tuilage entraînant la diminution de son amplitude. La plus grande profondeur endommagée des mélanges contenant NHL contribue ainsi à expliquer leurs plus faibles tuilages. Le tuilage légèrement plus élevé du mortier FC+50% NHL comparé au FC+25% NHL peut donc probablement être dû à la plus faible profondeur endommagée de FC+50% NHL comparée au FC+25% NHL.

#### 4. Conclusions

Cet article s'intéresse à l'impact de la chaux naturelle hydraulique (NHL) sur le comportement structurel des matériaux cimentaires, et en particulier sur le tuilage. L'objectif a été de comprendre le mécanisme d'action de NHL et de vérifier l'intérêt de son utilisation vis-à-vis du retrait et du tuilage. Dans cette optique, des outils expérimentaux et de modélisation ont été utilisés conjointement. Les résultats de l'étude permettent de dresser les conclusions suivantes :

- Le tuilage est principalement piloté par l'avancement du front de séchage dans la profondeur de la dalle, et donc par la diminution progressive de l'humidité relative interne. En raison de la forte capacité de la chaux à retenir l'eau, le front de séchage avance plus lentement lorsque le dosage en NHL augmente.
- L'action combinée de l'effet de NHL sur la microstructure du matériau et sur son état hydrique entraîne une réduction de l'amplitude finale du tuilage et un retard de son développement.
- NHL permet, grâce à ses caractéristiques physico-chimiques, d'éviter le développement d'amplitudes de retrait élevées habituellement observées lorsqu'une cure est appliquée.
- Le gradient de retrait conduit au développement de contraintes internes qui engendrent un endommagement de la partie supérieure de l'échantillon. Le faible taux de relaxation induit par l'ajout de la chaux, joint à la progression plus lente du front de séchage, conduit à une profondeur d'endommagement plus importante lorsque le dosage en NHL croît. Ceci contribue à la diminution de l'amplitude du tuilage.

#### 5. Bibliographie

- [ARA 06] ARANDIGOYEN, M., ALVAREZ, J., « Blended pastes of cement and lime : Pore structure and capillary porosity », *Applied Surface Science*, 252(23), 2006, p.8077-8085.
- [BAZ 82] BAZANT, Z.P., RAFTSHOL, W.J., « Effect of cracking in drying and shrinkage specimens », *Cement and Concrete Research*, 12(2), 1982, p.209-226.
- [GRA 06] GRASLEY, Z.C., LANGE, D.A., D'AMBROSIA, M.D., « Internal relative humidity and drying stress gradients in concrete », *Materials and Structures*, 39(9), 2006, p.901-909.
- [HWA 84] HWANG, C.-L., YOUNG, J.F., « Drying shrinkage of portland cement pastes I. Microcracking during drying », *Cement and Concrete Research*, 14(4), 1984, p.585-594.
- [JAA 19] JAAFRI, R., SAMOUH, H., ROZIERE, E., ALAM, SY., LOUKILI, A., « Experimental and numerical analysis of curling behavior of natural hydraulic lime - cement based mortars », *Cement and Concrete Research*, 117, 2019, p. 1-15.
- [SAM 17] SAMOUH, H., ROZIERE, E. & LOUKILI, A., « The differential drying shrinkage effect on the concrete surface damage: Experimental and numerical study », *Cement and Concrete Research*, 102, 2017, p.212-224.