



Bétonnage sous un climat très chaud & Durabilité et considérations thermiques

B. Tidjar¹, S.M.A. Bekkouche¹, A. Asroun², N. Bella³, R. Djeflal¹

¹Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie

²Université Djillali Liabes, faculté des sciences de l'ingénieur, Sidi Bel-Abbès, Algérie

³Université de Béchar, Béchar, Algérie

boudjtidjar@yahoo.fr

Résumé — Le bétonnage par temps chaud cause plusieurs problèmes dus principalement à l'évaporation excessive de l'eau qui influe sur les différents paramètres d'évaluation de la durabilité du béton puisque la température accélère les réactions chimiques. Dans cette étude, nous avons étudié à la fois les performances thermiques d'une dalle de béton ainsi que l'efficacité des différentes procédures de bétonnage par temps chaud: l'addition calcaire, produit de cure, anti-évaporation...etc. Vu le grand nombre de facteurs, la méthode des plans d'expériences sera utilisée pour minimiser le nombre d'essais et réduire la durée de l'étude.

Mots clés — Bétonnage par temps chaud, la durabilité, inertie thermique, addition calcaire, plan d'expérience

I. INTRODUCTION

La température dans les régions sud atteint des valeurs importantes qui influent sur la durabilité de béton, la température peut dépasser 50°C [1] avec une très faible humidité relative.

Le bétonnage par climat chaud pose plusieurs problèmes notamment en ce qui concerne la durabilité [2]. Ce manque de durabilité influence directement la structure de la construction et peut conduire à la détérioration totale d'un grand nombre des constructions.

II. OBJECTIF DE L'ETUDE

L'objectif de ce travail est d'étudier les performances thermiques d'une dalle en béton et assurer à la fois la durabilité en climat très chaud par l'utilisation des différentes méthodes et solutions [3], [4], [5]: produit de cure, anti-évaporation, addition calcaire et utilisation de ciment CRS.

Nous avons ainsi utilisé les matériaux locaux pour améliorer les propriétés de la durabilité des bétons.

Les indicateurs de durabilité retenue pour cette étude sont :

- Résistance à la compression.
- Résistance à la traction par flexion.

- La vitesse d'ultrason.

III. MATERIAUX UTILISES

A. Ciment

Deux ciments ont été utilisés pour formuler les différentes compositions: Ciment du type CPJ- CEM II/A42.5 et Ciment du type CRS-CEM/42.5 N

B. sable

Pour la confection du béton, deux types de sable provenant des abords de l'oued et l'autre sable est concassé de la carrière ZEROUTE (Djebel Béchar).

Les propriétés physiques du sable indiquées dans le tableau ci-après :

TABLEAU I
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SABLES

	Roulé	Concassé	Norme
Masse Volumique Absolue (g/cm ³)	2.61	2.63	NF P18-555
Masse volumique Apparente (g/cm ³)	1.61	1.52	N PF18-553
Equivalent de sable	78.8	74.7	NF P18 - 598

C. Les Graviers

Les Graviers sont concassés de nature calcaire (gravier 1 : 3/8, gravier 2 : 8/15).

Les propriétés physiques des graviers sont indiquées dans le tableau II

D. Additions calcaires

C'est un matériau minéral finement broyé et pouvant se substitué partiellement au ciment pour améliorer certaines propriétés du béton. L'addition utilisée est un calcaire obtenu



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



à partir d'un tamisage de gisement de roches calcaires de la carrière ZEROUTE (Djebel Béchar) au tamis $80\mu m$.

TABLEAU II.
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES GRAVIERS

	Gravier 1	Gravier 2	Norme
Masse Volumique Absolue (g/cm ³)	2.61	2.60	NF P18-555
Masse volumique Apparente (g/cm ³)	1.43	1.45	N PF18-553

Les caractéristiques chimiques de cette addition sont présentées au tableau suivant :

TABLEAU III
ANALYSE CHIMIQUE DE L'ADDITION

carbonates	surfates	Cl-%	insolubles	V,bleu de sol
76,80%	Trace	0,03%	23,17%	0,5

E. Les granulats

Les granulats sont concassés de nature calcaire (gravier 1 : 3,5/9 et gravier 2 8/15).

TABLEAU IV
FORMULATION DES BETONS.

Constituants	BRS	BRA	BCS	BCA
Sable	982,9	1222,2	989,1	1231,6
Gravier 3,5/9	625,5	777,8	624,7	777,8
Gravier 8/15	178	221,4	177,8	221,4
Ciment*	350	297,5	350	297,5
Calcaire (10 %)	/	52,5	/	52,5
Eau	175	175	175	175
Plastifiant	5,95	5,95	7	7
E/C	0,5	0,59	0,5	0,59
E/Liant	0,5	0,5	0,5	0,5

Le type de ciment est changé en fonction de la matrice d'expérience.

BRS : Béton à base de sable roulé sans addition.

BRA : Béton à base de sable roulé avec addition.

BCS : Béton à base de sable concassé sans addition.

BCA : Béton à base de sable concassé avec addition.

IV. MATERIELS ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

Pour simuler le climat chaud et aride au labo on a utilisé une enceinte climatique en acier de dimensions

$80 \times 80 \times 100 \text{ cm}^3$, équipée de deux résistances éclectiques fixées sur les faces latérales pour produire la chaleur et trois ventilateurs, deux ventilateurs symétriques placés au dessus des résistances qui fournissent un mouvement de l'air d'une vitesse moyen de 6 Km/h, et un ventilateur sur la face avant de l'enceinte, ce ventilateur est situé en face des résistances pour distribuer la chaleur sur tout le volume de l'enceinte.

La température et l'hygrométrie sont mesurées par l'utilisation d'une station vent météo. Les éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28$ et cubiques 10 sont exposées à une température moyenne de $T = 55^\circ \text{C}$ et une humidité moyenne de $H = 20\%$.

A. Mesure des vitesses ultrasoniques

Les mesures des vitesses des ultrasons ont été réalisé en mode de transmission directe, l'ultrasonique (marque MATEST) de transmission de réception de 55 KHZ de fréquence, les transducteurs sont mis en contact des faces des éprouvettes par l'intermédiaire d'un couplant.



Fig. 1 Position des transducteurs.

B. La résistance à la traction par flexion

La résistance à la traction par flexion a été réalisée sur des éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ cm à 28 jours, par l'appareil de flexion.

La valeur de la contrainte est enregistrée au moment de la rupture de l'éprouvette en KN/mm^2 sur un écran d'affichage.



Fig.2 Appareillages de l'essai de traction par flexion.

C. La résistance à la compression

Les deux morceaux obtenus après rupture des éprouvettes par flexion sont testés à la compression par une presse



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



automatique ayant une force maximale de 1500 kN, la résistance à la compression R_c (MPa) sera calculée par la formule classique.

$$R_c = \frac{F_{MAX}}{S} \quad (1)$$



Fig.3 Appareil de compression.

V. PLAN D'EXPÉRIENCE

Pour étudier les effets d'influence des différents facteurs sur la durabilité au climat chaud et arides, on va construire un plan d'expériences [6], le plan d'expérience utilisé est un plan factoriel fractionnaire à six facteurs dont trois sont principaux et trois supplémentaires, chaque facteur varie en deux niveaux, d'où le nombre d'essais est égale à : $2^{6-3}=8$

Les facteurs étudiés sont :

- Ciment.
- Sable.
- Addition.
- Anti-évaporation
- Produit de cure.
- Flinkote.

Le plan d'expérience a été utilisé pour étudier l'efficacité des solutions est donné en annexe (tableau VI).

A. FORMULATION DES D'ALIASSEGE :

A.1 Calcul de générateur

A.1.1 les générateurs d'alias indépendants

$$D = AB \Rightarrow Dx D = Dx AB \Rightarrow I = ABD$$

$$E = AC \Rightarrow Ex E = Ex AC \Rightarrow I = ACE$$

$$F = BC \Rightarrow Fx F = Fx BC \Rightarrow I = BCF$$

A.1.2 les générateurs d'alias dépendants

Multiplication 2 par 2 $C_3^2 = 3$:

$$ABD \times ACE = DCDE$$

$$ABD \times BCF = ACDF$$

$$ACE \times BCF = ABEF$$

Multiplication 3 par 3 $C_3^3 = 1$:

$$BCDE \times ACDF \times ABEF = I$$

$$I = ABC = ACE = BCF = DEF = ABEF = ACDF = BCDE$$

Pour obtenir les contrastes on multiplie le générateur d'Alias par le facteur A pour avoir L_A (L_A : est le contraste ou effet du facteur A) :

$$I \times A = A \times ABC = A \times ACE = A \times BCF = A \times DEF = A \times ABEF = A \times A$$

$$CDF = A \times BCDE$$

Donc

$$L_A = A + BD + CE + BEF + CDF + ABCF + ADEF + ABCDE$$

Même chose pour l'autre contraste on obtient :

$$L_B = B + AD + CF + AEF + CDE + ABCE + BDEF + ABCDF$$

$$L_C = C + AE + BF + ADF + BDE + ABCD + CDEF + ABCEF$$

$$L_D = D + AB + EF + ACF + BCE + ACDE + BCDF + ABDEF$$

$$L_E = E + AC + DF + ABF + BCD + ABDE + BCEF + ACDEF$$

$$L_F = F + BC + DE + ABE + ACD + ABDF + ACEF + BCDEF$$

E: effet principal.

L: contrastes (effet simple).

VI. RESULTATS ET DISCUSSION

Les figures 4 et 5, montrent que les facteurs les plus influents sur la résistance à la compression et à la traction par flexion sont : le ciment CRS (facteur A), les additions calcaire (facteur C), le sable (facteur B) et anti-évaporation (facteur D), produit de cure (facteur E)

Ces facteurs augmentent la résistance mécanique par l'obtention d'un béton plus compacte et moins poreux, le flinkote a de effet négligeables, ces derniers facteurs ont un rôle principalement de protection pas d'amélioration des caractéristiques mécaniques

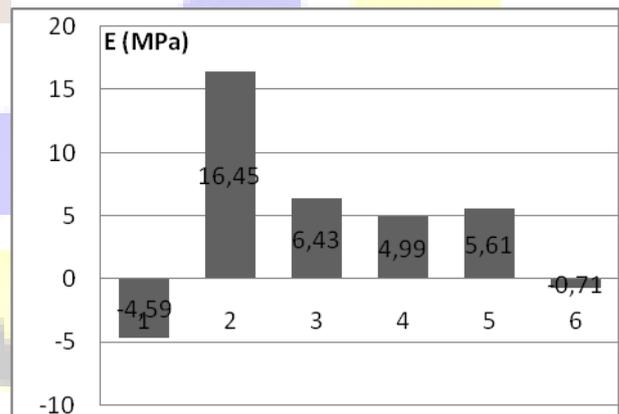


Fig.4 L'influence des facteurs sur la résistance a la compression.

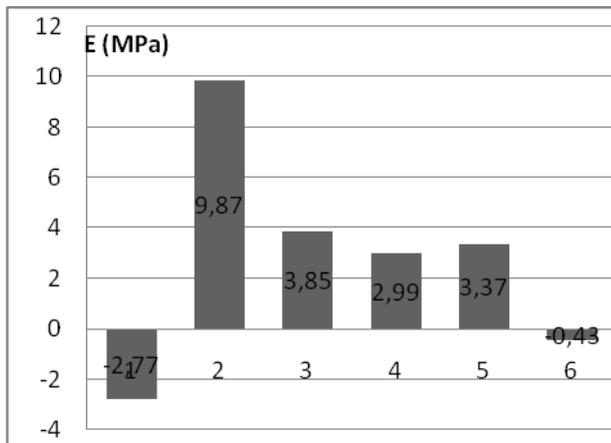


Fig.5 L'influence des facteurs sur la résistance à la traction.

Le graphe de l'auscultation ultrasonique montre que :

- le ciment CRS (facteur A), l'interaction et le sable (facteur B) et le produit de cure (facteur E) sont les facteurs les plus influents par ordre décroissant, avec des effets entre 3.6 et 6.6 mm/μs.
- l'addition calcaire (facteur C) et l'anti-évaporation seul (facteur D) ont des effets moyens égale 0.2 mm/μs., sauf le flinkote à un effet négligeable.

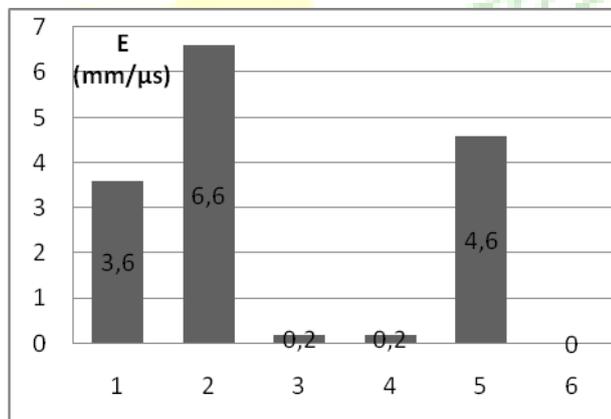


Fig. 6 L'influence des facteurs sur la vitesse ultrasonique.

Le figure 6 montrent que tous les effets lorsqu'ils sont relativement influent augmentent la vitesse de propagation des ondes ultrasonique dans le béton, c.-à-d. que ces facteurs donnent un béton plus compacte, avec moins de vides, car la vitesse de propagation du son dans le béton est plus élevée que celle du vide ou l'eau, la vitesse de propagation du son dans le béton est 4500 m/s, dans l'eau 1480 m/s et dans l'air 330 m/s.

VII. MODELE DE CONDUCTION ET CONSIDERATIONS THERMIQUES : CAS D'UNE DALLE DE BETON EXPOSEE

On se base sur une approche simplifiée qui permet de représenter le système multicouche par un modèle proposé par Rumianowski et al [7],[8],[9] en 1989 et est repris par Con et al en 2003. Il est souvent utilisé lorsque nous nous intéressons à la détermination de la température d'un nœud dans un mur ou bien sur les surfaces interne et externe. C'est pourquoi, on suppose que :

- Les transferts thermiques à travers les parois sont supposés unidirectionnels, perpendiculairement à ces parois
- La convection est naturelle
- Le régime est établi
- La distribution de la température sur les parois est uniforme
- Les caractéristiques des matériaux sont constantes et indépendantes des conditions météorologiques
- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour les radiations de grandes longueurs d'ondes.

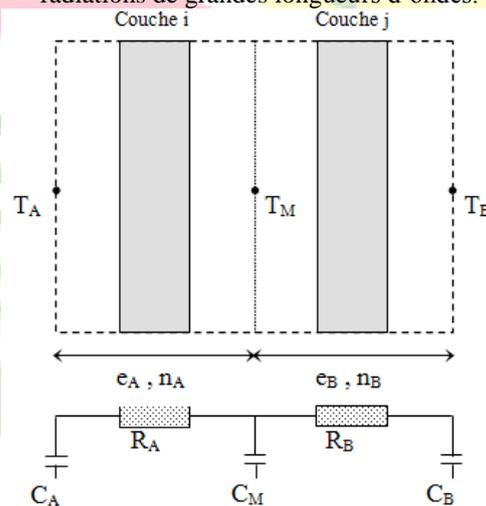


Fig.7 modèle de conduction d'un mur

$$n = n_A + n_B \quad (2)$$

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (3)$$

$$R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k S_k} \quad (4)$$

Les capacités thermiques sont déterminées comme suit:

$$C_A = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i S_i (1 - \beta_i) \quad (5)$$



$$C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C p_j e_j S_j \delta_j \quad (6)$$

$$C_M = \sum_{k=1}^{n_A} \rho_i C p_i e_i S_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C p_j e_j S_j (1-\delta_j) \quad (7)$$

$$\beta_i = \frac{\frac{e_i}{2 \lambda_i S_i} + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_A} \quad (8)$$

$$\delta_j = \frac{\frac{e_j}{2 \lambda_j S_j} + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k S_k}}{R_B} \quad (9)$$

Le bilan énergétique du bâtiment pour les surfaces est représenté par les équations:

$$C_A \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_M - T_A}{R_A} + \sum S F_{Surf-i} \sigma (T_i^4 - T_A^4) + S h_{conv} (T_{air} - T_A) \quad (10)$$

$$C_B \frac{dT_B}{dt} = \alpha S G + \frac{T_M - T_B}{R_B} + \varepsilon S \frac{1 - \cos \beta}{2} (T_{Groundoutside}^4 - T_B^4) + \varepsilon S \frac{1 + \cos \beta}{2} (T_{Sky}^4 - T_B^4) + S h_{convamb} (T_{amb} - T_B) \quad (11)$$

$$C_M \frac{dT_M}{dt} = -\frac{T_M - T_A}{R_A} - \frac{T_M - T_B}{R_B} \quad (12)$$

$$h_{convamb} = 2.8 + 3.3 V_{Wind} \quad (13)$$

$$T_{Sky} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (14)$$

On considère une dalle de béton exposée au rayonnement solaire sous un ciel totalement clair, homogène et isotrope dont les caractéristiques thermiques sont les suivantes [10] :

$$\rho = 2400 \text{ kg / m}^3, \lambda = 1.8 \text{ w / (m K)} \text{ et } C_p = 1000 \text{ j / (kg } ^\circ\text{C)}.$$

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à stocker et à déstocker de l'énergie dans sa structure, quelle que soit la saison. Elle définit la vitesse à laquelle le bâtiment se refroidit ou se réchauffe. Elle permet d'amortir les variations de température intérieure. Dans cet exemple, la dalle de béton est soumise à des variations de température journalières. L'inertie peut être caractérisée en fonction de la période par le déphasage et l'amortissement.

Le tableau V suivant représente quelques résultats caractérisant cette dalle en donnant chaque fois le temps de déphasage et l'intervalle des fluctuations des températures selon l'épaisseur.

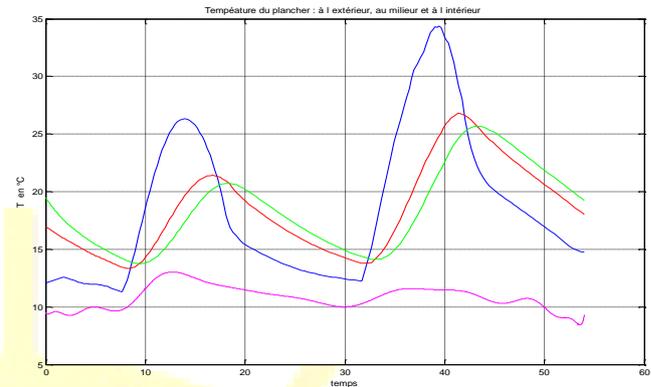


Fig.8 Température de la dalle de béton pour une épaisseur de 10 cm. Violet : température ambiante, vert : température de la face non exposée, rouge : température au milieu de la dalle, bleu : température de la face exposée. Ghardaïa le 25-26 décembre 2013.

TABLEAU V
TEMPS DE DÉPHASAGE ET L'INTERVALLE DES FLUCTUATIONS DES TEMPÉRATURES D'UNE DALLE SELON L'ÉPAISSEUR

Epaisseur (Cm)	Temps de Déphasage (heure)	Intervalle des fluctuations des températures intérieures (°C)
5	2,96	13,24
10	5,35	7,67
15	7,78	5,5
20	9,87	4,8
25	10,91	4,65
30	Nous notons que les valeurs des températures de la surface intérieure restent presque constantes après une épaisseur de 30 Cm	

VIII. CONCLUSIONS

Pour maintenir le confort thermique, il faut assurer par exemple une forte inertie thermique, ce qui correspond pour notre cas à une dalle de béton de 25 cm d'épaisseur. Intégrer une dalle de béton de cette épaisseur n'est pas pratique, donc il faut disposer d'une isolation thermique performante d'une dalle de béton de 4 ou 5 cm d'épaisseur en vue minimiser les apports solaires estivaux et favoriser les gains solaires hivernaux. Cette épaisseur n'est pas suffisante en terme de résistance thermique. Isolation des dalles est une étape incontournable pour réaliser un bâtiment basse consommation énergétique.

La durabilité de cette dalle est aussi importante afin de vérifier l'efficacité des procédures de coulage du béton dans les deux conditions.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



La méthode des plans d'expérience a été utilisée dans cette recherche. C'est une méthode statistique qui permet l'étude d'un grand nombre de paramètres, avec un nombre réduit d'essais. Pour cela on a construit un plan factoriel fractionnaire à huit essais et six facteurs, trois facteurs principaux et trois facteurs d'interaction, chaque facteur varie à deux niveaux max et min.

ρ : densité (kg m^{-3})
 F : facteur de forme entre les surfaces d'échanges
 σ : constante de Stephane-Boltzmann ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)
 V_{vent} : vitesse du vent (m s^{-1})
 con_{v} : coefficient du transfert de chaleur convectif ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

Les résultats de l'auscultation ultrasonique montrent que :

- le ciment CRS (facteur A), l'interaction et le sable (facteur B) et le produit de cure (facteur E) sont les facteurs les plus influents par ordre décroissant, avec des effets entre 3.6 et 6.6 mm/ μs .
- l'addition calcaire (facteur C) et l'anti-évaporation seul (facteur D) ont des effets moyens égale 0.2 mm/ μs , sauf le flinkote à un effet négligeable

Les résultats montrent que les facteurs les plus influents sur la résistance à la compression et à la traction par flexion sont le ciment CRS, l'addition calcaire, le sable, anti-évaporation et produit de cure.

NOMENCLATURE

S : surface (m^2)
 NW(i) : nombre total des surfaces intérieures (mur, porte et fenêtre) dans la zone i
 T : température (K)
 e : épaisseur (m)
 n : numéros du noeud
 α : coefficient d'absorption
 ε : émissivité thermique
 G : éclairage solaire incident (W m^{-2})
 λ : conductivité thermique ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$)
 c_p : chaleur spécifique ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

REFERENCES

- [1] OUALI SALIMA " Etude géothermique du sud de l'Algérie ", 2006.
- [2] Georges Dreux, Jean Festa " Nouveau guide du béton et de ses constituants " Éditions Eyrolles, 1995.
- [3] N. BAKIR, A. ISSAAD, M. BEDDAR " influence du climat chaud et de la cure sur les propriétés du mortier " 2009
- [4] K. Salhi, B. Mezghiche " Etude de durabilité de mortier et béton contenant de ciment avec ajouts de laitier granule et sable de dune " Octobre 12-14, 2009.
- [5] R. Chaid, R. Jauberthiet A. Boukhaled " Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons ", 23 Février 2010
- [6] Jacques Goupy " la méthode des plans d'expériences " Bordas Paris 1988.
- [7] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, M. R. Yaiche et N. Benamrane, Influence of the Compactness Index to Increase the Internal Temperature of a Building in Saharan Climate, Elsevier, Energy and Buildings vol.66 (2013) pp. 678–687.
- [8] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche, Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region, Construction and Building Materials 52 (2014) 59–70.
- [9] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M. K. Cherier, M. Hamdani, R. M Yaiche, R. Khanniche (2013), Influence of building orientation on internal temperature in Saharan climates, building located in Ghardaïa region (Algeria), International Scientific Journal, Thermal Science, 2013, Vol. 17, No. 2, pp. 349-364.
- [10] Monica Rossi , Valeria Marta Rocco "External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internalareal heat capacity" Energy and Buildings, 68 (2014) 732–740

TABLEAU VI

Plan fractionnaire de 8 essais pour l'étude de l'efficacité des 6 facteurs.

Essais	facteur A	facteur B	facteur C	facteur D	facteur E	facteur F	Réponse
	A	B	C	D=AxB	E=AxC	F=BxC	
	Ciment	sable	addition	anti-evap	P,cure	Flinkote	
1	-1	-1	-1	1	1	1	1
2	1	1	-1	1	-1	-1	2
3	1	-1	1	-1	1	-1	3
4	-1	1	1	-1	-1	1	4
5	1	-1	-1	-1	-1	1	5
6	-1	1	-1	-1	1	-1	6
7	-1	-1	1	1	-1	-1	7
8	1	1	1	1	1	1	8
Niveau -1	CPJ	Concassé	Sans	0	0	sans	Niveau -1
Niveau +1	CRS	Roulé	Avec	390g/m2	400g/m2	Avec	Niveau +1