

## Influence de la variation de la température de cure sur le comportement mécanique des mortiers à base des ciments composites

T. Boubekour<sup>1,2</sup> K. Ezziane<sup>2</sup>

Affiliations:

1. Centre universitaire de Tissemsilt, BP 182,38000 Tissemsilt (Algérie)
2. LAG, Université Hassiba Benbouali, BP 151,02000 Chlef (Algérie)

### RESUME

L'étude de l'évolution des résistances des ciments sous diverses conditions de température est d'un intérêt capital pour les promoteurs de la construction en climat chaud. La diversité des caractéristiques des ciments d'aujourd'hui notamment la présence des additions minérales nécessite une compréhension approfondie du processus d'hydratation et de l'évolution des résistances. De même, les conditions de cure jouent un rôle primordial dans le développement des résistances mécaniques. Cette étude traite la prévision de la résistance à la compression des mortiers à base des ciments portland et des ciments composés subissant divers historiques de température. Une étude expérimentale est menée pour suivre le développement des résistances des mortiers sous des conditions de cure variables en température. Ceci a conduit à mieux comprendre le comportement des ciments à base d'additions minérales sous des températures élevées. L'analyse des résultats obtenus a permis la détermination du demi-âge de résistance, les résistances ultimes et l'énergie d'activation, ceci permet de bien comprendre le comportement des additions minérales et leur effet sous des températures élevées.

**Mots clés:** *Ciment, additions minérales, mortier, température, prévision, résistance mécanique*

### I. Introduction

La recherche actuelle sur la prévision de la résistance à court terme du béton est essentielle dans le domaine de construction en génie civil. La variation de la température au sein d'ouvrage en béton peut évoquer essentiellement des problèmes de fissuration due au retrait thermique et des modifications de la microstructure de la pâte de ciment. De ceci, les éprouvettes servant aux essais de résistance et ne suivant pas l'historique de la température réelle de l'ouvrage, ne peuvent être représentatives de résistances. L'augmentation de la température contribue à l'accélération du degré d'hydratation des ciments [1, 2,3]. La présence des ajouts cimentaires comme le calcaire et la pouzzolane peut avoir plusieurs effets, comme l'augmentation des propriétés mécaniques, la réduction de la demande en eau, la correction de la courbe granulométrique du ciment déficient En grains fins et l'accélération de l'hydratation du ciment à partir des

aluminates tricalcique [4, 5, 6]. La consommation de la calcite, la formation de carbo-aluminate, l'accélération de l'hydratation du  $C_3A$  et  $C_3S$ , la modification de la C-S-H et l'amélioration de la zone de transition a démontré la réactivité de calcaire [7-8]. Par conséquent, cette réactivité qui améliore la résistance au jeune âge associée par effet de l'addition de calcaire contribue à sa réduction à long terme suite à l'effet de dilution causé par l'incorporation du calcaire [9]. L'incorporation de 10 % du calcaire a un effet bénéfique sur l'augmentation de la résistance à la compression. Une quantité supérieure à 10 % du calcaire diminue la résistance à la compression [10]. La réaction pozzolanique qui est plus lente que la réaction que la réaction d'hydratation du ciment portland, peut avoir lieu seulement après l'hydrolyse de  $C_3S$  et de  $C_2S$  qui forment l'hydroxyde de calcium [11]. L'addition de 20% de l'ajout pouzzolane dans le ciment portland fournit beaucoup d'avantage comme

l'amélioration de la résistance mécanique à long terme, une bonne durabilité en raison de leur capacité de faire réagir avec de la chaux et la diminution de l'effet néfaste de la température [12,13,14]. L'objectif de ce travail est d'évaluer le comportement des ciments composés sous différents historiques de températures de cure et d'évaluer leurs énergies d'activation. Ainsi Il consiste à substituer le ciment ordinaire par deux additions minérales (calcaire et pouzzolane naturelle) et de suivre les résistances de mortier sous différentes températures de cure.

## II. Présentation des essais

Cette étude permet de trouver la procédure convenable pour acquérir les performances optimales d'un mortier à base d'un ciment composé et de pouvoir prédire l'évolution de ses résistances. Un ciment à base d'additions minérales durcissant sous une température supérieure à 20°C permet d'envisager son utilisation en période estivale et au sud du pays pour réduire les effets négatifs dus aux chutes de résistances ultimes. Une étude a été entreprise sur un ciment ordinaire, un ciment contenant 20% de pouzzolane et d'un troisième type de ciment contenant 10% de calcaire est durcissant sous différentes températures de cure. Une

première série consiste à exposer les éprouvettes de mortiers à des températures constantes. Une deuxième série consiste à exposer les mortiers à des historiques de température variables. L'objectif de cette étude est d'examiner l'effet de l'historique de température de cure sur l'évolution des résistances mécaniques en présence de différentes additions minérales.

### II.1. Matériaux utilisés

Afin de bien mener ce travail, on a utilisé trois types de ciments; un ciment portland, un ciment composé contenant 10% de calcaire et un ciment contenant 20% de pouzzolane. Le tableau 1, présente les caractéristiques physico-chimiques de ces matériaux. Pour la confection des éprouvettes de mortier, on a utilisé un sable normalisé représentant trois fois la quantité de sable et un rapport E/C égal à 0.5.

### II.2. Confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont confectionnées dans un malaxeur à mortier avec une minute de malaxage à sec suivie d'une minute après l'ajout de l'eau de gâchage et une autre minute avec une vitesse rapide. Ces éprouvettes sont coulées dans des moules prismatiques de 4 x 4 x 16 et vibrées à l'aide d'une table à secousses.

TAB.1- CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES MATERIAUX UTILISE.

Provenance	Clinker	Calcaire	pouzzolane
SiO <sub>2</sub>	20.58	0.55	46.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.90	0.40	17.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.70	0.17	10.5
CaO	62.8	53.47	10.5
MgO	0.53	1.02	3.8
SO <sub>3</sub>	2.28	1.50	0.4
insoluble	0.42	/	/
Chaux libre	2.17	/	/
Na <sub>2</sub> O		0.02	3.4
K <sub>2</sub> O		0.05	1.5
PAF	1.00	43.13	4.31
SSB cm <sup>2</sup> /g	2950	3200	3100
Taux de verre	/	/	>15%

### II.3. Cure des éprouvettes

Les éprouvettes sont conservées immédiatement après le coulage dans une étuve

à vapeur sous différentes températures de cure 20°C, 30°C, 40 °C et 50°C. Un jour après le moulage, les éprouvettes seront démoulées et remises en conservation jusqu'au moment de

l'essai. La deuxième série subit une cure sous une température élevée pendant une période de 1, 3, 7 et 28 jours puis les éprouvettes continuent leurs durcissements sous une température de 20 °C jusqu'au jour de

l'écrasement. Les éprouvettes sont conservées dans une cuve à vapeur contrôlée en température et en humidité où cette dernière est supérieure à 95 %.

TAB.2- RESULTATS DE RESISTANCE A LA COMPRESSION POUR DES TEMPERATURES CONSTANTES.

Temps en jours	Temperature 20°C			Temperature 30°C			Temperature 40°C			Temperature 50°C		
Type de ciment	CEMI 10%C 20%P			CEMI 10%C 20%P			CEMI 10%C 20%P			CEMI 10%C 20%P		
1	09.27	09.68	06.50	12.00	12.87	08.75	16.20	17.52	12.00	19.58	22.68	15.75
3	21.00	22.00	13.50	22.50	23.46	18.00	23.34	24.12	21.50	24.00	25.06	27.50
7	27.00	28.00	23.00	30.34	30.80	26.75	32.08	32.31	29.50	33.45	32.60	34.00
28	43.00	42.18	40.50	38.75	38.15	39.00	38.00	37.64	40.00	37.53	36.85	38.75
90	45.75	45.00	46.00	41.37	41.75	44.00	40.00	39.85	43.25	39.05	37.45	42.50

TAB.3- RESULTATS DE RESISTANCE A LA COMPRESSION POUR DES CURES SOUS UNE TEMPERATURE VARIABLE

	Age	1-30	3-30	7-30	28-30	1-40	3-40	7-40	28-40	1-50	3-50	7-50	28-50
C	1	12.00	12.00	12.00	12.00	16.20	16.20	16.20	16.20	19.58	19.58	19.58	19.58
E	3	21.87	22.50	22.50	22.50	22.17	23.34	23.34	23.34	23.00	24.00	24.00	24.00
M	7	28.00	29.00	30.34	30.34	31.20	31.50	32.08	32.08	32.00	32.75	33.45	33.45
I	28	40.03	42.50	41.25	38.75	42.12	43.25	42.43	38.00	38.18	40.50	39.75	37.50
	90	45.21	43.75	43.00	42.25	45.00	44.12	43.50	41.75	43.00	42.25	41.00	40.25
10	1	12.87	12.87	12.87	12.87	17.52	17.52	17.52	17.52	22.68	22.68	22.68	22.68
%	3	22.93	23.46	23.46	23.46	23.25	24.12	24.12	24.12	24.1831.	25.26	25.26	25.26
C	7	29.00	29.50	30.80	30.80	30.43	31.62	32.31	32.31	31	32.00	32.60	32.60
A	28	39.81	41.98	40.32	38.15	40.84	41.12	40.50	37.64	38.68	39.85	37.00	36.85
L	90	43.50	42.93	42.50	42.00	42.50	42.00	41.25	40.5	41.66	40.92	39.71	38.80
20	1	08.75	08.75	08.75	08.75	12.00	12.00	12.00	12.00	15.75	15.75	15.75	15.75
%	3	13.00	18.002	18.00	18.00	13.37	21.50	21.5029.	21.5029.	20.6228.	27.5	27.50	27.50
P	7	22.00	3.00	26.75	26.75	23.50	24.25	50	50	75	31.00	34.00	34.00
O	28	39.00	38.50	39.75	39.00	38.00	37.00	38.62	40.00	36.25	36.75	37.25	38.75
Z	90	42.50	43.00	43.25	43.75	43.00	43.50	44.00	44.50	42.00	41.25	40.50	40.00

#### II.4. Déroulement des essais

Les éprouvettes subissent un essai de flexion à trois points. Les deux bouts de chaque éprouvette seront testés en compression afin de déterminer la résistance du mortier pour différents âges ; 1, 3, 7, 28 et 90 jours. Les résistances à la compression sont regroupées dans les tableaux 2 et 3 où chaque valeur représente la moyenne de quatre essais.

### III. Résultats ET discussions

#### III.1 Température constante

A un jour d'âge, la résistance du mortier témoin augmente linéairement avec l'augmentation de la température suivie par celle du mortier à base de calcaire avec des valeurs plus élevées. A 3 et 7 jours d'âge, la résistance du mortier de ciment à base de calcaire augmente avec la température jusqu'à une température de 50°C par rapport à celle du mortier de contrôle. A l'âge de 28 jours la résistance des mortiers des ciments à base de calcaire commence à diminuer significativement par rapport à celle du mortier témoin de 1.5%, 0,94% et 1,81%, successivement pour la température de 30, 40 et 50°C. A 90 jours d'âge, la résistance du mortier témoin dépasse celle du mortier à base de calcaire de 14% pour une température de 50 °C, mais décroissent

linéairement toute les deux avec la température. Ceci s'explique par l'augmentation du taux d'hydratation des ciments au calcaire au jeune âge à partir des silicates tricalcique(C<sub>3</sub>A) et la diminution du taux d'hydratation des silicates bi calcique (C<sub>2</sub>S), qui présente des bonnes résistances à long terme. Contrairement au calcaire la pouzzolane naturelle donne des résistances plus faibles au jeune âge par rapport

au mortier témoin (ciment portland) même avec l'augmentation de la température jusqu'à 50°C. A 90 jours d'âge, la résistance du mortier à la pouzzolane dépasse nettement celle du mortier témoin de 7,5 % et de 13.5 % pour ciment au calcaire sous une température de cure de 50°C, mais décroît par rapport à la température de 20°C, comme le montre la figure 1.

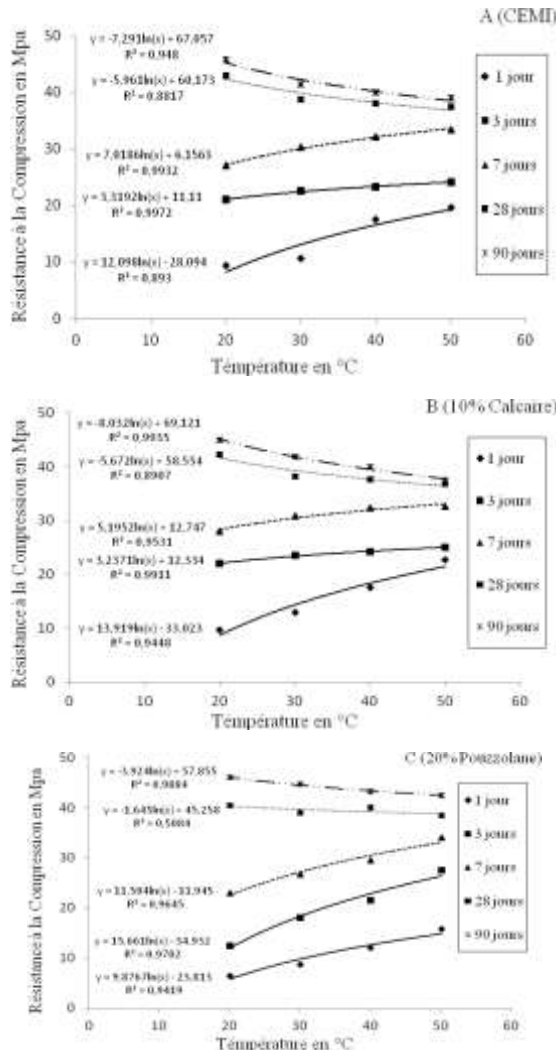


Fig.1-. Evolution des résistances en fonction de la température pour les différents types de ciments

Les études de diffraction par rayon x ont confirmé qu'une formation rapide de C-S-H à remarquer avec l'augmentation de la température à 85°C ainsi une augmentation considérable des résistances. A partir de 15 jours l'élévation de la température à un effet

négatif sur les résistances. En revanche, le ciment durci à des températures de 22° C la résistance augment graduellement avec le temps de conservation [15].

### III.2 Température variable

On remarque que l'augmentation de la température avec le temps de conservations donne des résistances à court terme élevées pour les mortiers de ciment à base de calcaire par rapport au mortier témoin. A 28 et à 90 jours, une chute remarquable de résistance est constatée pour tous les mortiers surtout pour le ciment à base de calcaire (voir Fig 2 et 3). La présence de calcaire augmente l'effet néfaste de la température et plus les éprouvettes sont exposées plus l'effet est prononcé.

La figure 3, montre que le mortier de ciment à base de calcaire au jeune âge subit une grande augmentation de résistance, ensuite la résistance diminue tout en restant à long terme inférieure à celle du mortier durcissant sous 20 °C. Pour le

ciment contenant la pouzzolane naturelle, on remarque qu'une chute de résistance à 28 et 90 jours pour des échantillons soumis à 1 jour sous une température élevée. La présence de la pouzzolane réduit l'effet néfaste de la température et plus les éprouvettes sont exposées plus l'effet est négligeable. Sur les figure 4, plus la durée augmente plus que la pouzzolane contribue à minimiser la baisse de résistance. Au jeune âge le mortier subit une grande chute de résistance, ensuite la résistance du mortier à la pouzzolane augmente tout en restant à long terme inférieure à la résistance durcissant sous 20 °C.

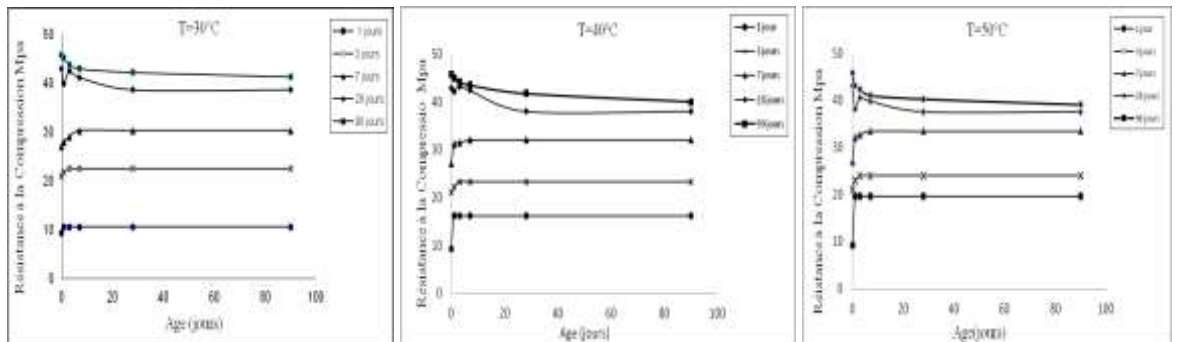


FIG.2-. Variation des résistances en fonction de la durée d'exposition pour le ciment portland.

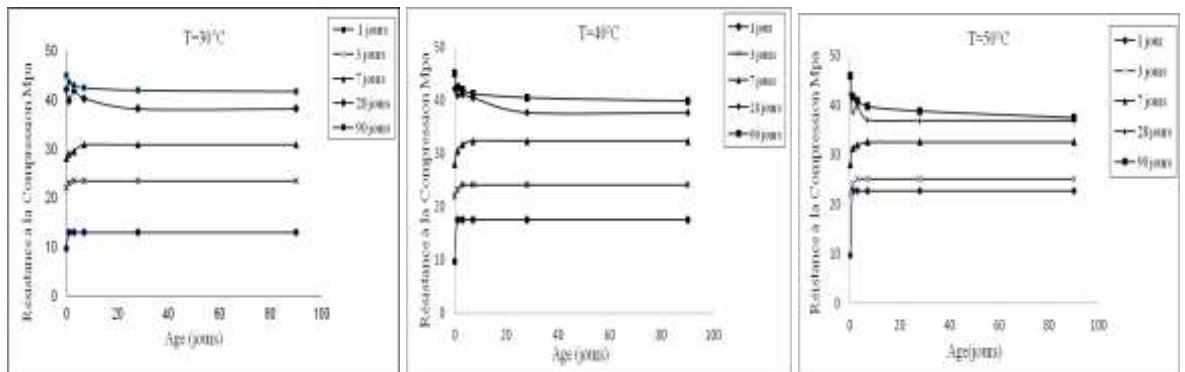


FIG.3-. Variation des résistances en fonction de la durée d'exposition pour le ciment contenant 10% Calcaire.

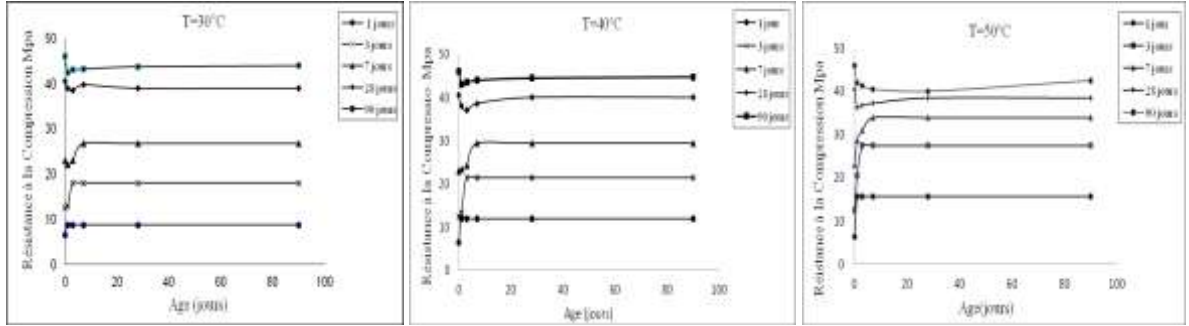


FIG.4-. Variation des résistances en fonction de la durée d'exposition pour le ciment contenant 20% de pouzzolane.

#### IV Analyse des Résultats

Une approche suggérée par Knudsen (1982) et utilisée par Roy [16] pour quantifier l'énergie d'activation des ciments, suppose que la cinétique de l'hydratation peut être prédite par l'équation suivante :

$$R = R_u \frac{t - t_0}{(t - t_0) + t_{50}} \quad (1)$$

Avec :

R : propriété du ciment (chaleur d'hydratation, retrait, résistance, etc.)

R<sub>u</sub> : valeur ultime,

t<sub>0</sub> : temps de la période dormante avant le développement de la résistance (peut être assimilé au temps de fin de prise.

t<sub>50</sub> : temps nécessaire pour atteindre 50 % de la valeur ultime ; demi âge de résistance.

La corrélation des résultats donne les valeurs des demi-âges de résistance t<sub>50</sub> et des résistances ultimes. Ces résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4, pour les différentes températures.

TAB.4- VALEURS DE T50 EN JOURS ET DES RESISTANCES FINALES.

	Résistances Ultimes(MP)				Demi-Ages de résistance t50(jours)				Energie d'activation (kJ/mole)
	20 °C	30°C	40 °C	50°C	20 °C	30 °C	40 °C	50°C	
CEMI	48,28	42,39	40,36	38,95	4,48	2,65	1,80	1,19	36.06
10% Calcaire	45	42.75	40.85	38.46	4.11	2.62	1.44	0.80	38.56
20% Pouzzolane	51,75	46,55	45,00	41,55	8,65	4,90	3,32	1,50	41.47

##### IV.1 Demi-âge de résistance

Le demi-âge de résistance représente l'âge correspondant à un degré d'hydratation égale 0.5 où la résistance atteint la moitié de la résistance ultime. Les résultats obtenus concordent parfaitement avec les études antérieures où l'hydratation du ciment devient

plus rapide avec la présence de l'ajout, ces différences se réduisent en fonction de l'élévation de la température. La figure 5, représente des variations linéaires, d'où on peut écrire :

$$t_{50}(p) = t_{50}(0\%) + k_p \cdot p \quad (2)$$

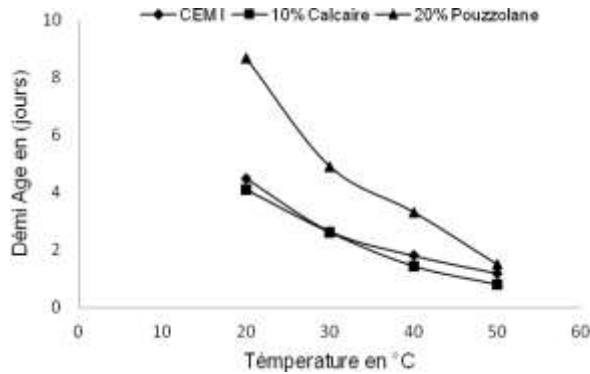


FIG.5-. Demi-âge de résistances en fonction de la température de cure

Où p est le taux de substitution de ciment et kp est un coefficient donné en fonction de la température et qui peut être prédit par l'équation d'Arrhenius citée ci-après.

#### IV.2. Energie d'activation

Il est très intéressant d'utiliser le concept de l'énergie d'activation de la réaction d'hydratation pour visualiser la différence entre l'activation de calcaire, la pouzzolane et celle du ciment ordinaire (CEM I). En considérant la réaction d'hydratation comme une simple réaction, on peut évaluer sa cinétique par la relation d'Arrhenius suivante [2]:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

Avec :

K : constante cinétique,

Ea : énergie d'activation,

R:constante des gaz parfaits (R=8.314 J/mole

K°).

T : Température en degré Kelvin

A : constante.

Pour deux températures T1 et T2, le même degré d'avancement de l'hydratation doit être achevé aux temps t1 et t2 d'où on peut écrire :

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] = \frac{t_2}{t_1} \quad (4)$$

Les valeurs de l'énergie d'activation Ea peuvent être calculées en utilisant les temps correspondant à 50 % du degré d'avancement de l'hydratation (T50) pour deux températures données. Les tableaux, 5 et 6 présentent l'énergie trouvée pour chaque type de ciment et pour les différentes températures. Il est évident que la présence des ajouts cimentaires attribue une énergie supplémentaire au mélange.

TABLE.5- VALEURS DE L'ENERGIE D'ACTIVATION POUR LES DIFFERENTS TYPES DES CIMENTS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE CURE.

Température (°C)	Type de ciment	20-30	20-40	20-50
Ea (Kj/mol)	CEMI	38.82	34.63	34.75
	10% Ca	33.22	39.78	42.68
	120% PZ	41.95	36.52	45.94

En faisant une comparaison de l'énergie d'activation trouvée avec celles données dans la littérature pour les différents ajouts minéraux utilisés dans le monde, on peut conclure que le calcaire et la pouzzolane

possèdent une énergie supérieure à celle du ciment ordinaire. Cette augmentation demeure voisine et parfois meilleure à celles des autres ajouts dans le monde ce qui leur confère une propriété souhaitable leur permettant d'être

considérée parmi les ajouts cimentaires en Algérie.

TAB.6- VARIATION DE L'ENERGIE D'ACTIVATION EN PRESENCE POUR LES DIFFERENTS AJOUTS EN KJ/MOLE.

Taux de substitution	0 %	10 %	20%	40 %	50%	65 %	Observations
Roy et Idorn (1982) [16]	44.31				49.1		Ciment ; 3680 cm <sup>2</sup> /g laitier ; 5590 cm <sup>2</sup> /g
Ezziane [12]	24.4			32.6			Pouzzolane
Weiping et coll (1994) [17]	39.0					49.3	Laitier
Bougara [18]	25.79				45.84		Ciment ; 3100 cm <sup>2</sup> /g laitier ; 3627 cm <sup>2</sup> /g
Wang Jiachun [19]			29.3				Cendre volante
Calcaire de chlef	36.06	38.56					SSB=3200 cm <sup>2</sup> /g
Pouzzolane	36.06		41.47				SSB=3100 cm <sup>2</sup> /g

### IV.3 Résistances ultimes

Généralement, les résistances ultimes peuvent être représentées par une fonction affine et décroissante de l'accroissement de la température de cure, selon l'équation suivante décrite par l'équation de D'Aloia [2]:

$$R_u(T) = R_u(20^\circ C) [1 - k(T - 20)] \quad (5)$$

Où k est la pente du modèle normalisé qui correspond à la moyenne des valeurs obtenues dans la bibliographie égale à 10.2 10<sup>-3</sup>.

La présence des ajouts comme le calcaire et la pouzzolane dans la composition du ciment modifie considérablement les résistances ultimes. Ceci a conduit les recherches vers une utilisation optimale de ce produit afin d'acquérir des performances meilleures selon des modes de conservation appropriés (voir la figure 6). La température de cure a un effet considérable sur les valeurs finales des résistances, pour un mortier avec ajouts calcaire et la pouzzolane, les valeurs sont décroissantes et représentent une droite affine.

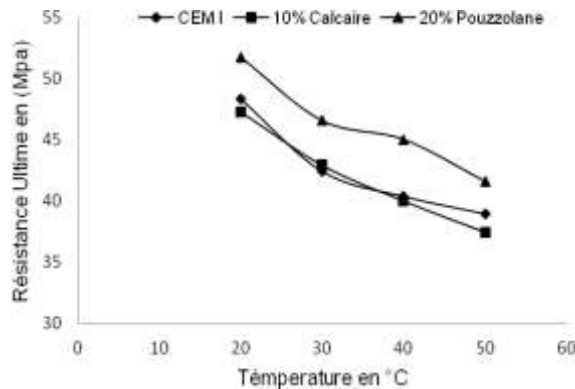


Fig.6- Résistances finales ultime en fonction de la température de cure



## V. Conclusion

Les résultats obtenus à travers cette étude nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le calcaire a un effet accélérateur sur l'hydratation du ciment, ainsi que la résistance à la compression du ciment à base de calcaire au jeune âge augmente avec l'augmentation de la température.
- La présence de calcaire augmente l'effet néfaste de la température et plus les éprouvettes sont exposées plus l'effet est remarquable.
- La pouzzolane naturelle contribue à l'augmentation de la résistance à la compression à long terme à partir des silicates bi calciques ( $C_2S$ ).
- La présence de la pouzzolane diminue l'effet néfaste de l'augmentation de la température.
- La température de cure a un effet considérable sur les valeurs finales des résistances, pour un mortier avec ajouts calcaire, les valeurs sont croissantes au jeune âge et décroissantes à long terme par rapport à celle au mortier témoin. Et contrairement à la pouzzolane.
- Les ajouts comme le calcaire et la pouzzolane possèdent une énergie supérieure à celle des ciments sans ajouts, ce qui leur permet d'être utilisés en climat chaud.

## REFERENCE

- [1] J.M. Torrenti, La Résistance Du Béton Au Très Jeune Age, Bull.liaison Labo. P. et Ch 179.-mai-juin 1992, pp 31-41
- [2] G. Chanvillard, d'aloia L, Prévission de la Résistance en Compression au Jeune Age du Béton Application de la Méthode du Temps Equivalent, Bull. Liaison Labo.P.et Ch 193-sept-oct 1994, pp39-51.
- [3] G. Ye a, b, X. Liuc, G. De Schuttera, A-M. Poppea, L.Taerwea " Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes", Cement & Concrete Composites 29 (2007) 94–102.
- [4] M. Bouasker, P. Mounanga, P. Turcry, A. Loukili, A. Khelidj, "Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effet of limestone filler and granular inclusions" Cement and Concrete Composites, vol. 30, n° 1, 2008, pp.13-22.
- [5] L. Montanaro, A. Negro, M. Regourd, "Action de  $CaCO_3$ ,  $CaSO_4$  et  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  sur l'hydratation de  $C_3S$ ". Cement and Concrete Research, vol. 18, n° 3, 1988, pp. 431-437.
- [6] B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gllucci, K. Scrivener, "Influence of limestone on the hydration of Portland cements". Cement and Concrete Research, vol. 38, n° 6, 2008, pp. 848-860.
- [7] Heikal M, El-Didamony H, Morsy MS. Limestone-filled pozzolanic cement. Cement Concrete Res 2000; 30(12):1827–34.
- [8] S. Tsivilis, E. Chaniotakis, G. Kakali and G. Batis, "An analysis of the properties of Portland limestone cements and concrete", Cement and Concrete Composites, vol. 24, n° 3-4, 2002, pp.371-378.
- [9] Bonavetti VL, Rahhal VF, Irassar EF. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler blended cements. Cement Concrete Res 2001; 31(6):853–9.
- [10] Lawrence P, Cyr M, Ringot E. Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration. Cement Concrete Res 2003; 33(12):1939–47
- [11] P.K. Mehta, Studies on blended Portland cements containing cements Santorin earth, Cement and Concrete Researc, Vol.11, 1981, pp.507-518.
- [12] K. Ezziane, A. Bougara, A. Kadri, H. Khalafi, E. Kadri, Compressive strength of mortar containing natur pozzolan under various curing temperature.Cement and Concrete composites, Mars 2007, pp 587-593.
- [13] Ghrici M, Kenai S, Said-Mansour M. Mechanical properties and durability ofmortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. Cem Concr Compos 2007; 29:542–9.
- [14] Hosam.El\_Din H. Seleem, Alaa M. Rashad, Tarek. Elsokary, Effect of elevated temperature on physico-mechanical properties of blended cement concrete, Construction and Building Materials 25 (2011) 1009–1017.
- [15] I. Elkhadiri, F. Puertas "The effect of curing temperature on sulphate-resistant cement hydration and strength"Construction and Building Materials 22 (2008) 1331–1341.
- [16] D.M. Roy, G.M.idorn, Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete, ACI Journal / Nov-Dec 1982, pp 444 -457.
- [17] MA. Weiping, D. Sample, R. Martin, P W. Brown, Calorimetric Study Of Cement Blends Containing Fly Ash, Silica Fume And Slag At Elevated Temperatures, Cement And Concrete And Aggregates, CCAGPD, Vol 16, N°2, Dec 1994, pp 93-99
- [18] A. Bougara, K. Ezziane, A. Kadri, Etude de l'Activation du Laitier d'El-Hadjar, Premier Colloque Maghrébin de Génie Civil, Biskra Nov 1998, 10 p
- [19] WANG Jiachun, YAN Peiyu, YU Hongfa, Apparent Activation Energy of Concrete in Early Age Determined by Adiabatic Test, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. Sept 2007.

