



# MÉTHODE DE MATURITÉ

**Fredrick Akuamoah**  
**Avril 2021**

## TABLE DES MATIÈRES

<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>Méthode de maturité</b>	<b>3</b>
<b>Indice de maturité</b>	<b>4</b>
<b>Relation entre résistance et maturité</b>	<b>5</b>
<b>Application de la méthode de maturité</b>	<b>7</b>
<b>Limites de la méthode de maturité</b>	<b>8</b>
<b>Conclusion et recommandations</b>	<b>8</b>
<b>Références</b>	<b>9</b>

# RÉSUMÉ

La méthode de maturité est une technique utilisée pour fournir une estimation plus précise des effets du temps et de la température sur l'évolution de la résistance du béton. La méthode de maturité est un moyen non destructif et fiable d'estimer la résistance du béton sur chantier. Elle permet un meilleur contrôle de la qualité, réduit les coûts des essais traditionnels et de la construction, et contribue à garantir une plus grande sécurité. Toutefois, certaines limitations et considérations doivent être prises en compte lors de l'utilisation de la méthode de maturité. Cet article présente l'utilité de la méthode de maturité comme pratique courante pour l'estimation de la résistance du béton, les codes ASTM pertinents qui s'y appliquent et certaines recommandations quant aux limites de la technique.

## INTRODUCTION

Il est bien connu dans le secteur de la construction que le béton est l'un des matériaux les plus utilisés dans le monde, peut-être parce que les granulats de béton sont disponibles pratiquement partout. Son utilisation très répandue permet de savoir que le béton se comporte différemment en fonction des variations de température. Un béton durci à basse température gagnera en résistance plus lentement que le même béton durci à des températures plus élevées. Cette dépendance par rapport à la température peut constituer une difficulté pour de nombreux entrepreneurs qui ont besoin de connaître la résistance de leur béton, surtout lorsqu'ils essaient d'accélérer leur calendrier pour respecter les délais. L'incapacité à déterminer la résistance d'une dalle de béton avant d'effectuer des opérations de construction critiques comme le décoffrage peut être catastrophique. Selon l'enquête du National Institute of Standards and Technology (Carino et Lew, 2001), l'effondrement des Skyline Towers, un immeuble de plusieurs étages en construction dans le comté de Fairfax, en Virginie, aux États-Unis, le 2 mars 1973, qui a tué 14 ouvriers et en a blessé 34, serait dû à un décoffrage prématuré. Le béton de la dalle de plancher où la défaillance s'est produite n'avait alors que quatre jours, avec un durcissement à une température moyenne de 7 °C. Cinq ans plus tard, le 27 avril 1978, 51 travailleurs ont perdu la vie dans l'effondrement de la tour de refroidissement de Willow Island, Virginie-Occidentale, en raison de la résistance insuffisante du béton pour supporter les charges de construction appliquées : la précédente levée de béton avait été exposée à une température ambiante de 10 °C pendant seulement un jour (Carino et Lew, 2001). Cet incident a fait naître le besoin urgent de normes permettant d'estimer la résistance du béton sur chantier. À la suite des recherches du NIST, la méthode de maturité, un concept introduit au début des années 1950, a été standardisée dans l'American Society for Testing Materials (ASTM) C1074 en 1987. Le présent article entend expliquer cette méthode ainsi que son utilisation et ses limites.

## MÉTHODE DE MATURITÉ

Publiée dans la norme ASTM C1074, la méthode de maturité est une technique utilisée pour estimer l'effet combiné du temps et de la température sur l'évolution de la résistance du béton. La première étape pour appliquer la méthode de maturité consiste à choisir une fonction de maturité pour créer un indice de maturité. La norme ASTM C1074 recommande deux fonctions de maturité : la fonction de maturité Nurse-Saul et la fonction de maturité Freiesleben Hansen et Pedersen, plus connue sous le nom de fonction de maturité Arrhenius. Ces deux fonctions dépendent fortement du profil de température du béton pendant la période de durcissement de ce dernier. La fonction de maturité Nurse-Saul suppose que le taux de gain de résistance est une fonction linéaire de la température. Cette approximation linéaire est l'une des principales limites de la fonction de maturité Nurse-Saul. Elle a été jugée non valide lorsque les températures de durcissement varient fortement pendant la période de durcissement ou au sein de l'élément en béton en cours de durcissement, raison pour laquelle une fonction de maturité plus robuste a été proposée, à savoir la fonction de maturité Arrhenius (Soutsos, Kanavaris et Hatzitheodorou, 2018). Les deux indices de maturité sont nommés dans la norme ASTM C1074 sous le terme « Time-Temperature Factor » (Facteur temps-température, TTF) pour la fonction de maturité Nurse-Saul et « Equivalent Age » (Âge équivalent) pour la fonction de maturité Arrhenius, respectivement.

# INDICE DE MATURITÉ

## Facteur temps-température (Nurse-Saul)

Le TTF est présenté dans l'équation 1 :

$$M(t) = \sum_0^t (T_a - T_o) \Delta t \quad (1)$$

Où :

- $M(t)$  = facteur température-temps, en °C-jours ou °C-heures,
- $\Delta t$  = intervalle de temps, en jours ou heures,
- $T_a$  = température moyenne du béton, en °C, pendant l'intervalle de temps,  $\Delta t$ ,
- $T_o$  = température de référence, en °C.

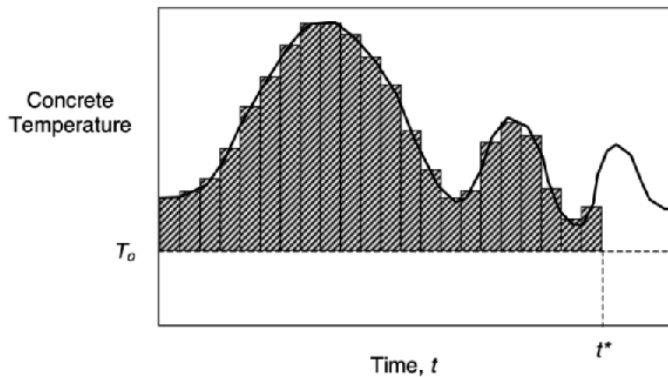


Figure 1 – Historique température-temps (Carino et Lew, 2001).

La figure 1 fournit un exemple d'historique température-temps utilisé pour calculer le TTF à l'aide de l'équation 1. Selon la figure 1, le TTF au moment  $t^*$  est la zone sous la courbe de température et la température de référence.  $T_o$  est défini comme la température en dessous de laquelle le béton cesse de gagner en résistance. Celle-ci varie en fonction du « type de ciment, du type et du dosage des adjuvants utilisés et des autres additifs qui influencent le taux d'hydratation, ainsi que de la plage de températures que le béton connaîtra pendant son durcissement » (ASTM C1074, 2019). Par conséquent, il est essentiel de connaître la bonne valeur  $T_o$  à utiliser pour estimer avec précision la résistance du béton sur chantier. Bien que cela soit rarement utilisé dans la construction commerciale, la norme ASTM C1074 recommande une valeur  $T_o$  de 0 °C pour le ciment de type 1 sans adjuvant et une plage de températures de durcissement entre 0 et 40 °C. La valeur  $T_o$  peut toutefois être déterminée expérimentalement pour optimiser la précision de l'estimation de la résistance.

## Âge équivalent (méthode Arrhenius)

La fonction Âge équivalent a introduit le calcul de l'âge équivalent du béton à une température donnée, comme le montre l'équation 2.

$$t_e = \sum e^{-\frac{E_a}{R}} \left( \frac{1}{T_a} + \frac{1}{T_s} \right) \Delta t \quad (2)$$

où :

- $t_e$  = âge équivalent à une température spécifiée,  $T_s$ , en jours ou heures,
- $E_a$  = énergie d'activation, en J/mol,
- $R$  = constante des gaz, 8,31 J/(K \* mol),
- $T_a$  = température moyenne du béton pendant l'intervalle de temps,  $\Delta t$ , en K,
- $T_s$  = température spécifiée, en K, et
- $\Delta t$  = intervalle de temps, en jours ou heures.

La fonction Âge équivalent avec l'équation 2 permet de surmonter l'une des principales limites de la fonction Nurse-Saul avec l'équation 1 en introduisant  $E_a$ .  $E_a$  décrit l'effet de la température sur le taux de développement de la résistance et permet une relation non linéaire entre le taux de développement de la résistance et la température de durcissement (Carino et Lew, 2001).

Comme la valeur  $T_0$  pour le TTF, la valeur  $E_a$  est essentielle pour estimer efficacement le développement de la résistance. Elle dépend également du type de ciment, du type et du dosage des adjuvants qui influencent le taux de développement de la résistance, et du rapport eau-ciment. Les valeurs  $E_a$  recommandées par la norme ASTM C1074 pour un ciment de type I sans adjuvant ni ajout sont de 38 000 à 45 000 J/mol (ASTM C1074, 2019). La valeur  $E_a$  peut toutefois être déterminée expérimentalement pour optimiser la précision de l'estimation de la résistance.

## RELATION ENTRE RÉSISTANCE ET MATURITÉ

Dans l'établissement de la fonction de maturité Nurse-Saul ou TTF, (Saul, 1951) la « règle de maturité » a été définie en stipulant que « du béton constitué d'un même mélange à la même maturité [indice] présente approximativement la même résistance indépendamment de la combinaison de températures et du temps écoulé pour obtenir cette maturité ». Cela signifie que tant que l'indice de maturité correspondant à une résistance spécifique est connu pour un mélange donné de béton et ses constituants, il est possible d'estimer la résistance du béton, quelle que soit la température ou l'historique du durcissement. Cette règle est illustrée dans la figure 2. Il convient de noter que la fonction de maturité Arrhenius ou de l'âge équivalent se conforme à cette règle.

La relation ou courbe résistance-maturité peut être obtenue selon de nombreux modèles différents, dont notamment les quatre suivants : équation logarithmique, hyperbolique linéaire ou hyperbolique parabolique et fonction exponentielle. Parmi les quatre modèles, seules les équations logarithmiques et hyperboliques linéaires sont présentées dans la norme ASTM C1074. L'équation logarithmique est simple à utiliser par rapport à l'équation hyperbolique linéaire, mais elle a ses limites. Elle suppose que le béton gagne indéfiniment en résistance, ce qui est faux. Par conséquent, le modèle hyperbolique linéaire, équation 3, est généralement le modèle le plus approprié pour le développement de la résistance dans les premiers âges du béton (Carino et Lew, 2001).

$$S = S_u \frac{k(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (3)$$

où :

- S = résistance à l'âge t, MPa
- $S_u$  = résistance limite, MPa
- k = Constante de vitesse, 1/jour
- t = âge du test, jour
- $t_0$  = âge au début du développement de la résistance, jour

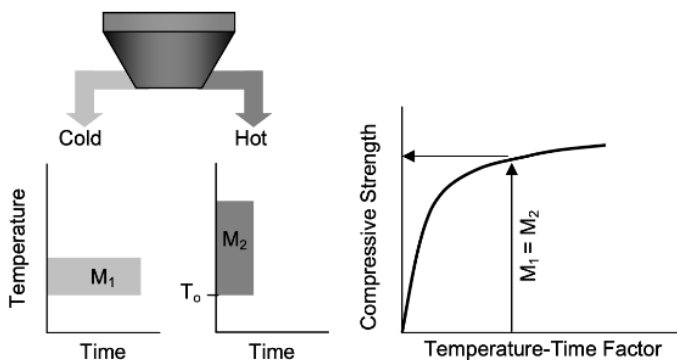


Figure 2 - Diagramme de la règle de maturité (Wade, 2005).

Les paramètres  $S_u$ ,  $k$  et  $t_0$  peuvent être obtenus par une analyse de régression des moindres carrés ou à l'aide d'une fonction Solveur disponible dans Excel ou un tableur (ASTM C1074, 2019). Les figures 3 et 4 montrent un graphique exemplaire de la résistance à la compression en fonction des deux indices de maturité, TTF et âge équivalent, pour un mélange de béton spécifique. La courbe résultant de la relation résistance-maturité, comme illustrée dans les figures 3 et 4, permet d'estimer la résistance sur chantier d'un mélange de béton donné utilisé dans cet exemple.

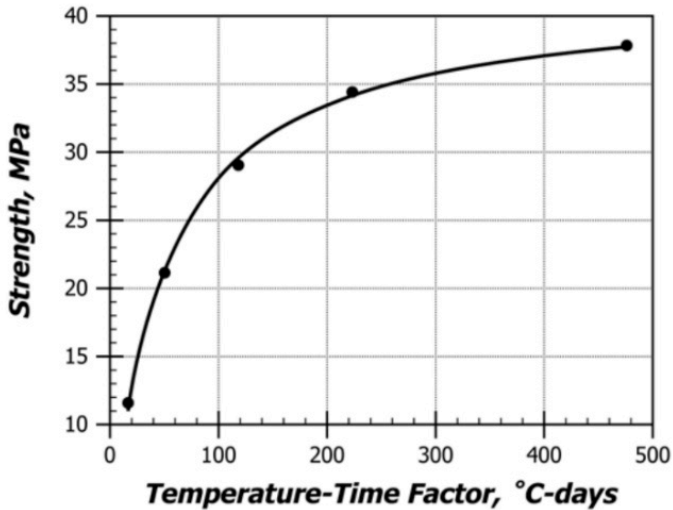


Figure 3 - Exemple de relation entre la résistance à la compression et le TTF (ASTM C1074, 2019)

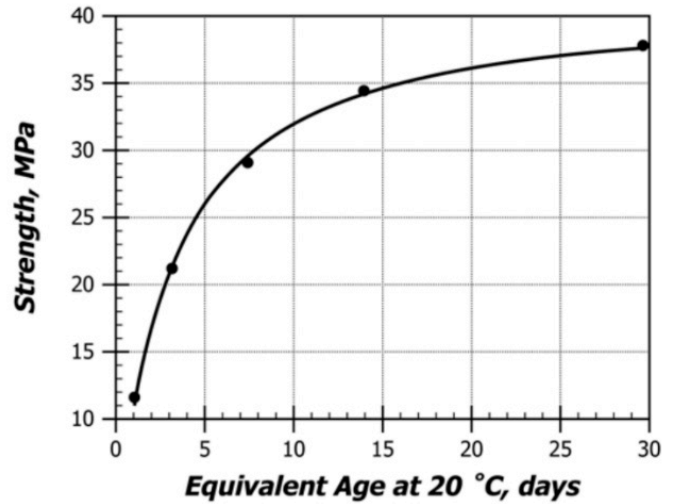


Figure 4 - Exemple de relation entre la résistance à la compression et l'âge équivalent à 20 °C (ASTM C1074, 2019).

## Détermination de la température de référence ou de l'énergie d'activation

Comme mentionné précédemment, la capacité à estimer efficacement la résistance du béton sur chantier dépend fortement du choix des bonnes valeurs  $T_0$  ou  $E_a$  pour l'équation 1 et l'équation 2, respectivement. Ces deux paramètres dépendent fortement de la température de durcissement. Par conséquent, les spécimens dont la température de durcissement en début de vie est plus élevée auront une résistance initiale plus élevée et une résistance à long terme plus faible, et vice versa, comme le montre la figure 5 (Carino et Lew, 2001). Ce phénomène est connu sous le nom d'« effet de croisement ». Pour estimer la résistance du béton avec précision, les valeurs appropriées pour  $T_0$  et  $E_a$  doivent être déterminées en utilisant la procédure donnée dans l'annexe X1 de la norme ASTM C1074 (ASTM C1074, 2019) comme décrite ci-dessous.

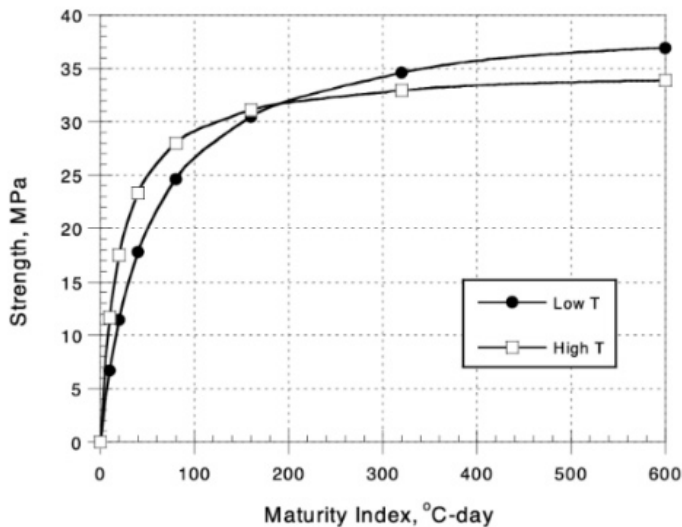


Figure 5 - L'« effet de croisement » dû à des températures de durcissement différentes aux premiers âges (Carino et Lew, 2001)

# APPLICATION DE LA MÉTHODE DE MATURITÉ

Quatre étapes sont nécessaires pour appliquer le test de maturité selon la norme ASTM C1074 : la détermination de l'indice de maturité approprié pour le mélange spécifique à utiliser, la détermination de la relation résistance-maturité, la mesure de la température et du temps du béton sur chantier, et l'estimation de la résistance sur chantier, toutes ces étapes étant illustrées à la figure 6.

Pour déterminer l'indice de maturité, un minimum de 15 spécimens cylindriques de béton sont préparés. « Les proportions du mélange et les constituants du béton doivent être similaires à ceux du béton dont la résistance sera estimée à l'aide de cette pratique » (ASTM C1074, 2019). Après le moulage des cylindres, des capteurs de température sont intégrés « à  $\pm 15$  mm du centre de deux cylindres au moins » (ASTM C1074, 2019). Les spécimens sont durcis dans « un réservoir de stockage d'eau [ou un bain] ou une pièce humide répondant » aux spécifications de l'ASTM C511 (ASTM C1074, 2019). Des essais de compression sont effectués sur au moins deux spécimens aux âges de 1, 3, 7, 14 et 28 jours. L'intervalle de temps recommandé de maximum une demi-heure doit être respecté pour les 48 premières heures de l'enregistrement de la température. Des intervalles plus longs sont autorisés pour le reste du processus de durcissement (ASTM C1074, 2019). L'indice de maturité est évalué en fonction de l'équation 1 ou 2 (Carino et Lew, 2001), en utilisant les données de temps et de température des cylindres contrôlés.

Après avoir déterminé l'indice de maturité, un graphique est tracé avec la résistance moyenne à la compression en tant que fonction de l'indice de maturité moyen, comme illustré dans les figures 3 et 4 (Carino et Lew, 2001). Une courbe de meilleur ajustement est tracée, ou une analyse de régression peut être utilisée pour déterminer la courbe de meilleur ajustement pour une relation résistance-maturité appropriée en utilisant l'équation 3. La courbe résultante sera employée pour estimer la résistance sur chantier de ce mélange de béton (Carino et Lew, 2001).

La mesure de la maturité sur chantier est nécessaire pour estimer la résistance sur chantier. Les capteurs de température doivent être fixés à l'intérieur de la section à couler avant la mise en place du béton, ou noyés dans le béton frais dès que possible après la mise en place du béton (Carino et Lew, 2001). Ces capteurs de température doivent être placés à des endroits de la structure qui ne sont pas exposés à la température ambiante et qui sont essentiels aux exigences structurelles. On insistera jamais trop sur l'importance de la disposition des capteurs dans la mesure où « les estimations de résistance sont utilisées pour planifier le début des opérations critiques de construction », par exemple le décoffrage (Carino et Lew, 2001).

Les données thermiques du capteur doivent être enregistrées dès que possible. Lorsque l'on souhaite connaître la résistance à l'emplacement d'un capteur, l'indice de maturité est estimé à partir de l'enregistrement de la température et du temps. La résistance à cet endroit peut alors être estimée en utilisant les valeurs de maturité et la courbe ou la relation résistance-maturité précédemment établie. « Avant d'effectuer des opérations critiques comme la post-tension ou le décoffrage, qui sont basées sur la résistance estimée à partir de la maturité du béton », la norme ASTM C1074 exige que d'autres tests soient effectués afin de vérifier que le mélange de béton testé est le même que celui livré sur le chantier (ASTM C1074, 2019). Certains de ces tests sont répertoriés à la section 9.5 de la norme ASTM C1074.

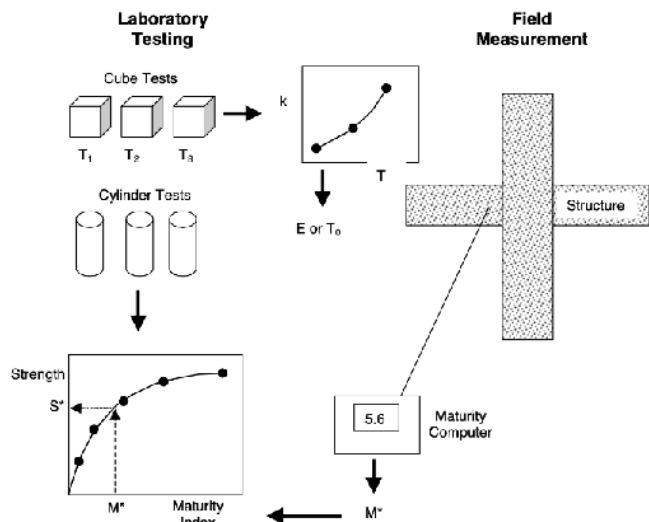


Figure 6 - Application de la méthode de maturité (Carino et Lew, 2001)

# LIMITES DE LA MÉTHODE DE MATURITÉ

Bien que la méthode de maturité soit relativement simple, fiable et non destructive pour le béton sur chantier, quelques facteurs peuvent influencer sur la précision de la technique :

## Pertinence de l'indice de maturité

Au cours des premières étapes de l'application de la méthode de maturité, le choix de l'indice de maturité approprié, à savoir l'équation 1 ou 2, peut influencer la précision de l'estimation finale de la résistance. Comme mentionné précédemment, l'équation 1 suppose que le taux de gain de résistance est une fonction linéaire de la température. Cette hypothèse a été jugée non valide lorsque les températures de durcissement varient fortement pendant la période de durcissement ou au sein de l'élément en béton en cours de durcissement.

## Température sur place durant les premiers âges

Comme évoqué et illustré à la figure 4, la température durant les premiers âges du béton, qu'elle soit faible ou élevée, va entraîner l'« effet de croisement ». De plus, lorsque le taux d'hydratation augmente, il en va de même de la température de durcissement. Ce taux d'hydratation supérieur ne laisse pas le temps aux produits de réaction pour se répartir uniformément.

## Proportions du mélange du béton sur le terrain

Pour garantir la précision des estimations de la résistance du béton sur chantier, il est essentiel de respecter les bonnes proportions du mélange. Le mélange de béton et ses constituants utilisés pour développer la relation résistance-maturité doivent être les mêmes que ceux employés sur le terrain. Si les deux mélanges et leurs constituants diffèrent, la relation résistance-maturité n'est plus valide et un nouveau test devra être réalisé.

# CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le présent article présente la méthode de maturité et son utilisation pour mieux prévoir la résistance du béton sur chantier. La méthode de maturité est un moyen efficace, non destructif et fiable d'estimer la résistance du béton sur chantier. C'est une étape importante dans le secteur, car elle permet de planifier le début d'opérations de construction critiques comme la post-tension des armatures, l'ouverture des routes à la circulation, le décoffrage et la remise en place des étais, ainsi que la fin de la protection contre le froid. Elle permet également un meilleur contrôle de la qualité. Bien que cela n'ait pas été examiné dans ce document, il convient de noter que le béton peut durcir dans des cylindres différemment de ce qu'il fait sur le terrain en raison du bétonnage de masse dans ce dernier cas.

Pour les raisons susmentionnées, voici quelques recommandations concernant l'utilisation de la méthode de maturité. L'indice de maturité le plus approprié est l'âge équivalent (équation 2). La valeur  $E_a$  (ou  $T_o$  si l'on opte pour l'équation 1) doit être déterminée par voie expérimentale. Le mélange et les constituants utilisés pour établir la relation résistance-maturité doivent être identiques à ceux employés sur le terrain et la température sur place doit être surveillée de près durant les premiers âges du béton.



# RÉFÉRENCES

ASTM C1074-19, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

Carino, N. J., et Lew, H. S. (2001, May 21-23). The Maturity Method: From Theory to Application. Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginie, États-Unis, éditeur Peter C. Chang, 2001, 19 p.

Kim, T., & Rens, K. L. (2008). Concrete Maturity Method Using Variable Temperature Curing for Normal and High-Strength Concrete. I: Experimental Study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(12), 727-734.

Saul, A.G.A. (1951). Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure. *Magazine of Concrete Research*, Mar. pp. 127-140.

Soutsos, M., Kanavaris, F., & Hatzitheodorou, A. (2018). Critical analysis of strength estimates from maturity functions. *Case Studies in Construction Materials*, 9.

Wade S. (15 décembre 2005). Evaluation of the Maturity Method to Estimate Concrete Strength. Extrait le 24 juin 2020 du site <https://etd.auburn.edu/handle/10415/127?show=full>.



Hilti, Inc.  
1-800-879-8000 | espagnol 1-800-879-5000  
[www.hilti.com](http://www.hilti.com)

Hilti (Canada) Corporation  
1-800-363-4458  
[www.hilti.ca](http://www.hilti.ca)