

APPLICATION DE LA MÉTHODE ULTRASONIQUE POUR LE CALCUL PRÉVISIONNEL DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION DU BÉTON APRÈS TRAITEMENT THERMIQUE

Mr SAKHRAOUI Saïd¹, Mme MOUFFOK Linda²

¹ Chargé de recherches - CNERIB

² Chargée de recherches - CNERIB

CNERIB – Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment

Cité Nouvelle El-Mokrani, Souidania – ALGER

Tél : (021) 37.03.68 - Fax : (021) 37.04.31 - e-mail : cnerib@wissal.Dz

Résumé : Le traitement thermique confère au béton des résistances suffisantes au jeune âge. Il permet ainsi de procéder à un décoffrage rapide, une utilisation plus rationnelle des coffrages et par conséquent des délais de réalisations plus courts.

L'utilisation des essais non destructifs par application de la méthode d'auscultation dynamique pour le calcul prévisionnel de la résistance en compression du béton après traitement thermique est très indiquée dans le sens où cette méthode a souvent été utilisée pour suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques du béton dans le temps (résistance, module d'élasticité, coefficient de Poisson, etc....).

Dans cet optique, l'étude menée au CNERIB à ce sujet avait pour objectif de mettre à la disposition des différents intervenants (maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrage, contrôleurs) une méthode pratique d'auscultation qui permettra d'estimer la résistance en compression du béton au jeune âge après traitement thermique.

Cet article, consiste à présenter les différentes corrélations obtenues permettant de calculer la résistance du béton en fonction de différents paramètres, parmi lesquels on peut retenir :

- La résistance du béton en fonction de la vitesse des ultrasons et de la température d'étuage;
- La résistance du béton en fonction du coefficient de maturité et de la vitesse des ultrasons.

Mots-Clefs : Etuage, Résistance au jeune âge, Cycle de traitement thermique, Ultrasons, Vitesse, Résistance à la compression.

INTRODUCTION :

La construction en béton, utilisant de plus en plus les coffrages outils dans un souci de productivité, a recours généralement soit au traitement thermique du béton incorporé au coffrage soit à l'utilisation de béton adjuvanté. Du point de vue sécurité et sans compromettre la stabilité de l'ouvrage, la connaissance de la résistance du béton au jeune âge est nécessaire avant toute opération de décoffrage prématurée ou mise en précontrainte.

A travers cet article, on va essayer de présenter la méthodologie adoptée et les différents résultats obtenus d'une étude qui a porté sur la prévision de la résistance à la compression du béton au jeune âge dont le durcissement a été accéléré par traitement thermique. Le recours dans cette étude à la méthode d'auscultation dynamique est très indiqué dans le sens où elle a souvent été utilisée pour suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques du béton dans le temps.

1. Prise et durcissement du béton

1.1 La prise

Dès que le ciment est mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue évoluent dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange change de viscosité et se raidit : on dit qu'il fait prise.

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau. Le phénomène de prise du ciment est lié à de

nombreux paramètres tels :

- la nature du ciment ;
- la finesse de mouture du ciment : plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court ;
- la température : à basse température la prise est stoppée. Plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide. Pour un ciment donné, le début de prise varie en fonction de la température (voir figure 1 et 2) [19] ;
- la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton ralentit la prise ;
- l'excès d'eau de gâchage a une action retardatrice sur la prise.

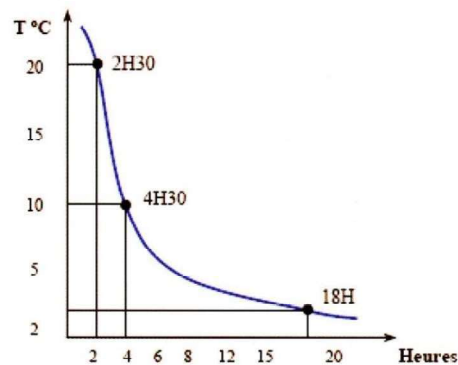


Figure 1 : Evolution du temps de prise en fonction de la température [19],

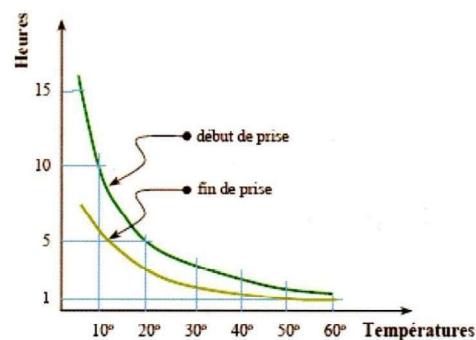


Figure 2 : Influence de la température sur la prise des ciments [19]

1.2 Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

Comme le phénomène de prise, le durcissement est sensible à la température, ce qui conduit notamment en préfabrication, à chauffer les pièces pour lesquelles on désire avoir des résistances élevées au jeune âge (au bout de quelques heures).

2. Le traitement thermique du béton

Les développements des techniques de construction industrialisées et l'usage de coffrages outils (tables et banches ou le coffrage tunnel et la préfabrication en usine) ont donné une impulsion aux travaux de recherche sur le durcissement accéléré du béton.

Le durcissement accéléré du béton peut donc être obtenu par un traitement thermique dont le but est d'accélérer la réaction d'hydratation du béton et par conséquent accroître sa résistance au jeune âge. Il peut être effectué de plusieurs manières avant ou après coulage du béton par l'une des méthodes couramment utilisées :

- Chauffage du béton avant sa mise en œuvre ;
- Chauffage du béton après sa mise en place ;
- Injection de vapeur sous pression.

2.1 Cycle de traitement thermique

Un béton ne doit jamais être soumis à un traitement thermique aléatoire, mais il est recommandé de bien étudier le cycle à lui faire subir pour éviter toute surprise ultérieure.

Le traitement thermique du béton suit généralement un cycle de quatre phases :

1. Une phase de prétraitement qui suit la phase de coulage du béton. Elle varie de une à quatre heures ;
2. Une phase de montée en température ($20^{\circ}\text{C}/\text{heure}$) au cours de laquelle le béton atteint la température de traitement ;
3. Une phase où la température est maintenue constante (50 à 80°C) : c'est le palier de température au cours duquel l'hydratation du béton va se poursuivre ;
4. Une phase de refroidissement ($20^{\circ}\text{C}/\text{heure}$) qui permet à l'élément de revenir à une

température proche de la température ambiante.

Les quatre phases du cycle global peuvent être représentées sur le graphe suivant [1], [2], [4], [5] :

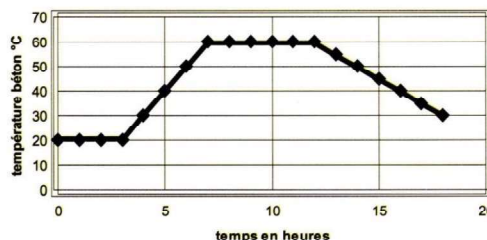


Figure 3 : Exemple de cycle de traitement thermique [1], [2], [4], [5]

3. Méthodes en usage pour la prévision de la résistance du béton au jeune âge

3.1 Epreuves d'information

La méthode la plus couramment utilisée pour évaluer la résistance au jeune âge du béton dans les structures consiste à réaliser des éprouvettes d'information conservées dans des conditions « voisines » de celles de l'ouvrage et à les écraser en laboratoire pour déterminer leur résistance en compression. Compte tenu des différences de conditions de mûrissement avec l'ouvrage concernant le rapport volume de béton sur surface d'échange avec l'extérieur, il existe systématiquement un écart sensible entre l'historique de température au sein des éprouvettes et au sein de l'ouvrage.

Ceci est d'autant plus marqué que l'ouvrage est constitué de pièces de forte épaisseur. La prise et le durcissement du béton étant fortement influencés par la température, il en résulte des différences considérables entre les valeurs de résistance mesurées sur les éprouvettes d'information et la résistance réelle du béton dans la structure.

Aussi, les valeurs obtenues dépendent fortement de différents facteurs qui conditionnent la température au sein des éprouvettes. Ces facteurs sont principalement :

- la taille des éprouvettes (et plus précisément le rapport surface sur volume) ;
- la nature du moule (acier, carton ou plastique) ;
- les conditions de conservation (température ambiante et coefficient d'échange thermique avec l'extérieur).

Pour ajuster ces facteurs et réduire ainsi l'erreur de mesure, on essaiera d'obtenir des conditions de mûrissement équivalentes aux conditions réelles in situ, cela suppose d'enregistrer en parallèle les températures dans les éprouvettes et in situ.

3.2 Maturométrie

La maturométrie consiste, à partir du suivi de la température au sein de l'ouvrage, à déterminer par calcul (au jeune âge) le degré d'avancement des réactions d'hydratation correspondant au durcissement du béton. Le concept de «maturité» permet de traduire l'état de mûrissement du béton, c'est-à-dire son niveau de durcissement. Il intègre les effets couplés de la température et de la cinétique de mûrissement du béton.

Cette technique permet de connaître la résistance du béton in situ à partir de la relation déterminée par étalonnage pour une formulation de béton particulière.

3.3 Les essais non destructifs

3.3.1 Méthode sclérométrique

Appelée aussi méthode de mesure de dureté de surface, elle consiste à mesurer le rebondissement relatif d'une masselotte projetée sur un support en béton. Son défaut principal réside dans le fait que la mesure est superficielle alors que la résistance du béton est requise au sein du béton (derrière les plaques d'ancrage de précontrainte par exemple).

3.3.2 Méthode ultrasonique

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par la propagation d'ondes longitudinales (de compression) à parcourir une distance donnée et par conséquent la vitesse correspondante de propagation de cette onde dans le béton.

3.3.3 Evaluation de la résistance à la compression du béton - méthodes uniparamétriques

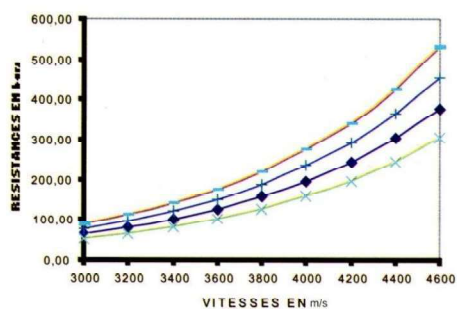
Les méthodes uniparamétriques qui consistent à utiliser soit l'indice sclérométrique seul ou la vitesse des ultrasons seule pour estimer la résistance à la compression du béton, doivent faire l'objet au préalable d'étalonnage sur carottes ou éprouvettes moulées.

Dans le cas de la méthode ultrasonique par exemple, la vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Le module d'élasticité des granulats varie énormément, de sorte que la vitesse des ondes dépend du module d'élasticité du granulat utilisé et de la quantité qu'en contient le béton. Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Il n'existe donc pas de relation unique entre la résistance à la compression et la vitesse des ondes sonores. Cependant, pour un granulat donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durcie, tel qu'un changement du rapport Eau/Ciment qui influe sur le module d'élasticité de la pâte.

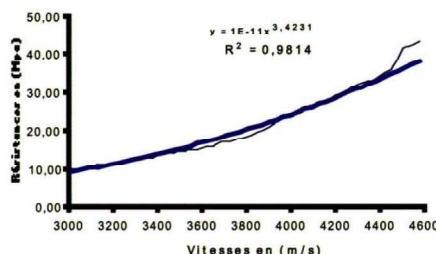
Aussi, les ondes se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent, les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes alors que la résistance in situ n'en n'est pas affectée.

Une armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de sa vitesse, sans pour autant influencer la résistance à la compression du béton.

Pour évaluer la résistance du béton, on doit, par conséquent, établir des corrélations graphiques entre la vitesse de propagation des ultrasons V et la résistance à la compression du béton R par des essais sur carottes prélevées dans le béton ou sur éprouvettes dont les caractéristiques doivent être identiques à celles du béton mis en œuvre in situ.



a : Courbes de calibrages obtenues sur des bétons de composition différentes



b : Courbe publiée dans la revue RILEM
(Réseau International des Laboratoires d'Essais
sur les Matériaux)

Figure 4 : Exemples de corrélations d'estimation
de la résistance à la compression du béton en
fonction de la vitesse des ultrasons [3] et [18]

3.3.4 Evaluation de la résistance à la compression du béton - méthodes combinées

De la même manière que pour les méthodes uniparamétriques, et compte tenu des différents facteurs qui peuvent influencer sur l'indice sclérométrique (N) et la vitesse des ultrasons (V), les méthodes combinées doivent faire l'objet au préalable d'étalonnage sur carottes ou éprouvettes moulées par l'établissement de corrélations graphiques ou analytiques entre N, V et R.

Plusieurs auteurs ont essayé de développer des corrélations analytiques entre N, V et R parmi celles obtenues on peut citer :

- Meynink Samarin (Australie)

$$R = 0.058V^4 + 1.24N - 24.1$$

$$40 > R > 25 \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

- Galan (Tchécoslovaquie)

$$R = 0.028565V^{1.84593} N^{1.24632} \quad (2)$$

- Mellmann (République Fédérale Allemande)

$$R = 0.0180650N^2 + 0.0234477V^3N + 0.0885855V^2N + 4.13 \quad (3)$$

pour $48 > N > 30$ et $4.35 > V > 4.00 \text{ Km/sec}$

- Bellander (Suède)

$$R = 0.00082N^3 + 11.03V - 32.7 \quad (4)$$

- CNERIB (Algérie)

$$R = 0.01713V + 0.86619N - 62.68428 \quad (5)$$

4. Méthodologie et résultats obtenus

4.1 Méthodologie

En laboratoire, le béton a été soumis à différents cycles de traitement thermique par étuvage dans des enceintes. A la fin de chaque cycle d'étuvage, on mesure la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance à la compression du béton.

La validation in situ a été réalisée au niveau de l'usine de préfabrication de la SAPTA où un travail similaire a été effectué sur des poutres et des éprouvettes confectionnées et conservées dans les mêmes conditions que les poutres préfabriquées de pont en béton précontraint.

Les compositions respectives des bétons utilisés en laboratoire et in situ sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 1 : compositions de béton

Composition laboratoire		Composition in situ	
Constituants	Dosages	Constituants	Dosages
Ciment CEM I 42.5	380 kg/m ³	Ciment CEM II/A 42.5	450 kg/m ³
		Adjuvant fluidifiant	6 l/m ³
Rapport E/C	0.52	Rapport E/C	0.40
Densité théorique	2.4 t/m ³	Densité théorique	2.4 t/m ³

4.2 Résultats obtenus

4.2.1 Coefficient de maturité pondéré

Pour prendre plus en considération l'influence des températures élevées, on a introduit le paramètre coefficient de maturité pondéré. Il est donné par la formule suivante :

$$cmp = \sum S_i \times A^i \quad (6)$$

La définition des termes de l'équation est donnée dans le paragraphe suivant.

Pour un cycle de traitement thermique donné (voir figure 5), le cpm est obtenu en faisant la somme des aires multipliées par une constante élevée à la puissance 0 pour des températures comprises entre 0 et 20°C, 1 pour des températures comprises entre 20°C et 30°C, 2 pour des températures comprises entre 30°C et 40°C, etc. Le paramètre A dépend de la nature du liant utilisé. La valeur moyenne de A est de 1.8.

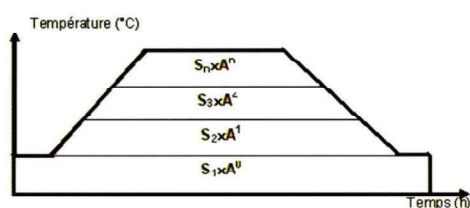


Figure 5: Définition du facteur de maturité pondéré

4.2.2 Résultats obtenus en laboratoire

Les résultats obtenus en laboratoire sur les éprouvettes après chaque cycle sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Résultats obtenus en laboratoire

Epreuve témoin		Epreuves traitées		Coefficient de maturité	
V (m/s)	R (Mpa)	V (m/s)	R (Mpa)	cm (°C.h)	cmp (°C.h)
traitement 30°C					
4014	12.77	3932	23.69	590	718
traitement 40°C					
4311	13.98	3992	21.20	780	1052
traitement 50°C					
3608	7.10	3800	15.99	1040	1702.4
traitement 60°C					
3244	4.07	3615	12.47	1210	2350.4
traitement 70°C					
3342	4.53	3585	13.64	1380	3218.7
traitement 80°C					
3672	7.41	3870	19.79	1570	4467.9

4.2.3 Résultats obtenus in situ

Les résultats obtenus in situ sur les éprouvettes et les poutres après chaque cycle sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Résultats obtenus sur les éprouvettes et poutres in situ

Poutre		Epreuves traitées		Coef.mat.		Poutre		Epreuves traitées		Coef.mat.	
V (m/s)	R (Mpa)	V (m/s)	R (Mpa)	cm (°C.h)	cmp (°C.h)	V (m/s)	R (Mpa)	V (m/s)	R (Mpa)	cm (°C.h)	cmp (°C.h)
Poutre 1						Poutre 2					
4307	4387	45	1380	3014		4192	4236	37	1280	3052	
Poutre 3						Poutre 4					
4170	4236	37	1385	3285		4081	4227	34	1295	3086	
Poutre 5						Poutre 6					
4055	4202	40	1422	3091		4230	4272	35	1300	3095	
Poutre 7						Poutre 8					
4105	4365	48	1295	3086		4430	4240	37	1295	3086	

4.3 Interprétation des résultats - principes de calcul

Les différentes mesures effectuées en laboratoire et in situ ont permis d'obtenir plusieurs données qui ont été traitées suivant le programme Origin pro v7.5 [15]. La méthode de régression multiple

est utilisée pour établir les différentes corrélations entre la résistance du béton au démoulage d'une part et les caractéristiques thermiques d'autre part.

Cette méthode de traitement des données a été utilisée par Von Euw et P. Gourdin, et M. Mamillan et J. Sidorowicz [4] respectivement pour prévoir la résistance du mortier normalisé en partant des caractéristiques du ciment, et pour le calcul prévisionnel des résistances des bétons après traitement thermique.

Le calcul d'une corrélation à plusieurs variables consiste à déterminer la relation entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes. Ce calcul permet de trouver pour chaque variable dépendante des coefficients de régression multiple dans des équations linéaires du type :

$$x_1 = x_2 \cdot b_{12,3n} + x_3 \cdot b_{13,2n} + \dots + a$$

Dans cette équation x_1 est une variable dépendante estimée et x_2, x_3, x_4 sont les variables indépendantes. Le coefficient de régression $b_{12,3n}$ indique le nombre d'unités dont s'accroît la variable dépendante x_1 pour un accroissement d'une unité de x_2 en tenant compte d'autres variables indépendantes $x_3, \dots, x_n$.

Pour les applications pratiques, les deux corrélations retenues sont celles pour lesquelles la variable dépendante x_1 choisie étant R résistance à la compression exprimée en MPa au démoulage c-à-d au jeune âge, et les variables indépendantes x_2, x_3 sont respectivement :

- 1) V la vitesse de propagation des ultrasons exprimée en m/s et cmp le coefficient de maturité pondéré exprimé en °C.xheures ;
- 2) V la vitesse de propagation des ultrasons exprimée en m/s et T la température de palier exprimée en °C.

Les formes analytiques respectives des corrélations obtenues sont les suivantes :

$$R = -142.34 + 0.042V + 0.0011cmp \quad (1)$$

$$R = -142.98 + 0.041V + 0.089T \quad (2)$$

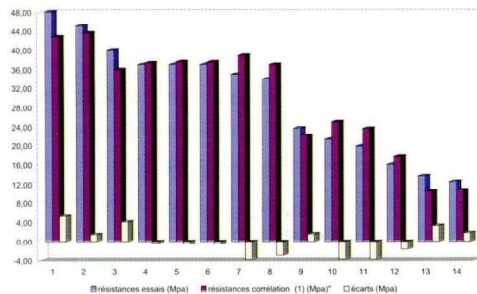
4.3.1 Application des corrélations (1) et (2) aux résultats de la validation

Le tableau 4 reprend les résultats obtenus en laboratoire et in situ et ceux obtenus par application des corrélations (1): $R = f(V, cmp)$ et (2) $R = f(V, T)$.

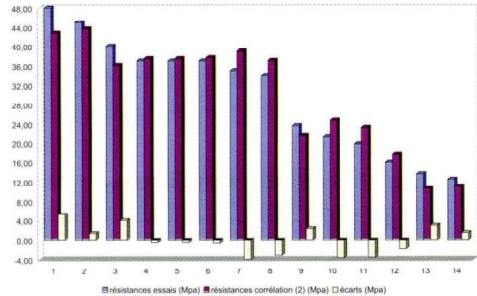
Tableau 4 : Résultats obtenus

T (°C)	Résistances Laboratoire et in situ (MPa)	Résistances corrélation (1) (MPa)	Ecart simples (MPa)	Ecart relatifs (%)	Résistances corrélation (2) (MPa)	Ecart simples (MPa)	Ecart relatifs (%)
30	23.65	22.13	1.56	7	21.41	2.28	10
40	21.20	24.98	-3.78	-18	24.76	-3.56	-17
50	15.99	17.69	-1.70	-11	17.75	-1.76	-11
60	12.47	10.69	1.78	14	11.03	1.44	12
70	13.64	10.38	3.26	24	10.68	2.96	22
80	19.19	23.99	-3.80	-19	23.29	-3.50	-18
70	45.00	43.55	1.45	3	43.67	1.33	3
70	37.00	37.30	-0.30	-1	37.46	-0.46	-1
70	37.00	37.55	-0.55	-1	37.46	-0.46	-1
70	34.00	36.96	-2.96	-9	37.09	-3.09	-9
70	40.00	35.93	4.07	10	36.06	3.94	10
70	35.00	36.65	-1.65	-5	36.94	-1.94	-6
70	48.00	42.71	5.29	11	42.77	5.23	11
70	37.00	37.50	-0.50	-1	37.62	-0.62	-2
Moy.			-0.04	-2		-0.22	-4

Les graphes suivants (figure 6) montrent la comparaison entre les résultats obtenus en laboratoire et in situ et ceux déduits des corrélations (1) et (2).



Corrélation (1)



corrélation (2)

Figure 6 : résistances laboratoire et in situ – résistances corrélation (1) et (2) – écarts

4.3.2 Formes graphiques des corrélations (1) et (2)

Les corrélations (1) et (2) peuvent être traduites par des graphes (figure 7), donnant la résistance du béton fonction de :

- Isovitesses (V) et coefficient de maturité pondéré (cmp) ;
- Isomaturité (cmp) et vitesse des ultrasons (V).

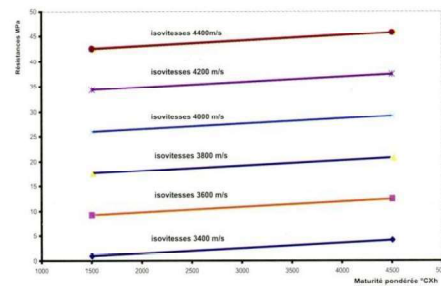
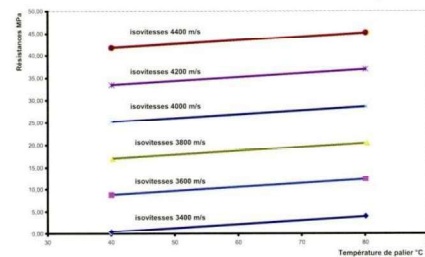
Formes graphiques de la corrélation (1)
 $R = -142.34 + 0.042V + 0.0011cmp$ Formes graphiques de la corrélation (2)
 $R = -142.98 + 0.041V + 0.089T$

Figure 7 : formes graphiques des corrélations (1) et (2)

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

On peut prévoir la résistance en compression du béton après traitement thermique au jeune âge en la calculant suivant l'une des corrélations (1) ou (2) ou à l'aide d'abaques donnés à la figure 7. La valeur du coefficient de détermination R^2 de la régression linéaire est proche de 1 dans les deux corrélations : il est égal à 0.94, ce qui explique la faible valeur de l'écart relatif moyen d'estimation de la résistance qui est respectivement de 2% dans le cas de la corrélation (1) et 4% dans le cas de la corrélation (2) (voir tableau 4).

Les coefficients de régression des corrélations (1) ou (2) ne peuvent être généralisables. Ils sont obtenus pour deux types de béton dont les compositions sont données respectivement dans le tableau 1 et dont les cycles de traitement sont bien définis.

Comme la vitesse de propagation des ultrasons est influencée par les différents paramètres rentrant dans la composition du béton, on pourra adopter la même démarche en menant d'autres travaux pour déterminer les coefficients d'influence partiels qui permettront de corriger la résistance obtenue à l'aide des corrélations (1) ou (2).

Aussi, pour que les qualités à long terme ne soient pas altérées (résistances à 28 jours), le cycle de traitement thermique suivant a été adopté pour les compositions de béton utilisées :

- Préprise de 2 à 3 heures ;
- Montée en température à raison de 20 °C/heure ;
- Maintien d'un palier de température constant pendant 16 heures ;
- Descente en température à raison de 20 °C/heure.

Il est recommandé toutefois de bien étudier les conditions de chauffage de façon à éviter certains déboires ultérieurs.

Le tableau suivant donne quelques références et recommandations pour la réalisation des traitements thermiques.

Température et durée de la période d'attente	Vitesse de montée en température (°C/h)	Température maximale critique	Références
Température ambiante, 4 heures	< 20	70°C	Ministère anglais des transports, Lawrence et al (1990)
30°C, 3 heures	< 20	60°C, SO ₂ ciment < 2 % 55°C, SO ₂ ciment < 3 % 50°C, SO ₂ ciment < 4 %	NF EN 13230-1 (1998) application ferroviaires voies-traverses et support en béton
Environnement sec : 30°C, 3 heures Environnement humide : 40°C, 4 heures	< 20	Environnement sec : 80°C Environnement humide : 60°C	Comité allemand pour le béton armé (1989)
Période de préchauffage adaptée		Environnement sec : 85°C ⁽¹⁾ Environnement humide : 65°C ⁽²⁾	NF EN 13369 (2001) Règles communes pour les produits préfabriqués en béton

(1) Si T > 70°C il faut démontrer, par des essais réalisés à 90 jours, qu'il n'y a pas de perte de résistance.
(2) Si T > 70°C il faut soit démontrer par une expérience la durabilité du béton, soit utiliser un ciment de teneur en SO₂ < 3,5 % et une teneur en H₂O équivalente du béton < 3,5 kg/m³

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] L'accélération de durcissement des produits en béton par traitement thermique- M.Darcemont – mars 1977 France
- [2] Traitement thermique des bétons – cours PPB SARET – France 1979
- [3] Les méthodes non destructives des bétons (traduction du livre roumain) – R.Jones et I.Facaaaru – note d'information technique N°140-27 – CEBTP France
- [4] Calcul prévisionnel des résistances des bétons après traitement thermique, M. Mamillan, J. Sidorowicz - Materials and Structures Volume 12, Number 5 / Septembre, 1979
- [5] Durcissement accéléré du béton – actes des journées d'étude de l'ITBTP – annales de l'ITBTP N° 387 octobre 1980 série : béton N°198 France
- [6] Le béton hydraulique : connaissance et pratique, J.Baron et R.Sauterey ; presse des ponts et chaussées 1982 France
- [7] Maturity of Concrete: Its Applications and

Limitations - By Tarun R. Naik - Report No. CBU-1992-27 REP-86 - Advances in Concrete Technology CANMET, Department of Civil Engineering and Mechanics - March 1992, Canada.

[8] Curing of High-Performance Concrete: Report of the State-of-the-Art-Kenneth W. Meeks & Nicholas J. Carino - - Building and Fire Research Laboratory - Gaithersburg, 1999 USA.

[9] Les bétons : Bases et données sur leur formulation – J.Baron et J.P.Olivier – Association technique de l'Industrie des liants hydrauliques : édition Eyrolles, février 1999 France

[10] Les bétons à base de ciment blanc – prescriptions techniques – BETOCIB – France 2000

[11] Résistance du béton dans l'ouvrage - Guide d'utilisation de la maturimétrie - Projet National Calibe, France 2000

[12] Propriétés des bétons – Adam M.Neville – Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton - CRIB, Sherbrooke – Laval septembre 2000 Canada

[13] The maturity method: from theory to application - N.J. Carino and H.S. Lew - Building and Fire Research Laboratory - National Institute of Standards and Technology - USA 2001

[14] Comment se prémunir des réactions sulfatiques dans le béton ? Point sur les normes actuelles et quelques recommandations – Loïc DIVET- bulletin des laboratoires des ponts et chaussées -240-septembre/octobre 2002-REF 4447- PP87-94.

[15] Origin référence v7.5 2003 - logiciel de calcul et de traitement de données.

[16] Guide for curing of Portland cement concrete pavements, volume II - turner – Fairbanks highway research center Georgetown pike USA -aout 2006

[17] Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship- S.Papovics – the American society for nondestructive testing – USA 2006

[18] Prévision de la résistance en compression du béton au jeune âge traité thermiquement. Application de la méthode d'auscultation dynamique – S.SAKHRAOUI, Mme L. MOUFFOK- Etude sectorielle - Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) – phases 1, 2 et 3 – 2009

[19] Cours en ligne : www.la.refer.org/materiaux