

FORMULATION DU BETON CALCAIRE DU TURONNIEN DE LAGHOUAT

MAKHOLOUFI Zoubir¹, BOUHICHA Mohamed²

1. Maître assistant chargé de cours à l'université de Laghouat

2. Professeur à l'université de Laghouat

1. INTRODUCTION

Dans cette étude, nous présenterons les formulations du béton calcaire du Turonien confectionné à partir de mélange des granulats montrant trois classes granulaires et qui ont fait l'objet d'une série d'essais normalisés afin d'aboutir à une caractérisation, plus ou moins détaillée, qui permet d'apprécier la qualité de ces granulats au regard des normes en vigueur [1]. Il s'agit du sable calcaire concassé 0/5 et des gravillons 5/15 15/25 mm. On utilise, pour la préformulation du béton, la méthode de Dreux-Gorisse [2] et [3] qui fait recours à un procédé graphique, permettant de déterminer d'une façon approchée les proportions pondérales des différents composants d'un béton.

Les propriétés du béton durci ont été appréciées par la résistance à la compression et la résistance à la traction qui ont été mesurées sur des éprouvettes standardisées (cylindre \varnothing 16 x 32 cm). Les différents essais réalisés au laboratoire ont abouti à une série de résultats expérimentaux qui ont permis d'établir des courbes et un abaque dont l'utilisation paraît aisée.

2. RESULTATS DES ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Le ciment utilisé est un CPJ-CEMII/ A d'Aïn Toudja, sa composition chimique est donnée par le tableau 1

Tableau n°1 : Composition chimique du ciment

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Perte Au Feu
21,04	4,97	3,91	63,8	1,08	0,62	0,08	0,96	0,57

Sa masse volumique absolue est 3.00 g/cm³, sa surface spécifique est de 3678 cm²/g. La classe vraie du ciment utilisé est de 37 MPa. Les résultats des essais de caractérisation des matériaux utilisés sont résumés dans le tableau 2.

La courbe granulométrique du sable calcaire 0/5 est continue, normalement étalée et entièrement située dans le fuseau granulométrique d'un sable à béton ordinaire. Le pourcentage de la fraction fine (fillers) et Le module de finesse du sable devront, normalement, donner un meilleur compromis résistance-maniabilité-maintien de l'homogénéité du mélange.

Les gravillons calcaires concassés 5/15 et 15/25 mm sont blanchâtres, relativement compacts, propres peu poreux. Le coefficient de Los Angeles de 20%, la masse volumique absolue et la porosité des ces matériaux permettent de les classer parmi les calcaires durs. Ces granulats sont composés essentiellement de carbonate de calcium (97,5%).

Tableau 2 : Caractéristiques des sables et des gravillons calcaires concassés.

Essais	Symbole	Unité	Spécification NF P 18 541	Sable 0/5	Gravillons 5/15-15/25
Masses volumiques					
absolue	ρ_s	Kg/m ³		2700	2680
apparente	ρ	Kg/m ³		1530	1270
réelle	ρ_r	Kg/m ³		2610	2590
Absorption	Abs	%	5	2.5	1.42
Porosité	η	%		3.33	3.36

3. PROCEDE DE FORMULATION DU MELANGE

3.1. PRINCIPE DE LA METHODE DE DREUX-GORISSE

La méthode de Dreux-Gorisse, qui s'appuie sur les courbes granulaires de référence, des tableaux et abaques, semble être largement employée pour la formulation des bétons traditionnels à base de granulats conformes aux spécifications en vigueur.

Certaines propriétés morphologiques et pétrophysiques des granulats doivent d'abord être connues, on se fixe, ensuite, les propriétés moyennes du béton à formuler, en particulier sa consistance et sa résistance mécanique à la compression à 28 jours.

3.2. APPLICATION DE LA METHODE

On tient à vérifier les résultats, et à les réajuster pour obtenir réellement le volume unitaire du béton, ayant les propriétés qui se rapprochent de celles fixées au départ. Les propriétés moyennes choisies du béton sont fixées égales à celles d'un béton de consistance plastique, soit un affaissement au cône d'Abrams A = 6 cm et de résistance caractéristique à 28 jours $f_{c,28} = 25$ MPa. Les propriétés générales des granulats destinés à la fabrication du béton, sont énumérées comme suit :

Gravillons 5/15 et 15/25	Diamètre du plus gros grain: D = 25 mm ;
Gravillons 5/15 et 15/25	Coefficient granulaire G = 0,5 ;
Sable concassé 0/5	Module de finesse: MF = 2,7 ;
Ciment CPJ-CEMII/A	Classe vraie du ciment : $\sigma_c = 37$ MPa ;
Eau de gâchage	Eau potable .

3.2.1. DOSAGE EN CIMENT ET EAU

Dans sa formule, Bolomey a fait intervenir le rapport C/E qui permet d'exprimer la résistance en une fonction linéaire de C/E. Le dosage en ciment sera déduit de cette formule qui s'écrit [4]:

$$\bar{\sigma}_{28} = G \bar{\sigma}_c \left(\frac{C}{E_{ut}} - 0,5 \right) \quad (1)$$

Avec $\bar{\sigma}_{28}$ ou RC28 : résistance moyenne à la compression à 28 jours, estimée selon Dreux-Gorisse à $f_{C28} + 5\% f_{c28}$ soit 28,75 MPa. Après calcul on obtient un rapport C/E = 2. Il est d'usage d'adopter le facteur inverse E/C = 0,5 pour les bétons courants. En utilisant un abaque [2], pour un rapport C/E = 2 et un affaissement A = 6cm, on obtient le dosage en ciment C = 400 Kg/m³. Le dosage en eau utile (E_{ut}) du matériau sec est donc : E_{ut} = 200l.

3.2.2 DOSAGE EN GRANULATS :
- PROPORTIONS VOLUMETRIQUES DES GRANULATS

Selon Dreux-Gorisse, le rapport S/G = 0,71.

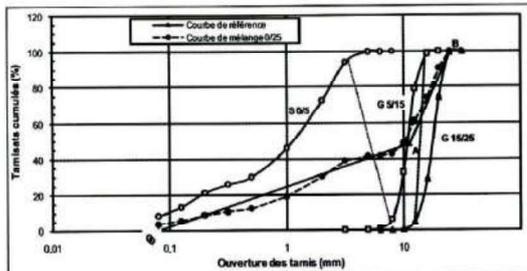


Figure 1 : Application de la méthode Dreux-Gorisse pour déterminer la composition du béton calcaire.

Ces proportions nous ont permis de calculer la composition granulairé réelle qui serait reportée sur la figure 1, elle correspondrait donc à la courbe réelle du mélange 0/25. La courbe de mélange 0/25 ne se superpose pas exactement à la courbe granulométrique de référence (CGR), mais elle s'en rapproche notablement.

- PROPORTIONS PONDERALES DES CONSTITUANTS DE BETON

Pour évaluer les masses des granulats permettant de réaliser un mètre cube de béton on doit déterminer le coefficient de compacité $\gamma_{D25} = 0,822$ [2]. Etant donné que le sable est concassé, il convient donc d'apporter une correction qui est de -0,03, le coefficient de compacité sera donc $\gamma_{D25} = 0,792$. Le volume total absolu des constituants solides:

$$V_T = V_C + V_S + V_{G1} + V_{G2} = 100 \gamma = 792 \text{ litres.}$$

Comme le volume de ciment introduit dans la formule est de : V_C = 133l. Le volume réel des granulats (V_G) est alors :

$$V_G = V_S + V_{G1} + V_{G2} = 658,671 \quad (2)$$

Ainsi pour 1m³ de béton frais, la préformulation par la méthode de Dreux-Gorisse a abouti aux quantités pondérales des matériaux secs suivants:

Ciment (C) :	400 Kg ;
Eau utile (E _{ut}) :	200 Kg ;
Sable 0/5 (S) :	736,26 Kg ;
Gravillon 5/15 (G ₁) :	398,94 Kg ;
Gravillon 15/25 (G ₂) :	635,48 Kg ;
Masse totale :	2371 Kg.

3.2.3 EFFET DE L'HYGROMETRIE DES GRANULATS

Dans ce cadre on définit les types d'eau suivants [5] :

- Eau absorbée (E_{abs}) ou retenue par les pores, appelée aussi eau interne.
- Eau apportée (E_{app}) : C'est la quantité d'eau apportée par les granulats.
- Eau superficielle ou eau restante (E_{rest}) : C'est l'eau retenue à la surface des grains.

$$E_{rest} = E_{app} - E_{abs} \quad (3)$$

Pour tenir compte de ce qui précède, on définit pour un mélange de béton :

- Eau efficace appelée aussi eau utile (E_{ut}) : Elle est la somme de l'eau de fabrication (E_{fab}) ajoutée au moment de gâchage et de l'eau restante. C'est cette eau qui assure la plasticité du béton et l'hydratation du ciment.

$$E_{ut} = E_{fab} + E_{rest} \quad (4)$$

- Eau totale (E_{tot}) : Quantité d'eau présente dans un mélange de béton frais.

$$E_{tot} = E_{ut} + E_{abs} = E_{fab} + E_{app} \quad (5)$$

La quantité d'eau apportée est : E_{app} = masse du matériau humide - masse du matériau sec

Sable E_S = 1,40 l, Gravillon G₁ = 0,32 l, Gravillon G₂ = 0,44 l.

$$E_{app} = E_S + E_{G1} + E_{G2} = 2,16 \text{ l}$$

La quantité d'eau de fabrication est donc : E_{fab} = E_{ut} - E_{app} + E_{abs}

$$E_{fab} = 231 \text{ l}$$

3.2.4 OPTIMISATION DU MELANGE :

Le principe de cette méthode consiste d'abord à réaliser plusieurs gâchées de même volume en gardant le rapport E_{ut}/C constant (méthode Dreux-Gorisse) et en faisant varier le rapport S/G [6]. Le mélange ainsi optimisé, correspond au mélange le mieux proportionné. Une augmentation légère du rapport E_{ut}/C = 0,52 dont l'affaissement au cône d'Abrams est égal à l'affaissement initialement prévu (Affaissement = 6 cm).

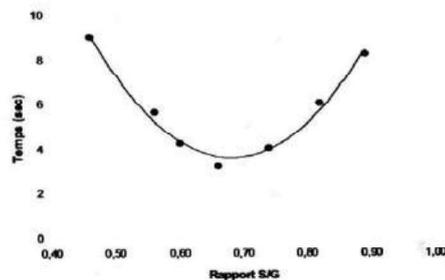


Figure 2 : Variation du temps d'écoulement en fonction du rapport S/G.

La figure 2 montre l'évolution du temps d'écoulement au maniabilimètre LCPC en fonction du rapport S/G en maintenant le rapport E_{ut}/C = 0,52 constant. L'optimum de la parabole de la figure 2 représentant le rapport optimal S/G situé à 0,68 qui est légèrement inférieur à celui trouvé par la méthode de Dreux-Gorisse (0,71).

3.2.5 VARIATION DU RAPPORT E_{ut}/C :

Trois dosages en ciment ont été choisis : 250, 350 et 450 kg/m³. Pour chacun des dosages considérés, plusieurs mélanges de béton ont été confectionnés, en faisant varier le rapport E_{ut}/C, afin d'obtenir des maniabilités courantes. Durant cette étape, le rapport S/G a été

bien entendu gardé constant (S/G=0,68). Les quantités corrigées des granulats sont les suivantes :

- Sable 0/5 : 704,41 Kg;
- Gravillon 5/15: 399,32Kg ;
- Gravillon 15/25:635,44 Kg.

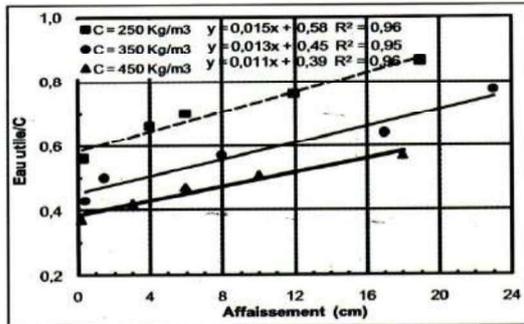


Figure 3: Evolution du rapport Eau/C en fonction de l'affaissement.

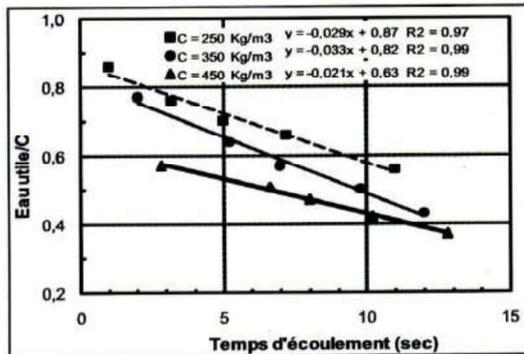


Figure 3: Evolution du rapport Eau/C en fonction du temps d'écoulement.

La figure 3 montre, pour un rapport S/G constant, que la maniabilité du béton frais dépend du dosage en eau utile, car elle croît avec l'augmentation du rapport $E_{u/C}$. Cet accroissement est d'autant plus important que le dosage en ciment est faible, comme indiqué par les pentes des droites de régression. D'autre part, pour le même affaissement, le rapport $E_{u/C}$ nécessaire diminue avec l'augmentation du dosage en ciment. Dans la figure 4, on observe une diminution du temps d'écoulement dans le maniabilimètre LCPC avec l'augmentation du rapport $E_{u/C}$ pour les trois dosages en ciment.

3.2.6 REAJUSTEMENT AU METRE CUBE REEL - COEFFICIENT DE CORRECTION

Le volume du béton pour chaque gâchée diffère, en général, légèrement du volume initialement estimé par la méthode Dreux-Gorisse. Les résultats ont été ajustés au mètre cube réel. Le coefficient de correction qui permet d'ajuster la formule de départ est donné par la relation suivante [7] :

Coefficient de correction = Masse volumique mesurée / Masse volumique théorique (6)

Les coefficients de correction pour chaque dosage en ciment sont donnés dans le tableau 3. La masse volumique mesurée, est dans la plupart des cas, supérieure à la masse volumique théorique, notamment pour les dosages faibles en ciment, ou pour les gâchées pauvres en eau, c'est à dire pour les bétons fermes.

Tableau 3 : Masse volumique du béton frais et coefficient de correction.

C Kg	$E_{u/C}$	MV mes Kg/m³	MV Thé Kg/m³	Coef.cor
250	0.56	2393	2129	1.124
	0.66	2371	2154	1.101
	0.70	2359	2164	1.090
	0.76	2342	2179	1.075
	0.86	2298	2204	1.043
350	0.43	2392	2240	1.068
	0.50	2368	2264	1.046
	0.57	2339	2289	1.022
	0.64	2315	2313	1.001
	0.77	2241	2359	0.950
450	0.37	2403	2356	1.020
	0.42	2407	2378	1.012
	0.47	2352	2401	0.980
	0.51	2320	2419	0.959
	0.57	2280	2446	0.932

Tableau 4 : Formules de départ rétablies au m³.

C (Kg)	Eut. (Kg)	Etot. (Kg)	Aft. (cm)	Cor.	C (Kg)	Eut. (Kg)	Etot. (Kg)	S sec (Kg)	G1 sec (Kg)	G2 sec (Kg)
250	140	173	0.3	1.124	281	157	194	790	448	714
	165	198	4	1.101	275	182	218	774	439	699
	175	208	6	1.090	273	191	227	766	435	692
	190	223	12	1.075	269	204	240	755	429	682
	215	248	19	1.043	261	224	259	733	416	662
350	151	184	0.4	1.068	374	161	197	751	426	678
	175	208	1.5	1.046	366	183	218	735	417	664
	200	233	8	1.022	358	204	238	718	408	649
	224	257	17	1.001	350	224	257	704	399	636
	270	303	23	0.950	333	257	288	668	379	603
450	167	200	0.2	1.020	459	170	204	717	407	648
	189	222	3	1.012	455	191	225	711	404	643
	212	245	6	0.980	441	208	240	689	391	622
	230	263	10	0.959	432	221	252	675	383	609
	257	290	18	0.932	420	240	270	656	372	592

Les masses corrigées du mélange obtenues en multipliant le coefficient de correction par les masses de départ sont regroupées dans le tableau 4. Les dosages en ciment ne sont plus égaux aux dosages initialement prévus, il convient donc d'effectuer un réajustement des constituants du mélange pour obtenir une formule

d'un mètre cube réel de béton, ayant la même quantité de ciment que celle fixée au départ.

La représentation de l'état courant d'un béton frais, nous a conduit à développer les lois expérimentales d'évolution des ingrédients du mélange en fonction de trois affaissements de référence

A = 3 cm: béton ferme, A = 9 cm: béton plastique, A = 15 cm: béton fluide.

Tableau 5 : Données pour modèle d'ajustement du béton calcaire.

A = 3 cm		A = 9 cm		A = 15 cm	
C	Eut/C	C	Eut/C	C	Eut/C
277	0,63	271	0,73	266	0,8
364	0,52	357	0,58	352	0,62
455	0,42	434	0,5	424	0,55

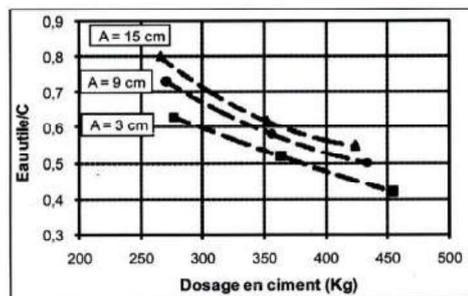


Figure 5 : Evolution du rapport E_{ut}/C en fonction du dosage en ciment, pour les affaissements de référence.

Le tableau 5 obtenu par interpolation, résume les données du modèle d'ajustement. L'évolution du rapport E_{ut}/C en fonction du ciment qui suit une loi hyperbolique de type E_{ut}/C = a/c + b est montrée dans la figure 5 pour les trois affaissements de référence choisis. Les équations des courbes de cette figure obtenus par régression sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 A = 3 \text{ cm} & \quad E_{ut}/C = 147/C + 0,105 & \quad R^2 = 0,99 \\
 A = 9 \text{ cm} & \quad E_{ut}/C = 166/C + 0,116 & \quad R^2 = 0,99 \\
 A = 15 \text{ cm} & \quad E_{ut}/C = 181/C + 0,117 & \quad R^2 = 0,99
 \end{aligned} \quad (7)$$

Une loi expérimentale d'ajustement du rapport E_{ut}/C en fonction du dosage en ciment C et de l'affaissement A, peut-être obtenue en faisant une régression linéaire sur les coefficients a et b des équations (7), cette loi est donnée par l'expression :

$$E_{ut}/C = (2,83.A + 139)/C + 0,001.A + 0,104 \quad (8)$$

Pour un dosage en ciment et un affaissement désirés, la loi expérimentale donnée précédemment permet d'obtenir le rapport E_{ut}/C nécessaire pour fabriquer 1m³ réel de béton.

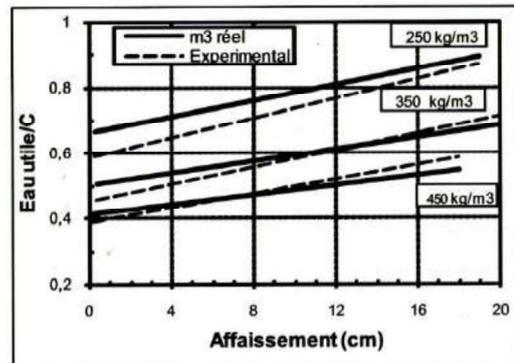


Figure 6 : Evolution du rapport E_{ut}/C en fonction de l'affaissement.

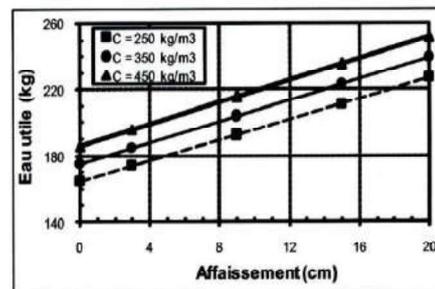


Figure 7 : Quantité d'eau utile à apporter aux bétons calcaires pour obtenir une maniabilité donnée.

A titre comparatif, la figure 6 montre l'évolution du rapport E_{ut}/C en fonction de l'affaissement donnée par la loi d'ajustement développée, ainsi que celle obtenue à partir des résultats expérimentaux non ajustés.

L'examen de la figure 6 permet de tirer les observations suivantes: Pour des dosages élevés en ciment, l'ajustement des formules entraîne une décroissance du rapport E_{ut}/C, notamment pour des affaissements plus au moins grands, ce qui conduit dans la plupart des cas à une réduction dans la quantité de ciment fixée au départ. D'autre part, dans les formules moyennement dosées en ciment, l'ajustement conduit à une augmentation du rapport E_{ut}/C pour la plage des bétons fermes et plastiques et à une diminution de ce rapport pour les bétons fluides.

- QUANTITES DE GRANULATS POUR REALISER UN METRE CUBE DE BETON

Le volume total réel d'ingrédients est :

$$V_T = \frac{S}{\rho_S} + \frac{G_1}{\rho_{G1}} + \frac{G_2}{\rho_{G2}} + \frac{C}{\rho_C} + \frac{E_{ut}}{\rho_E} \quad (9)$$

Avec ρ = masse volumique du granulat considéré.

Tableau 6 : Formules rétablies au m3 avec les dosages en ciment de départ.

C (Kg)	Eut/C	.Eut (Kg)	.Etot (Kg)	S.sec (Kg)	G1.sec (Kg)	G2.sec (Kg)	S+G+C g	VT (l)
250	0,66	166	202	791	452	726	837	1003
	0,71	177	213	779	445	716	832	1009
	0,73	183	219	773	441	710	827	1011
	0,81	202	237	753	430	692	810	1012
	0,89	224	257	731	417	671	785	1008
350	0,50	177	211	745	425	684	823	1000
	0,51	180	214	741	423	681	824	1004
	0,57	201	234	720	411	661	806	1007
	0,66	229	261	690	394	634	781	1010
	0,71	249	279	670	382	615	754	1003
450	0,41	186	219	700	400	643	819	1005
	0,43	196	228	690	394	634	824	1020
	0,46	205	237	680	388	625	804	1010
	0,49	219	249	666	380	612	787	1006
	0,54	245	274	639	365	587	758	1003

Le tableau 5 donne le volume total réel, qui dépasse légèrement le volume d'un mètre cube. Le volume total moyen pour tous les dosages est cependant VT = 1007 l. A partir de l'équation (8) on obtient :

$$V_G = 868 - 2,83.A - (0,001.A + 0,104).C - \frac{C}{\rho_c} \quad (10)$$

La masse des granulats à introduire sont alors : G = %G.VG.ρG

Avec G, %G et ρG sont respectivement les masses, pourcentages et masses volumiques réelles des granulats, Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 7. Les figures 8 permettent de calculer les quantités d'ingrédients nécessaires à la fabrication d'un mètre cube de béton en fonction de C et A.

Tableau 7 : Résultats de calcul des masses de granulats.

Ciment (kg)	Eut/C	.Aft (cm)	VG (l)	S (kg)	G1 (kg)	G2 (kg)
250	0,66	0	759	792	452	727
	0,7	3	749	782	447	718
	0,77	9	731	763	436	701
	0,84	15	712	744	425	683
	0,91	20	697	728	415	668
350	0,5	0	715	746	426	685
	0,53	3	705	736	420	676
	0,58	9	686	717	409	658
	0,64	15	667	697	398	640
	0,68	20	651	680	388	624
450	0,41	0	671	701	400	643
	0,43	3	661	690	394	634
	0,48	9	642	670	382	615
	0,52	15	622	649	371	596
	0,56	20	606	632	361	581

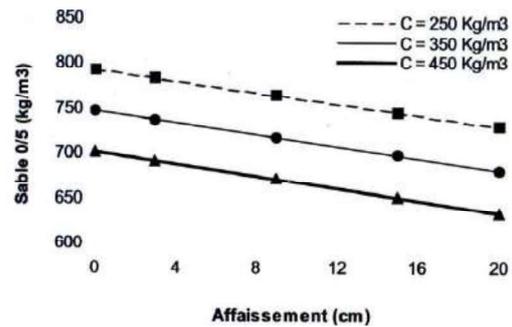


Figure 8a : Quantités de sable 0/5 mm à introduire dans le béton pour obtenir un affaissement donné.

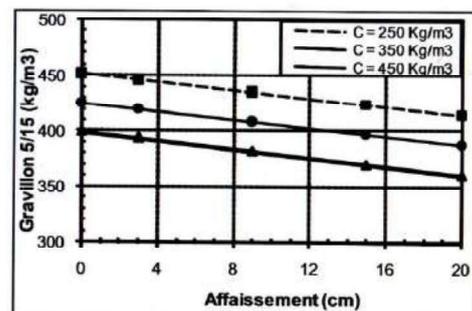


Figure 8b : Quantités de gravillons 5/15 mm à introduire dans le béton pour obtenir un affaissement donné.

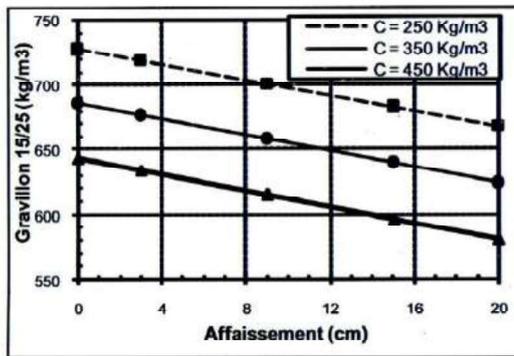


Figure 8c : Quantités de gravillons 15/25 mm à introduire dans le béton pour obtenir un affaissement donné.

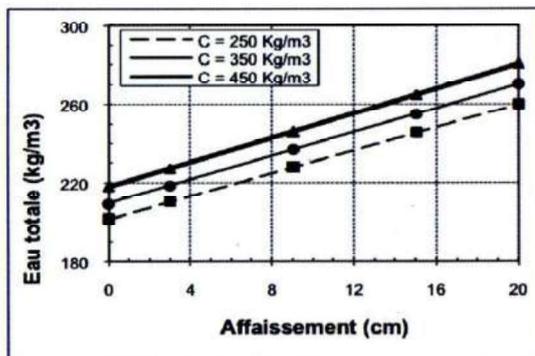


Figure 9 : Variation de l'eau totale en fonction de l'affaissement.

La quantité d'eau totale (E_{tot}) est donnée par la relation suivante :

$$E_{tot} = E_{ut} + S \cdot Abs_S + G_1 \cdot Abs_{G_1} + G_2 \cdot Abs_{G_2} \quad (11)$$

La figure 9 permet de déterminer la quantité d'eau totale nécessaire pour le mélange de béton.

4. COMPORTEMENT MECANIQUE

Le tableau 8 regroupe les résultats des essais de la résistance à la compression à 28 jours RC_{28} et la résistance à la traction à 28 jours Rt_{28} .

Tableau 8 : Performances mécaniques à 28 jours des bétons calcaires

Ciment (kg)	Eut/C	Aft (cm)	Rc_{28} (MPa)	Cv %	Rt_{28} (MPa)	Cv %
250	0,56	0,3	14,45	4,94	2,78	6,42
	0,66	4	13,27	4,63	2,51	5,21
	0,7	6	11,21	10,1	2,31	7,22
	0,76	12	10,49	11,12	2,19	1,8
	0,86	19	6,36	6,54	1,63	1,42
350	0,43	0,4	25,4	5,74	3,55	3,11
	0,5	1,5	19,27	3,48	3,26	6,14
	0,57	8	17,1	4,26	2,93	6,83
	0,64	17	16,3	4,11	2,5	5,31
450	0,77	23	7,68	4,97	1,71	10,04
	0,37	0,2	32,75	8,87	3,84	3,4
	0,42	3	27,1	10,57	3,43	8,24
	0,47	6	25,69	9,37	3,27	6,97
	0,51	10	21,06	4,45	3,01	2,04
	0,57	18	19,98	9,87	3	7,46

4.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION

La figure 10 montre la variation de la résistance à la compression RC_{28} en fonction du rapport Eut/C. Cette variation peut être assimilée à une forme linéaire dont l'équation est la suivante :

$$R_{C_{28}} = 16,69 \cdot \frac{C}{E_{ut}} - 12,24 \quad R^2 = 0,95 \quad (11)$$

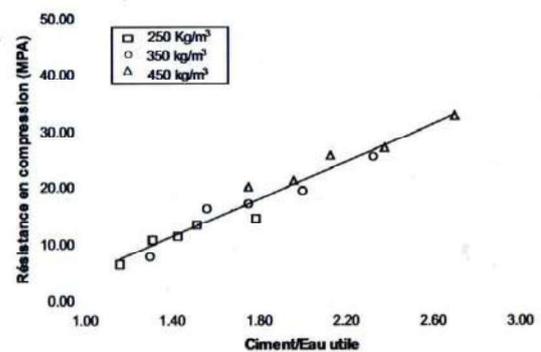


Figure 10 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport ciment/Eau utile.

L'application de l'équation (12) permet également de corriger les résistances, de manière à prendre en compte les dosages en ciment initialement prévus. Les résultats de cet ajustement qui consiste à introduire dans l'équation (12) le rapport Eut/C réajusté pour obtenir RC_{28} corrigées, sont regroupés dans le tableau 9.

Tableau 9: Valeurs des résistances à la compression corrigées selon la loi de régression.

Ciment (kg)	Eut/C	Eut/C _{cor}	Aft (cm)	Rc _{28 mes} (MPa)	Rc _{28 cor} (MPa)
250	0.56	0.66	0.3	14.45	12.91
	0.66	0.71	4	13.27	11.29
	0.70	0.73	6	11.21	10.50
	0.76	0.81	12	10.49	8.42
	0.86	0.89	19	6.36	6.43
350	0.43	0.50	0.4	25.40	20.82
	0.50	0.51	1.5	19.27	20.18
	0.57	0.57	8	17.10	16.85
	0.64	0.66	17	16.30	13.22
	0.77	0.71	23	7.68	11.26
450	0.37	0.41	0.2	32.75	28.04
	0.42	0.43	3	27.10	26.15
	0.47	0.46	6	25.69	24.31
	0.51	0.49	10	21.06	22.12
	0.57	0.54	18	19.98	18.44

Tableau 10 : Calcul du rapport Rt/Rc.

Ciment (kg)	Eut/C	Eut/C _{cor}	Rc _{28 cor} (MPa)	Rt _{28 cor} (MPa)	Rt/Rc
250	0.56	0.66	12.91	2.38	0.18
	0.66	0.71	11.29	2.24	0.20
	0.70	0.73	10.50	2.18	0.21
	0.76	0.81	8.42	2.00	0.24
	0.86	0.89	6.43	1.84	0.29
350	0.43	0.50	20.82	3.04	0.15
	0.50	0.51	20.18	2.99	0.15
	0.57	0.57	16.85	2.71	0.16
	0.64	0.66	13.22	2.41	0.18
	0.77	0.71	11.26	2.24	0.20
450	0.37	0.41	28.04	3.65	0.13
	0.42	0.43	26.15	3.49	0.13
	0.47	0.46	24.31	3.34	0.14
	0.51	0.49	22.12	3.15	0.14
	0.57	0.54	18.44	2.84	0.15

La figure 11 montre l'évolution de la résistance en fonction de l'affaissement. on remarque une diminution de la résistance à la compression RC28 avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E_u/C. Il convient de noter que les valeurs des résistances mesurées et corrigées sont proches les unes des autres pour les dosages en ciment considérés.

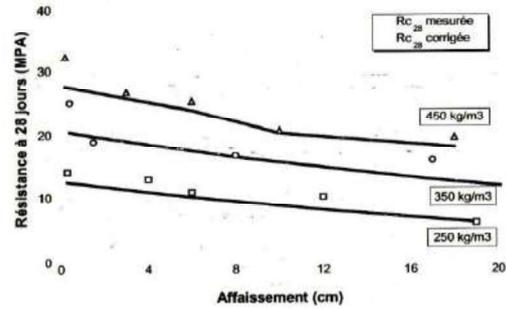


Figure 11 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'affaissement.

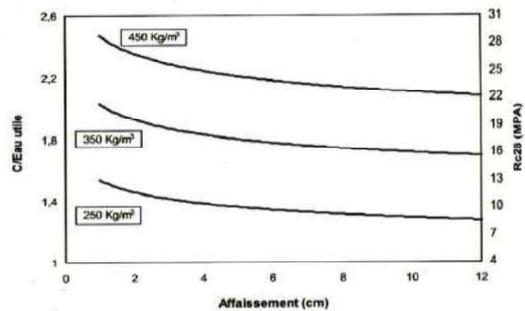


Figure 12 : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours et du rapport C/Eau utile en fonction de l'affaissement.

D'autre part pour un affaissement donné et une résistance escomptée, la formulation du BC semble conduire à des dosages en ciment comme montrée dans la figure 12.

4.2 RESISTANCE A LA TRACTION :

Les valeurs des résistances en traction par fendage évoluent de 1,63 à 3,84 MPa (figure 13) et suivent la droite d'équation :

$$R_{t28} = 1,40 \frac{C}{E_{ut}} + 0,27 \quad R^2 = 0,92 \quad (13)$$

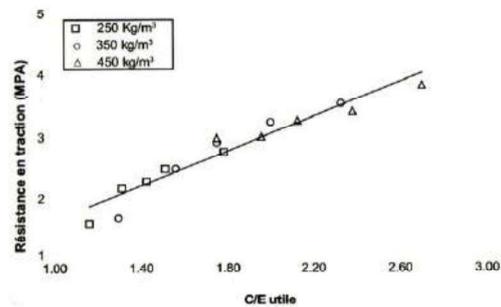
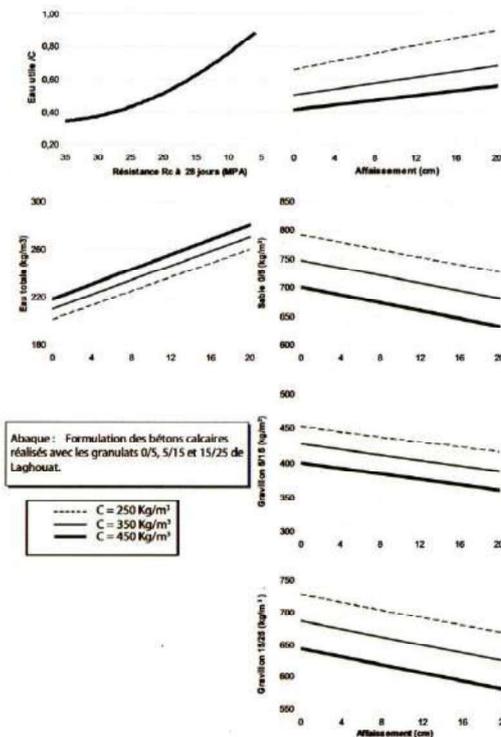


Figure 13 : Variation de la résistance à la traction en fonction du rapport C/Eau utile.

Les résistances à la traction croissent moins vite que les résistances à la compression. Les rapports R_t/R_c varient de 0,13 à 0,29 (tableau 10).

5. ABAQUE DE FORMULATION

Finalement, le modèle proposé précédemment a permis d'élaborer un abaque de formulation destiné à la production des bétons calcaires. Cet abaque prévoit les quantités d'ingrédients rentrant dans la fabrication d'un mètre cube de béton à granulats calcaires.



Exemple d'application

On veut confectionner 1m³ de béton dont les propriétés désirées sont les suivantes :

$R_{c28} = 20$ MPa;
 $A = 13$ cm.

A partir des courbes 1 et 2 le dosage nécessaire est :

C : 450 Kg;
 E_{tot} : 264 Kg;
 S : 656 Kg;
 G_1 : 375 Kg;
 G_2 : 603 Kg.

Supposons que pendant la fabrication du béton, les granulats sont humides et que la teneur en eau du sable est de 3%, et des gravillons est de 1%.

Les masses des granulats humides sont :

S_h : 676 Kg;
 G_{1h} : 379 Kg;
 G_{2h} : 609 Kg.

L'eau de fabrication

$$E_{fab} = E_{tot} - (S_{sec} \cdot \omega_s) - (G_{1sec} \cdot \omega_{G1}) - (G_{2sec} \cdot \omega_{G2}) = 235 \text{ l.}$$

Les quantités de matériaux à gâcher pour fabriquer 1m³ du béton sont :

C : 450 Kg;
 E_{fab} : 235 Kg;
 S_h : 676 Kg;
 G_1 : 379 Kg;
 G_2 : 609 Kg.

6. CONCLUSIONS

Cette contribution à la formulation d'un béton confectionné à partir du sable et des graviers calcaires a permis de tirer les conclusions suivantes:

- Les caractéristiques physiques, géométriques, morphologiques et mécaniques des granulats calcaires concassés du Turonien de Laghouat sont satisfaisantes pour la fabrication des bétons hydrauliques, puisqu'ils répondent aux exigences des critères de conformité requises pour les granulats constituant les bétons courants.
- Les bétons fabriqués par ces granulats, ont un comportement mécanique qui se rapproche de celui des bétons courants, puisque pour des maniabilités plastiques du béton frais, et après 28 jours de conservation dans un environnement ambiant, la résistance à la compression peut atteindre 25 MPa.
- Possibilité d'élaborer une loi simple qui permet d'ajuster le mètre cube du mélange réalisé au volume unitaire (1m³ réel) et de proposer des graphiques de formulation pour les bétons calcaires, qui rend possible la quantification des ingrédients pour fabriquer 1m³ de béton, dont la maniabilité s'étend depuis l'état ferme jusqu'à l'état fluide.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Association Française de normalisation AFNOR.
- [2] DREUX G. et GORISSE F. « Composition des bétons : Dreux-Gorisse ». Annales de l'ITBTP, n° 414, série béton 214, pp 86-105, (Mai 1983).
- [3] DREUX G. et FESTA J. « Nouveau guide du béton ». Septième édition Edition Eyrolles, 1995.
- [4] BOLOMEY «Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), n°20 (juillet-août 1966).
- [5] DUPAIN R., LANCHON R. SAINT et ARROMAN J.C. « Granulats, sols, ciments et bétons, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », Edditions CASTEILLA, Paris (1995).
- [6] BARON J. et LESAGE R. « La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier », Rapport de recherche LCPC, n°64, Paris (déc.1976).
- [7] LECOMTE A., MASSON L. et REMILLON A. « Formulation des bétons courants avec des granulats calcaires LORRAINS 0/6 et 6/20 Annales de l'Institut du Bâtiment et de Travaux Publics (ITBTP), N° : 539, série béton 326, pp 1-24 (décembre 1995).