
Validation d'une méthode de détermination des durées de cure nécessaires à partir des théories de Powers

Philippe Devillers* — **François Cussigh**** — **Lionnel Linger***** — **Valérie Bonnard****

** Centre des Matériaux de Grande Diffusion, Ecole des Mines Alès
6 avenue de clavières, 30319 Alès cedex
Philippe.Devillers@ema.fr*

*** GTM Construction,
61 avenue Jules Quentin, 92003 Nanterre cedex*

**** VINCI Construction Grands Projets
5 cours Ferdinand de Lesseps 92851 Rueil Malmaison*

RÉSUMÉ. Cette étude a pour but de définir et d'exploiter une méthode de détermination des durées de cure utile à partir des « théories de Powers » en intégrant les spécificités des ciments modernes. Les essais réalisés ont montré que les suivis de perte de masse d'éprouvettes placées en ambiance dessiccative à courte échéance de démoulage présentaient systématiquement une rupture de pente nette après un délai variable qui diminue avec l'âge de démoulage. Au-delà d'une certaine échéance, cette rupture de pente n'est plus visible.

Ce mode opératoire a été utilisé pour étudier la sensibilité à la dessiccation d'un béton vibré et de deux bétons autoplaçant. On retrouve les conclusions de Powers, les valeurs de maturité obtenues sont toutefois nettement plus faibles du fait de la différence des ciments utilisés avec les ciments utilisés par Powers.

ABSTRACT. The purpose of this study is to define and to run a method of determination of the useful curing time starting from the "theories of Powers" by joining the specificities of modern cements. The tests carried out showed that the follow-ups of mass loss of samples placed in desiccative environment short dated of release from the mould systematically presented a clear change of slope after a variable period which decreases with the age of release from the mould. Beyond a certain term, this change of slope is not visible any more. The same conclusions than Powers's one are obtained. However, the obtained values of maturity are lower due to the difference of used cements with coarse cements studied by Powers.

MOTS-CLÉS : durée de cure utile, maturité nécessaire, perte de masse, théories de Powers.

KEYWORDS: useful curing time, needed maturity, mass loss, Powers theories.

1. Introduction

La cure est intimement liée à la durabilité des ouvrages, et en particulier à la qualité du béton d'enrobage, protecteur de la corrosion des armatures. Pour des raisons de maniabilité à l'état frais, les bétons sont obligatoirement formulés avec une quantité d'eau supérieure à celle strictement nécessaire à l'hydratation du liant (0,25 gramme d'eau par gramme de ciment). Bien que la majeure partie de la réaction d'hydratation se déroule durant le premier mois, c'est l'hydratation pendant les tous premiers jours qui a le plus d'influence sur les performances globales du béton (Snyder et al., 2004). En effet, c'est durant cette période initiale d'hydratation que la disponibilité de l'eau est critique vis-à-vis de la formation des silicates de calcium hydratés. Une absence de cure ou une cure mal réalisée provoque l'évaporation à partir de la surface d'une partie de l'eau. Le transport d'eau à travers le béton peut alors être insuffisant pour remplacer l'eau perdue. Ce départ d'eau entraîne alors la formation d'une porosité capillaire ouverte préjudiciable aux performances mécaniques et de durabilité du béton et génère des variations dimensionnelles qui conduisent à une fissuration du béton de surface.

Les règlements actuels (ENV 13-670, fascicule 65 A, ACI 308-92) recommandent des durées de cure souvent difficilement compatibles avec les contraintes de délais de réalisation des ouvrages. Ces délais ne sont pas toujours bien étayés par des résultats d'essais exhaustifs et ne tiennent pas compte du type de cure mis en œuvre. Dans cette communication, on présente les résultats d'une étude expérimentale qui a été entreprise afin de définir et d'exploiter une méthode de détermination des durées de cure nécessaires à partir des « théories de Powers » (Powers, 1959) en intégrant les spécificités des bétons modernes.

2. COMPOSITION DES BETONS

Trois formulations de béton ont été mises au point pour cette étude. Il s'agit d'un béton vibré formulé avec le ciment CEM III/A 42,5 N de l'usine de Lumbres (Holcim) et de deux bétons autoplaçant l'un formulé avec le ciment CEM I 52,5 N de l'usine de Gaurain (Calcia), l'autre formulé avec le ciment CEM V/A (V-S) 32,5 N de l'usine de Gaurain. Le ciment CEM III/A 42,5 N de l'usine de Lumbres peut être qualifié de moyen, le ciment CEM I 52,5 N de l'usine de Gaurain peut également être qualifié de moyen, le ciment CEM V/A (V-S) 32,5 N de l'usine de Gaurain quant à lui peut être qualifié de lent.

Les différentes formulations de béton sont reportées dans le tableau 1. Le coefficient d'activité k est pris égal 0,6 pour les cendres volantes et à 0,25 pour le filler calcaire. Le béton vibré BO1 a été conçu avec une classe de consistance S4 (affaissement de 180 mm). Afin que les comparaisons ne soient pas biaisées, les deux bétons autoplaçant BAP1 et BAP2 ont été conçus avec la même classe de consistance (étalement entre 650 et 700 mm). Le béton autoplaçant de bâtiment

composé de ciment CEM I sans addition (BAP1) a été formulé dans l'objectif d'effectuer une mesure du taux d'hydratation aux différentes échéances de décoffrage. Il convient de noter que cette formule correspond davantage à une formule de laboratoire qu'à une formule de chantier.

Tableau 1. Compositions des trois formulations de béton étudiées

	BAP1	BAP2	BO1
Ciment	350 kg	400 kg	330 kg
Filler calcaire	-	120 kg	-
Graviers	-	-	670 kg
Gravillons	795 kg	740 kg	330 kg
Sable	630 kg	620 kg	820 kg
Sablon	300 kg	220 kg	-
Superplastifiant (Glénium 27)	7 kg	10,2 kg	3,4 kg
Agent de viscosité (Rhéomac 890F)	1,4 kg	1,8 kg	-
Eau totale	214 kg	198 kg	178 kg
Eau efficace	200 kg	185 kg	163 kg
Rapport $E_{eff}/(C+kA)$	0,57	0.43	0.49

3. RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les valeurs de la résistance en compression obtenues, sur cylindres 11cm x 22 cm, aux différentes échéances de décoffrage sont présentées sur la figure 1. A partir des résultats obtenus, l'évolution de la résistance au cours du temps a été modélisée en utilisant l'équation proposée dans l'Eurocode 2 modifiée pour tenir compte du développement moyen de la résistance au jeune âge. En effet, il faut tenir compte d'un léger effet retard de prise provoqué par un dosage important en superplastifiant. Cette modification a permis de caler correctement la courbe d'extrapolation notamment au niveau de la période entourant l'âge de maturité nécessaire à la segmentation du réseau capillaire (entre 2 et 3 jours suivant la formule de béton).

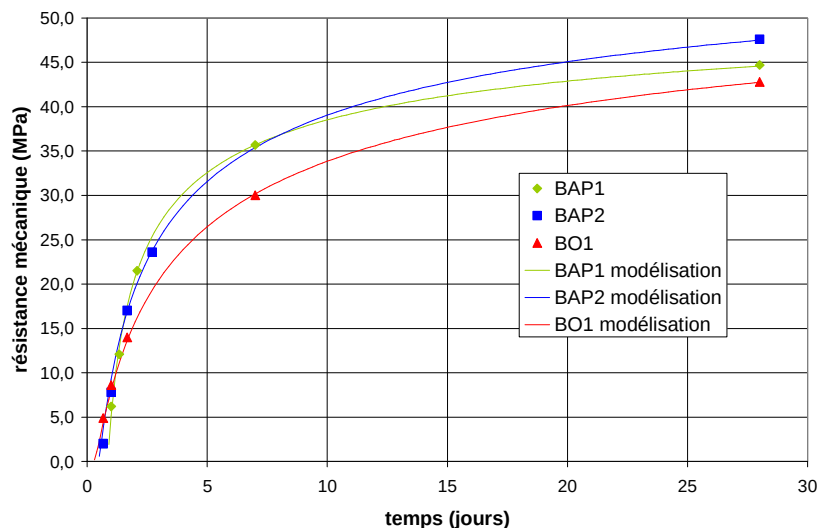


Figure 1. Évolution de la résistance en compression

4. Pertes de masse

La méthode expérimentale proposée repose sur un suivi de pertes de masse d'éprouvettes décoffrées à des échéances suffisamment éloignées les unes des autres (un minimum de six heures d'écart entre chaque échéance de décoffrage doit être respecté). La méthode expérimentale nécessite la confection d'éprouvettes pour quatre temps de décoffrage différents (un au très jeune âge, deux temps intermédiaires et, un temps « infini »).

L'essai consiste à mesurer, aux différentes échéances de décoffrage et dans un environnement régulé en température et en hygrométrie ($T=26^{\circ}\text{C}$ et $HR=55\%$), la quantité d'eau qui s'évapore d'une éprouvette de béton. Les mesures de pertes de masse ont été effectuées sur deux prismes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ posés debout (figure 2). Chaque prisme offre une surface d'évaporation de 833 cm^2 .

La perte de masse $P_m(t)$ est définie par le rapport $P_m(t)=(m(t)-m_0)/m_0$, la vitesse d'évaporation de surface $V(t)$ est définie par $V(t)=dP_m(t)/dt$, où $m(t)$ est la masse de l'éprouvette à l'instant t et m_0 la masse de l'éprouvette au démoulage.

Un exemple de résultats obtenus pour la formulation de béton BAP1 est donné à la figure 2.

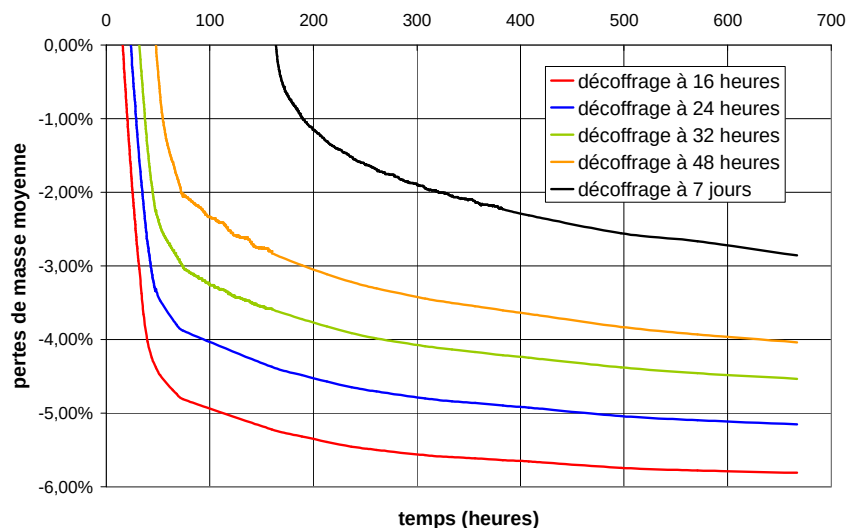


Figure 2. Évolutions des pertes de masse moyennes pour la formulation BAP1

On observe que pour les quatre premières échéances de démoulage (16 heures, 24 heures, 32 heures et 48 heures) les courbes démarrent toutes par une partie linéaire. La pente de cette partie linéaire semble diminuer légèrement lorsque l'âge du démoulage augmente. Le calcul des vitesses d'évaporation dans cette zone fait apparaître des vitesses d'évaporation supérieures à celle d'une surface d'eau libre, caractéristiques d'un régime de dessiccation fort. Les courbes restent linéaires pendant une durée qui décroît lorsque l'âge de démoulage augmente.

Dans la zone intermédiaire, les courbes sont fortement non linéaires, la vitesse d'évaporation diminue fortement pour atteindre une valeur très faible.

Les courbes se terminent par une zone linéaire durant laquelle la vitesse d'évaporation est constante et très faible. Pour les quatre premières échéances de démoulage, cette zone démarre à 300 heures, pour le démoulage à 164 heures, cette zone démarre à 400 heures.

5. PRINCIPE DE LA METHODE

La méthode expérimentale va permettre de déterminer la durée nécessaire de cure avant d'atteindre le changement de régime, c'est-à-dire la maturité suffisante pour minimiser la dessiccation précoce.

En effet, deux phases bien distinctes concernant la sensibilité à la dessiccation du béton au jeune âge ont été mises en évidence (Powers, 1959) :

- une première phase de perméabilité élevée correspondant à une porosité capillaire connectée,
- une seconde phase de perméabilité à l'eau sensiblement réduite une fois que la porosité capillaire est segmentée du fait du développement de l'hydratation.

Selon Powers, il existe donc un seuil de segmentation des capillaires du béton qui est fonction du degré d'hydratation du ciment et du rapport E/C. Lorsque le seuil de segmentation est franchi, la cinétique de dessiccation du béton diminue sensiblement.

Le temps t_i durant lequel une dessiccation sévère peut se produire (porosité capillaire connectée) ne peut être déterminé à partir de la seule courbe de perte de masse correspondant au démoulage le plus précoce. En effet, les courbes restent linéaires pendant une durée qui décroît lorsque l'âge de démoulage augmente (figure 2).

La méthode retenue est donc basée sur une extrapolation à partir du temps t_i déterminé pour les échéances de démoulage les plus précoces. On prend comme référence de perte de masse « normale » $P_{m\infty}$ celle correspondant au démoulage à 168 heures (7 jours) après un temps conventionnel appelé t_∞ (en pratique, la valeur de t_∞ est prise à partir de 400 heures). On soustrait cette perte de masse à toutes les courbes et on calcule le temps t_i nécessaire pour atteindre ce différentiel en fonction de la pente à l'origine α :

$$P_m(t_i + t_\infty) = \alpha t_i + P_{m\infty} \quad [4]$$

Les temps t_i obtenus ont été reportés sur un graphe en fonction de l'âge de démoulage. On détermine alors par extrapolation linéaire le temps t_c considéré comme l'âge de démoulage à partir duquel la dessiccation précoce est nulle (figure 3).

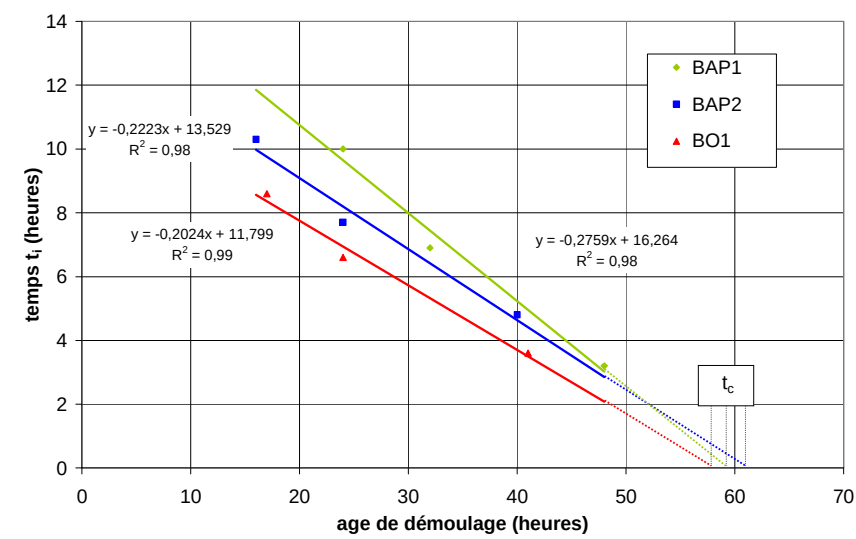


Figure 3 : Détermination des temps de segmentation capillaire t_c

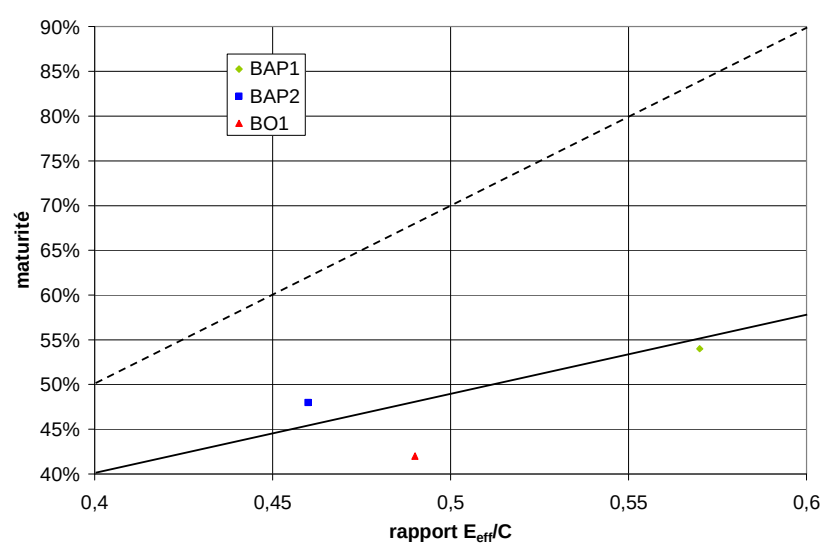


Figure 4. Maturité nécessaire à la segmentation de la porosité capillaire

La maturité est définie comme le rapport $R_c(t_c)/R_c(28j)$. La figure 4 donne la maturité nécessaire à l'interruption de la continuité capillaire en fonction du

rapport E_{eff}/C . Sur cette figure, la courbe en pointillé représente les résultats obtenus par Powers. On constate qu'il se dessine une droite reliant la maturité nécessaire du béton en fin de cure en fonction du rapport E_{eff}/C . Le point BO1, qui se situe en dessous de la droite montre que les cendres volantes participent activement à la segmentation du réseau capillaire.

7. CONCLUSION

En l'absence d'un traitement approprié le béton est soumis à la dessiccation dès qu'il est décoffré voire dès la fin du coulage pour les surfaces horizontales. En effet, la dessiccation précoce ralentit fortement puis arrête le processus d'hydratation au dessous d'une humidité relative d'environ 75 %. La réduction du volume de ciment hydraté augmente fortement la porosité du béton durci. La protection de la surface du béton jeune est d'autant plus nécessaire que, par effet de paroi, la peau du béton est une zone plus riche en pâte de ciment que le cœur.

Une méthodologie a été mise au point pour déterminer le temps de segmentation du réseau capillaire (et la maturité correspondante) à partir d'essais de suivi de perte de masse de prismes placées en ambiance dessiccative et démoulées à différentes échéances. Les essais réalisés ont montré que les suivis de perte de masse d'éprouvettes placées en ambiance dessiccative à courte échéance de démoulage présentaient systématiquement une rupture de pente nette après un délai qui diminue avec l'âge de démoulage. Au-delà d'une certaine échéance, cette rupture de pente n'est plus visible. Cette méthodologie permet de déterminer les durées de cure nécessaires pour une formulation de béton donné.

On retrouve les conclusions de Powers, à savoir que le temps de segmentation de la porosité capillaire diminue avec le rapport E/C. Les valeurs de maturité obtenues sont toutefois nettement plus faibles du fait de la différence des ciments utilisés avec les ciments grossiers étudiés par Powers.

Bibliographie

Powers T.C., "Capillary continuity or discontinuity in cement pastes", *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, vol 1, 1959, pp38-48.

Snyder K.A., Bentz D.P., "Suspended hydration and loss of freezable water in cement pastes exposed to 90% relative humidity", *Cement and concrete research*, vol 34, 2004, pp.2045-2056.