

## NOUVELLE APPROCHE DE FORMULATION DES BETONS HYDRAULIQUES

**Mongi BEN OUEZDOU** Maître de Conférences, Laboratoire de Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis

**Lotfi BRAHAM** Ingénieur en Chef, Directeur Régional de l'Equipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire de Tunis.

**Taoufik ACHOUR** Ingénieur en Chef, Chef de service des travaux neufs à la Direction Régionale de l'Equipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire de Tunis - Membre du Laboratoire de Génie Civil à l' Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis

**RESUME :** Cet article présente d'une façon conviviale l'application du modèle d'empilement granulaire à la structure granulaire du béton hydraulique. Ce dernier permet de formuler un béton sur la base de la recherche de la compacité maximale du squelette solide, ce qui suppose la recherche de la teneur en eau minimale.

Après rappel des enjeux actuels de la formulation des bétons et une présentation sommaire du logiciel René-LCPC, outil de mise en œuvre du Modèle d'Empilement Compressible, l'article met en application ce logiciel pour formuler un béton hydraulique à partir de ses constituants granulaires. L'application a été faite sur des granulats tunisiens.

On termine en comparant les résultats de formulation de béton donnés par ce modèle et celui du modèle Dreux-Gorisse (celui appliqué en Tunisie par les formulateurs du béton), pour en conclure sur la perfection de ce modèle d'empilement compressible.

### NEW APPROACH OF HYDRAULIC CONCRETE MIXTURE-PROPORTIONING

**ABSTRACT :** This paper presents in a convivial way the application of the granular stacking Model to the granular structures of the hydraulic concrete. This last permits to formulate a concrete on the basis of the research of the maximal compactness of the strong skeleton, which supposes the research of the minimal water content.

After a remind of the present stakes of the concrete mixture-proportioning and a summary presentation of the René-LCPC program, tool of the setting work of the Compressible stacking Model, the paper puts in application this program to formulate an hydraulic concrete from (this granular constituent). The application has been made on Tunisian granulats.

We finish by comparing the results of concrete formulation given by this model and the Dreux-Gorisse model (the one applied in Tunisia by the concrete formulators), to conclude on the perfection of this compressible stacking model.

### صياغة جديدة لتركيب الخرسانة المائية

**ملخص :** يدعو هذا المقال بطريقة علمية ثابتة إلى تطبيق أنموذج تكديس الحبيبات على الخرسانة المائية ؛ هذا الأنموذج يمكن من صياغة مكونات الخرسانة اعتمادا على البحث على أكثر كثافة ممكنة داخل هذا الهيكل، مما يدعو إلى التفتيش عن أقل مقدار للماء داخل هذا الأخير.

بعد التذكير بالطرق المتبعة حاليا لتكوين الخرسانة وتقديم ملخص عاجل عن أنظومة « René-LCPC » التي تمثل أداة لإستعمال وتنفيذ أنموذج تكديس الحبيبات القابل للضغط ؛

يقع خلال هذا المقال تطبيق محتوى هذا الأنموذج على الخرسانة المائية باعتماد تلك المنظومة المقدمه، مع الإشارة إلى أن هذا التطبيق تم على مكونات تونسية.

في الأخير، نختم بمقارنة النتائج المتحصلة من هذا الأنموذج والأنموذج « Dreux-Gorisse » (المتبع حاليا من طرف مركبي الخرسانة بتونس)، لنستنتج مدى إتقان وكمالية هذا الأنموذج الحديث.

## **1 INTRODUCTION**

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué dans les années récentes. Tout d'abord de nouveaux constituants (adjuvants et additions minérales) sont venus s'ajouter à la composition classique des bétons hydrauliques. Ensuite les études ont intéressé un nombre croissant de propriétés d'usage de matériaux en relation avec la totalité de son cycle de vie. Enfin le nombre de propriétés et d'exigences souhaitées sur le produit final s'est augmenté et ce grâce au développement des moyens industriels. [1]

Le but ainsi construit est de trouver généralement une combinaison de constituants qui, après mélange, donneront un béton dont les propriétés seront conformes aux spécifications. C'est la base de ce qui est parfois appelé « une approche performantielle » ; cette approche de préférence doit coïncider avec un mélange optimisé de constituants qui non seulement respecte les spécifications des cahiers de charge (généralement sévère pour le contexte du béton hydraulique tunisien), mais qui présente aussi le coût le plus bas (incluant le prix des matériaux et les frais de production).

Dans ce contexte, rappelons qu'en Tunisie les formulateurs de béton utilisent encore la méthode de Dreux-Gorisse (méthode très ancienne de type graphique).

Le présent article présente aux ingénieurs une initiative à l'utilisation du logiciel « René –LCPC » pour la formulation des bétons.

A signaler que les propriétés de maniabilité à court terme, de résistance à la compression à moyen terme et de durabilité à long terme; sont les plus communément étudiées pour la formulation des bétons hydrauliques.

## **2 FORMULATION DES BETONS HYDRAULIQUES**

### **2-1 INTRODUCTION**

Il est clair que formuler un béton est avant tout un problème de compacité. Toutes les méthodes existantes reconnaissent implicitement ce principe en suggérant, pour certaines, de mesurer les compacités des constituants ou, pour d'autres, de s'approcher d'une « courbe granulaire idéale » supposée donner la compacité maximale avec les matériaux utilisés.

A vrai dire, pour cette dernière approche, chaque auteur propose différentes courbes (ou familles de courbes), ce qui soulève des réserves quant à la pertinence du concept lui-même.[2]

## 2-2 OBJECTIF

Toute étude de formulation doit être précédée d'une réflexion sur le contexte dans laquelle elle s'inscrit et ce afin de répondre aux questions émanant soit :

- de l'Administration, du maître d'œuvre, du client privé ou de l'architecte qui sont donc imposés à l'entreprise, mais qui peuvent aussi, pour certaines d'entre elles, au départ, être adaptées par un dialogue constructif entre l'entreprise et son client ;
- du chantier ou des services opérationnels de l'entreprise qui peuvent être évolutifs, donc modifiables mais toujours imposées au spécialiste « béton ». [1]

Face à ces réalités et ces exigences, provenant toutes d'un progrès normal de la technologie, le formulateur du béton. est soumis à une pression croissante en terme de délais et de coûts. [3]

## 2-3 CONCEPT

La formulation d'un béton comporte deux volets :

- le choix des constituants et la détermination de leurs proportions selon la formulation choisie
- puis elle se pratique en trois temps :
  - Choix et caractérisation des constituants suivis d'un calcul approché des proportions « un calcul de coin de table »
  - Optimisation expérimentale suivie de l'épreuve d'étude de la formule retenue
  - Et puis preuve de convenance qui a pour but de vérifier qu'avec les moyens du chantier, il est effectivement possible de réaliser le béton proposé.

## 2-4 METHODES DE FORMULATION DES BETONS HYDRAULIQUES

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, et ce afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause.

Les méthodes proposées sont nombreuses et aboutissent à des dosages « volumétriques » ou de préférence « pondéraux » ; le passage de l'un à l'autre peut se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

Ces méthodes sont :

- soit de type semi-empiriques (les plus connues sont celles de Faury, Bolomey, Vallette)
- soit de type graphiques (les plus récentes sont celles de Dreux-Gorisse « celle appliquée en Tunisie » et Joisel). [3]
- soit de type numérique (l'utilisation des logiciels performants : Bétonlab, Dreux- Gorisse pour la France et la méthode de l'Américan Concrete Institute (ACI 211) pour l'Amérique et l'Amérique du Nord). [1]

## **2-5 INCONVENIENTS DE CES MODELES DE FORMULATIONS**

Malgré la diversité en quantité et en qualité de ces modèles, aucun de ces derniers ne repose sur un corpus scientifique à la fois solide et explicite.

Or, étant donné le progrès de l'informatique, l'utilisation pratique de modèles numériques ne présente plus aujourd'hui de difficultés.

Le cœur du problème ne réside plus dans l'assemblage des modèles permettant de formuler un béton, mais bien, plutôt, dans la construction même de ces modèles, illustrant le plus fidèlement possible les relations existant entre la composition d'un mélange et les propriétés d'usage (réponse souhaitée).

## **2-6 MODELE D'EMPILEMENT GRANULAIRE**

L'approche scientifique renouvelée de la formulation des bétons et matériaux à base de ciment s'intitulant « Modèle d'Empilement Compressible », désigné dans la suite en abréviation par « MEC », est basée sur l'analyse de la structure granulaire du matériau. Cette dernière a pour objet de prédire la compacité d'un mélange granulaire à partir de renseignements sur les constituants, sur leur répartition en taille et sur l'énergie de serrage (mode de compactage proposé).

Le modèle théorique ainsi proposé s'applique à l'ensemble des matériaux granulaires frottants et devrait donc intéresser un public

beaucoup plus large que celui des formulateurs et utilisateurs du matériau béton.

### ***2-6-1 Introduction du modèle***

Le modèle d'empilement granulaire appelé aussi « Modèle de Suspension Solide développé au LCPC » permet de calculer la compacité d'un mélange granulaire quelconque, et la viscosité de toute suspension à concentration donnée de ce mélange, à partir de grandeurs aisément accessibles à l'expérience.

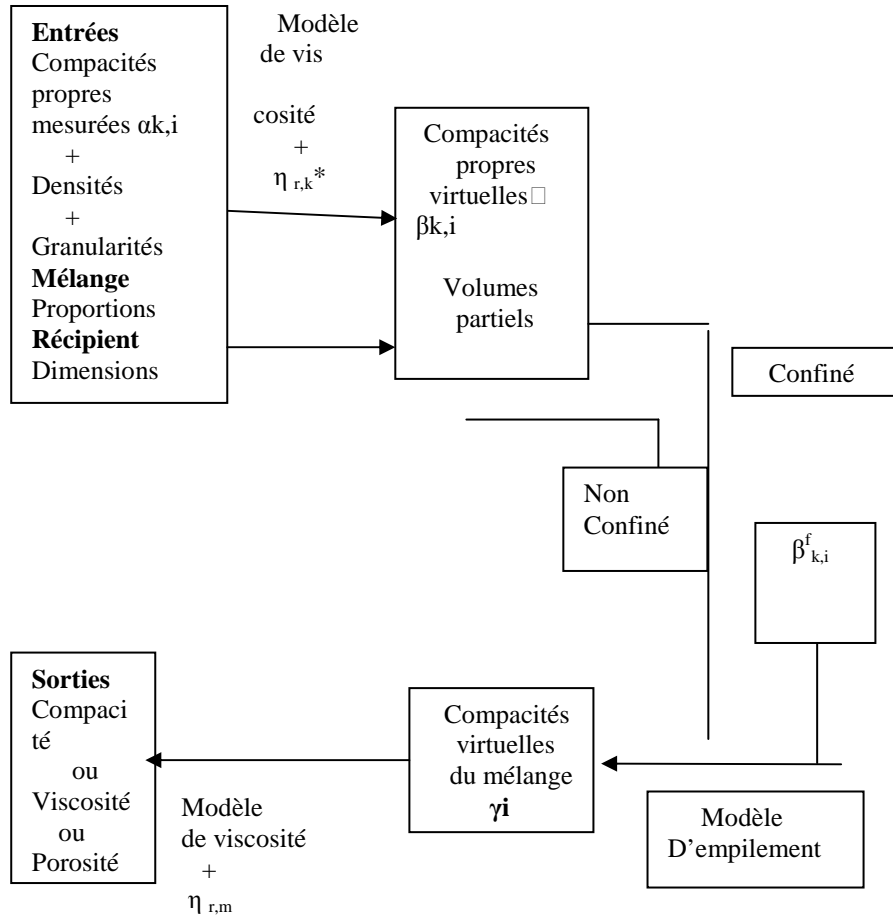
Ce modèle est issu du mariage du modèle linéaire de compacité développé au LCPC depuis plusieurs années et d'un modèle de viscosité de suspension développé par Mooney. [4]

### ***2-6-2 Présentation et utilisation du logiciel René-LCPC***

#### **2-6-2-1 Description du logiciel (logiciel d'optimisation granulaire)**

Le logiciel René-LCPC a été développé sous Windows™ sur la base du modèle de suspension solide et permet d'effectuer de façon rapide et conviviale des optimisations granulaires.

Son schéma de fonctionnement est résumé sur la figure 1. [4]



Avec  $\eta_{r,k}^*$  : viscosité relative de référence du mélange de k constituants

$\eta_{r,m}$  : viscosité relative du mélange de m constituants

$\beta_{k,i}^f$  : compacité propre de la classe des grains de taille  $d_i$  dans un volume fini de k constituants

Fig.1 : Schéma de fonctionnement de René-LCPC

### 2-6-2-2 Fonction du logiciel

René-LCPC met en oeuvre le Modèle d'Empilement Compressible. A partir d'un jeu de constituants caractérisés par leur distribution granulaire et par les compacités des tranches monodimensionnelles, le logiciel prédit la compacité de toute combinaison des constituants définie par l'utilisateur. L'énergie de mise en place de l'empilement granulaire est décrite par l'indice de serrage.

Si l'utilisateur introduit la valeur de l'indice de serrage, le logiciel calcule la compacité. Inversement, si la compacité est connue, c'est l'indice de serrage qui sera prédit. Par simulations successives, les combinaisons des fractions granulaires donnant la compacité maximale, ou l'indice de serrage minimal, peuvent être recherchées.

Les granularités optimales sont ainsi déterminées, pour le jeu de matériau considéré et pour l'application visée. [5]

### 2-6-2-3 Particularités

Le logiciel s'applique à tout matériau granulaire pour lequel les forces de surface entre particules sont petites devant celles provoquées par les actions de malaxage et de mise en place. Il n'y a pas de limitation sur l'étendue granulaire, qui peut atteindre 4 ou 5 puissances de 10.

Dans le passé, il a été appliqué avec succès aux bétons hydrauliques, aux mortiers, aux coulis d'injection et à d'autres matériaux hors du champ du génie civil.

Actuellement il fait l'objet d'une recherche visant à l'utiliser dans la formulation des matériaux d'assises routières traités aux liants hydrauliques et des enrobés bitumineux.

Le logiciel contient une **base de données** " Matériaux ", dont le contenu est facilement exportable sous forme de fichiers texte, ou vers le tableur Excel. Par ailleurs, il peut tenir compte de la forme de la structure à construire (coffrage, armature etc.) dans le calcul de l'indice de serrage, permettant ainsi une optimisation granulaire adaptée au cas industriel envisagé. [5]

#### **2-6-2-4 Aspects informatiques**

René-LCPC fonctionne sur micro-ordinateur de type PC ; il est exécutable sous Windows 3.1 et versions ultérieures.

Il est téléchargeable par Internet (site : [www.logiciel René-LCPC.fr](http://www.logiciel.René-LCPC.fr)) sous forme d'un fichier .zip de 606 Ko.

Une fois installé, il occupe un répertoire d'1,2 Mo environ, il est assorti d'une notice d'utilisation, sous forme d'un fichier Word. Le logiciel René-LCPC n'est pas protégé, et peut être librement copié. [5]

#### **2-6-2-5 Validation du modèle pour les empilements granulaires**

Le modèle a fait l'objet d'une validation dans le domaine du calcul de la compacité des mélanges granulaires secs. Celle-ci a été effectuée sur de nombreux échantillons et l'erreur fournie par le modèle par rapport à l'expérience est en général inférieure à 1% en valeur absolue.

Le logiciel peut donc, d'ores et déjà, être utilisé efficacement pour des calculs d'empilements.

Il reste par contre à vérifier sa pertinence pour le calcul de suspensions concentrées, plus particulièrement dans le cas des bétons hydrauliques. [4]

### **3 APPLICATION DU MODELE D'EMPILEMENT GRANULAIRE AU BETON TUNISIEN**

Le présent article décrit dans les grandes lignes en première étape la démarche de formulation des bétons hydrauliques à l'aide du logiciel René-LCPC pour des granulats concassés et provenant de 2 carrières tunisiennes, puis en deuxième étape donne les résultats de formulation de ces même granulats en utilisant le modèle graphique Dreux-Gorrisse (celui utilisé dans nos laboratoires), pour en conclure sur la perfection du modèle « MEC ».

#### **3-1 EXPERIMENTATION**

##### **3-1-1 Matériaux**

Deux granulats de différents sources ont été étudiés provenant de :

- Jbel Ressay
- Et de El Haoureb

Chaque carrière a fourni un sable 0/4, un gravillon 4/12 et un gravier 12/20 suivant des granulométries variables.

Pour les formulations étudiées, on a opté à des mélanges des fractions issues de la même carrière et ceci pour des considérations économiques.

Un troisième mélange à été étudié en utilisant le sable siliceux roulé d'El Khlédia et le gravillon et le gravier de Jbel Ressas.

Le ciment utilisé est celui de « le Kharrouba » CEM. II / A.L 32.5 dont la contenance klinker Portland est de 80%.

### **3-1-2 Détermination des grandeurs physiques nécessaires au fonctionnement du logiciel René –LCPC**

#### **3-1-2-1 Masse Volumique Réelle**

Les densités sont déterminées selon les normes AFNOR P18-555, respectivement pour les gravillons et les sables, et selon la norme ASTM C188 pour les poudres (ciment, fines).

Les résultats sont donnés dans le tableau 1.

#### **3-1-2-2 Compacités propres**

La mesure des compacités est effectuée suivant des protocoles dépendant de la nature des produits.

La compacité des gravillons (respectivement des sables dont la dimension des grains est  $>80\mu\text{m}$ ) est mesurée sur un échantillon de 7.5kg (respectivement 3kg), son expression est donnée par :

$$C = 7,5 / (d * V) \text{ (respectivement } C = 3 / (d * V) \text{)} ;$$

où  $d$  est la masse volumique en  $\text{kg/m}^3$  et  $V$  le volume total final en  $\text{m}^3$ .

Alors que la compacité de la poudre (ciment et sables dont la dimension des grains est  $< 80\mu\text{m}$ ) est en fait une mesure de demande en eau ; son expression est donnée par :

$$C = \frac{1000}{1000 + d * \frac{P_e}{P_p}}$$

Avec  $P_p$  : masse de la poudre.

$P_e$  : masse d'eau juste nécessaire pour faire passer le mélange d'un état de terre humide à un état de pâte homogène est considérée

comme la quantité remplissant la porosité de l'empilement des grains de la poudre.

$d$  : masse volumique de la poudre en  $\text{kg/m}^3$ .

Le tableau 1 résume les résultats des essais.

On désigne ci-après par:

- sable a : la fraction du sable dont la dimension des grains est inférieur à  $80 \mu\text{m}$
- sable b : la fraction du sable dont la dimension des grains est inférieur à  $80 \mu\text{m}$ .

Carrières	Fractions	compacité	MVR ( $\text{Kg/m}^3$ )
EL Haoureb	fines	0.614	2760
	0/4	0.652	2760
	5/12	0.611	2746
	12/20	0.574	2780
Jbel Ressas	fines	0.616	2670
	0/4	0.673	2670
	5/12	0.624	2660
	12/20	0.593	2680
El Khlédia	fines	0.554	2580
	0/4	0.689	2580
Ciment		0.575	3110

Tableau 1 : Compacité et MVR des fractions granulaires

Pour ne pas alourdir la compréhension de cet article et pour une commodité de présentation, nous tenons à exposer un seul exemple de sorties du logiciel René-LCPC pour le calcul de la compacité. Le tableau 2 concerne la mesure de compacité du **sable a** de Jbel Ressas.

Masse vol.: 2670 kg/m<sup>3</sup>

Compacité expérimentale de l'échantillon= 0.616

Cette mesure a été effectuée en milieu infini

Compacité calculée de l'échantillon= 0.616

Avec pour indice de compaction 6.7

Compacités propres de la forme:  $0.0 \cdot \ln(d) + 0.4489$  pour  $d < 1 \mu\text{m}$ , sinon 0.4489

Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	Passant cumulé (%)	Diamètre moyen ( $\mu\text{m}$ )	Compacité
1.6	0	1.789	0.4489
2	3.8	2.236	0.4489
2.5	5.8	2.806	0.4489
3.15	7.8	3.55	0.4489
4	11.2	4.472	0.4489
5	16	5.612	0.4489
6.3	20	7.099	0.4489
8	27	8.944	0.4489
10	32	11.18	0.4489
12.5	36.6	14.142	0.4489
16	44	17.889	0.4489
20	49	22.361	0.4489
25	54	28.062	0.4489
31.5	61	35.496	0.4489
40	68	44.721	0.4489
50	76.8	56.125	0.4489
63	84	70.993	0.4489
80	100		

**Tableau 2 : Exemple de sortie de résultat du logiciel René-LCPC**

### 3-1-2-3 Granularités :

La granularité des gravillons, des graviers et des sables est obtenue par simple tamisage.

Celle du ciment est déterminée à l'aide d'un granulomètre laser alors que celles des fines des sables sont déterminées à l'aide de la sédimentométrie.

Les tableaux 3 et 3bis résument les résultats de ces essais pour les carrières de Jbel Rerras, El Haoureb et El Khlédia .

*El Khlédia*

d( $\mu\text{m}$ )	%P
1.46	0.61
3.52	6.917
4.96	8.952
6.04	11.393
6.94	13.021
8.38	19.938
11.8	21.972
16.46	28.076
22.66	39.469
35.71	48.421
49.25	58.593
68.56	64.697
80	100

*El Haoureb*

d( $\mu\text{m}$ )	%P
3.34	6.64
4.68	10.55
5.72	11.33
6.54	15.24
8	16.02
11.18	21.1
15.59	26.97
21.43	38.69
34.17	42.6
47.38	50.42
65.65	58.23
80	100

*Jbel Ressay*

d( $\mu\text{m}$ )	%P
1.47	0.88
3.42	8.98
5	16
6	20
8.4	28
11.7	36
16.2	44
22.5	52
35.7	64
48.9	76
67.8	84
80	100

d Tamis (mm)	d Tamis ( $\mu$ )	El Haoureb			Jbel Rerras			El Khédia
		0/5	5/12	12/20	0/5	5/12	12/20	0/4
0.08	80	13.2			11			12
0.1	100	16			11.6			16.3
0.125	125	17.2			12.2			21.5
0.16	160	19.3			13			29
0.2	200	21			14			37.1
0.25	250	23			15.2			49.5
0.315	315	25.6			16.82			60.8
0.4	400	28.2			19			71.5
0.5	500	31.8			22			82.3
0.63	630	35.4			25.64			88.6
0.8	800	40.3			30			92
1	1000	45.2			35			95.2
1.25	1250	51			40.46			97
1.6	1600	59.2			49	0		97.8
2	2000	68.4			57.5	0.4		98.5
2.5	2500	77.7			66.37	1.2		98.8
3.15	3150	86.8	0		76	2.1		99.1
4	4000	93.6	1		87	3		99.5
5	5000	97.1	5.8		96.37	6	0	99.6
6.3	6300	99	28.8		100	18.4	0.38	99.8
8	8000	100	60.7	0		52	0.4	100
10	10000		87.3	3		81.5	0.6	
12.5	12500		98	27.4		96.6	3.5	
16	16000		100	86.3		100	41	
20	20000			98			93.9	
25	25000			100			100	

Tableau 3 bis : Granularité des sables b, gravillons et graviers  
(Jbel Rerras, El Haoureb, El khlédia)

### 3-1-2-4 Formulation à l'aide du logiciel René-LCPC :

En utilisant le logiciel René-LCPC pour chaque type de granulats et chaque diamètre D, les propositions des mélanges ont été optimisées pour contenir le minimum de pâte de ciment.

Les propositions des mélanges sont les suivantes :

Pour chaque mélange, la formulation a été faite au début avec un pas de 1 pour la pâte de ciment, objet des tableaux 4a -5a et 6a, puis faite par optimisation sur l'intervalle où la ligne de porosité minimale est médiane, objet des tableaux 4b -5b et 6b. Nous représentons enfin les dosages des constituants de la formulation retenue dans un m<sup>3</sup> de béton, objet des tableaux 4c -5c et 6c.

A titre d'exemple et pour les mélanges des constituants d'*El Haoureb*, on passe de la porosité 0.1767 pour le tableau 4a à une porosité de 0.1765 pour le tableau 4b en optimisant le pas de pâte de ciment à 0.2 ; pour en conclure sur les dosages du mélange de ces constituants (Tableau 4c).

ciment :	El Haoureb	El Haoureb	El Haoureb	El Haoureb				
\ciment3 2.5	\sable a	\sable b	\gravillon n5/12	\gravillon n12/20				
Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Porosité	Indice de comp.	Masse vol. à sec	Masse vol. saturé
n°0	n°1	n°2	n°3	n°4				
%	%	%	%	%				
20	15	35	20	10	0.2081	9	2235.2	2443.3
19	13.5	33.5	19	15	0.1999	9	2256.7	2456.6
18	12	32	18	20	0.1922	9	2276.9	2469.1
17	10.5	30.5	17	25	0.1852	9	2294.9	2480.1
16	9	29	16	30	0.1797	9	2308.7	2488.4
15	7.5	27.5	15	35	0.1767	9	2315.5	2492.2
14	6	26	14	40	0.178	9	2310.2	2488.2
13	4.5	24.5	13	45	0.1854	9	2287.6	2473
12	3	23	12	50	0.2	9	2245	2445
11	1.5	21.5	11	55	0.2204	9	2186.1	2406.5
10	0	20	10	60	0.2443	9	2117.6	2361.9

Tableau 4 a : Pas de 1 pour la pâte de ciment

ciment :	El Haoureb	El Haoureb	El Haoureb	El Haoureb				
\ciment32.5	\sable a	\sable b	\gravillon5/12	\gravillon12/20				
Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Porosité	Indice de comp.	Masse vol. à sec	Masse vol. saturé
n°0	n°1	n°2	n°3	n°4				
%	%	%	%	%				
16	9	29	16	30	0.1797	9	2308.7	2488.4
15.8	8.7	28.7	15.8	31	0.1788	9	2310.8	2489.6
15.6	8.4	28.4	15.6	32	0.1781	9	2312.5	2490.6
15.4	8.1	28.1	15.4	33	0.1775	9	2313.9	2491.4
15.2	7.8	27.8	15.2	34	0.177	9	2314.9	2491.9
15	7.5	27.5	15	35	0.1767	9	2315.5	2492.2
14.8	7.2	27.2	14.8	36	0.1765	9	2315.6	2492.1
14.6	6.9	26.9	14.6	37	0.1766	9	2315.1	2491.7
14.4	6.6	26.6	14.4	38	0.1768	9	2314.1	2490.9
14.2	6.3	26.3	14.2	39	0.1773	9	2312.5	2489.8
14	6	26	14	40	0.178	9	2310.2	2488.2

Tableau 4 b : optimisation du pas de pâte de ciment

ciment :	El Haoureb	El Haoureb	El Haoureb	El Haoureb	Eau
\ciment32.5	\sable a	\sable b	\gravillon5/12	\gravillon12/20	
342.71	166.72	629.84	342.71	833.62	176.50

Tableau 4 c : Dosage des constituants en Kg par m<sup>3</sup> de béton

Tableau 4 : Formulation Béton El Haoureb 0/20

ciment :	J. Ressas:	J. Ressas:	J. Ressas:	J. Ressas:				
ciment32.5	\sable a	\sable b	\gravillon 5/12	\gravillon12/20				
Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Porosité	Indice de comp.	Masse vol. à sec	Masse vol. saturé
n°0	n°1	n°2	n°3	n°4				
%	%	%	%	%				
20	15	38	10	17	0.1944	9	2214.3	2408.6
19	13.5	36.2	11	20.3	0.1862	9	2233.6	2419.8
18	12	34.4	12	23.6	0.1785	9	2251.8	2430.3
17	10.5	32.6	13	26.9	0.1714	9	2268.2	2439.6
16	9	30.8	14	30.2	0.1654	9	2281.4	2446.8
15	7.5	29	15	33.5	0.1615	9	2289	2450.5
14	6	27.2	16	36.8	0.1609	9	2287.6	2448.4
13	4.5	25.4	17	40.1	0.1652	9	2272.7	2437.9
12	3	23.6	18	43.4	0.1755	9	2241.7	2417.1
11	1.5	21.8	19	46.7	0.1913	9	2195.8	2387
10	0	20	20	50	0.2109	9	2139.6	2350.5

Tableau 5 a : Pas de 1 pour la pâte de ciment

ciment :	J. Ressa s:	J. Ressa s:	J. Ressa s:	J. Ressa s:				
ciment32.5	\sable a	\sable b	\gravillon 5/12	\gravillon 12/20				
Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Porosité	Indice de comp.	Masse vol. à sec	Mass e vol. saturé
n°0	n°1	n°2	n°3	n°4				
%	%	%	%	%				
15	7.5	29	15	33.5	0.1615	9	2289	2450.5
14.8	7.2	28.64	15.2	34.16	0.161	9	2289.6	2450.6
14.6	6.9	28.28	15.4	34.82	0.1607	9	2289.8	2450.5
14.4	6.6	27.92	15.6	35.48	0.1606	9	2289.5	2450.1
14.2	6.3	27.56	15.8	36.14	0.1606	9	2288.8	2449.4
14	6	27.2	16	36.8	0.1609	9	2287.6	2448.4
13.8	5.7	26.84	16.2	37.46	0.1613	9	2285.8	2447.1
13.6	5.4	26.48	16.4	38.12	0.1619	9	2283.5	2445.4
13.4	5.1	26.12	16.6	38.78	0.1628	9	2280.5	2443.3
13.2	4.8	25.76	16.8	39.44	0.1638	9	2277	2440.8
13	4.5	25.4	17	40.1	0.1652	9	2272.7	2437.9

Tableau 5 b : optimisation du pas de pâte de ciment

ciment :	J. Ressa s:	J. Ressa s:	J. Ressa s:	J. Ressa s:	Eau
ciment32.5	\sable a	\sable b	\gravillon5/12	\gravillon12/20	
325.01	144.19	630.79	361.63	827.17	160.60

Tableau 5 c : Dosage des constituants en Kg par m³ de béton

Tableau 5 : Formulation Béton Jbel Ressa 0/20

ciment :	El Khlédia :	El Khlédia :	J. Ressas:	J. Ressas:	Porosité	Indice de comp.	Masse vol. à sec	Masse vol. saturé
\ciment32.5	\sable a	\sable b	\gravillo n5/12	\gravillo n12/20				
Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Constituant				
n°0	n°1	n°2	n°3	n°4				
%	%	%	%	%				
20	15	35	20	10	0.2286	9	2081.4	2310
19	13.5	33.5	19	15	0.2179	9	2110.1	2328
18	12	32	18	20	0.207	9	2139.2	2346.2
17	10.5	30.5	17	25	0.196	9	2168.4	2364.4
16	9	29	16	30	0.1852	9	2197.3	2382.5
15	7.5	27.5	15	35	0.1747	9	2225.4	2400
14	6	26	14	40	0.165	9	2251.2	2416.2
13	4.5	24.5	13	45	0.1571	9	2272.2	2429.2
12	3	23	12	50	0.153	9	2282.8	2435.8
11	1.5	21.5	11	55	0.1566	9	2272.8	2429.4
10	0	20	10	60	0.1718	9	2231.6	2403.3

Tableau 6 a : Pas de 1 pour la pâte de ciment

ciment :	El Khlédia :	El Khlédia :	J. Ressas:	J. Ressas:	Porosité	Indice de comp.	Masse vol. à sec	Masse vol. saturé
\ciment32.5	\sable a	\sable b	\gravillo n5/12	\gravillo n12/20				
Constituant	Constituant	Constituant	Constituant	Constituant				
n°0	n°1	n°2	n°3	n°4				
%	%	%	%	%				
13	4.5	24.5	13	45	0.1571	9	2272.2	2429.2
12.8	4.2	24.2	12.8	46	0.1558	9	2275.4	2431.2
12.6	3.9	23.9	12.6	47	0.1548	9	2278.1	2432.9
12.4	3.6	23.6	12.4	48	0.154	9	2280.3	2434.3
12.2	3.3	23.3	12.2	49	0.1533	9	2281.9	2435.3
12	3	23	12	50	0.153	9	2282.8	2435.8
11.8	2.7	22.7	11.8	51	0.1529	9	2282.8	2435.8
11.6	2.4	22.4	11.6	52	0.1532	9	2282	2435.2
11.4	2.1	22.1	11.4	53	0.1539	9	2280.1	2434
11.2	1.8	21.8	11.2	54	0.155	9	2277	2432.1
11	1.5	21.5	11	55	0.1566	9	2272.8	2429.4

Tableau 6 b : optimisation du pas de pâte de ciment

ciment :	El Khlédia :	El Khlédia :	J. Ressas:	J. Ressas:	Eau
\ciment32.5	\sable a	\sable b	\gravillon5/12	\gravillon12/20	
269.37	61.64	518.20	269.37	1164.23	152.90

Tableau 6 c : Dosage des constituants en Kg par m<sup>3</sup> de béton

Tableau 6: Formulation Béton Jbel Ressas 0/20(Sable roulé d'El Khlédia)

#### 4 APPLICATION DU MODELE DREUX-GORRISSE AU BETON TUNISIEN :

En application au même granulats, les propositions des mélanges données par le Modèle Dreux-Gorrissé. (Celui utilisé par les formulateurs tunisiens du béton : CETEC...etc.) sont résumées dans le tableau 7.

	J. Ressas				El Haoureb				Khlédia-J.Ressas			
	Dreux		René-LCPC		Dreux		René-LCPC		Dreux		René-LCPC	
	M (Kg)	%	M (Kg)	%	M (Kg)	%	M (Kg)	%	M (Kg)	%	M (Kg)	%
Ciment	325	14.61	325.01	14.2	350	15.28	342.71	15	275	12.5	269.37	11.8
Sable	720.7				688.2				532			
Sable a	79.277	3.56	144.19	6.3	90.842	3.965	166.72	7.2	63.84	2.9	61.64	2.7
Sableb	641.42	28.83	630.79	27.6	597.36	26.07	629.84	27	468.16	21.3	518.2	22.7
gravillon	413.4	18.58	361.63	15.8	261.8	11.43	342.71	15	231	10.5	269.37	11.8
gravier	766.1	34.43	827.17	36.1	991.1	43.26	833.62	36	1165	52.9	1164.2	51
M.V à sec	2225.2	100	2288.8	100	2291.1	100	2315.6	100	2203	100	2282.8	100
Porosité												
Théo.	0.1647		0.1606		0.1802		0.1765		0.155		0.1529	
Dreux	0.178				0.178				0.173			
G/S	1.637		1.534		1.821		1.477		2.624		2.472	

Tableau 7: Propositions des mélanges Dreux-Gorrissé et René-LCPC

#### 5 COMPARAISON ENTRE LA METHODE « MEC » ET LA METHODE DREUX-GORRISSE :

Afin de déduire la méthode performante et adéquate pour la formulation des bétons hydrauliques, on a calculé la porosité des proportions des empilements granulaires (des constituants) de chaque formulation, les résultats sont résumés dans le tableau 7 ci-dessus.

Dans ce cadre, rappelons uniquement que la formulation meilleure est celle qui a une compacité plus grande donc une porosité plus faible. (C'est le principe fondamental de toute formulation).

Nous constatons ainsi les deux remarques suivantes :

- la formulation donnée par le modèle « MEC » présente une porosité plus faible que celle donnée par Dreux-Gorrissé ; ce qui confirme parfaitement le concept du modèle « MEC »

A titre indicatif et d'après le tableau 7 la porosité théorique du mélange des constituants de la carrière Jbel Ressas donnée par la méthode Dreux-Gorrissé, soit *0.1647*, est plus grande que

celle donnée par la méthode René-LCPC, soit  $0.1606$  ; alors que celle donnée par Dreux pour la formulation expérimentale est de  $0.178$ .

- La masse volumique à sec du mélange donné par le modèle « MEC » est plus élevée que celle donnée par Dreux-Gorrisse ; Ce qui laisse à penser que la résistance à la compression et à la traction du mélange du « MEC » sera beaucoup plus meilleure.

Pour les fractions issues de la carrière Jbel ressas, la masse volumique à sec du mélange donnée par Dreux, soit  $2225.2$  Kg est plus petite que celle donnée par René-LCPC, soit  $2288.8$  Kg (Tableau 7).

## **6- CONCLUSIONS :**

Certes la compréhension de ce Modèle d'Empilement Compressible « MEC » nécessite une connaissance et un bagage scientifique assez développés, mais son application et sa mise en œuvre ne sont pas difficiles à réaliser.

On arrive ainsi par quelques aller/retour entre l'ordinateur et le laboratoire à déterminer rapidement une composition de béton dont on maîtrise un nombre beaucoup plus grand de propriétés d'usage que par le passé, en ayant éventuellement au préalable, envisagé un grand nombre de combinaisons de constituants susceptibles d'entrer dans la composition du matériau final.

Par son application, on aboutira à une formulation d'ordre pratique et objectif basé sur un cahier des charges performantiel.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] DE LARRARD F., SEDRAN T., "Une nouvelle approche de la formulation des bétons", à paraître aux annales du BTP.
- [2] DE LARRARD F., "Structures granulaires et formulation des bétons", Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, OA 34, Avril, 2000.
- [3] BARON J., OLLIVIER J P., "Les bétons-Bases et données pour leur formulation", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, 1996.
- [4] DE LARRARD F., SEDRAN T., "René-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil", Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°194, Novembre-Décembre, 1994.
- [5] DE LARRARD F., SEDRAN T., "René-LCPC – Logiciel d'optimisation granulaire", site internet : « [www.René-LCPC.fr](http://www.René-LCPC.fr) ».
- [6] DE LARRARD F., SEDRAN T., "Manuel d'utilisation de René-LCPC ", Version 6.1d, Logiciel d'optimisation granulaire, Septembre, 2000.
- [7] DREUX G., FESTA J., "Nouveau guide du béton et de ses constituants ", Huitième édition, Eyrolles, 1995.
- [8] DE LARRARD F., BELLOC A., "L'influence du granulats sur la résistance à la compression des bétons", Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°219, 1994, pp. 41-52.
- [9] DE LARRARD F., LEDEE V., SEDRAN T., BROCHU F., DUCASSOU J.B., "Nouvelle essai de mesure de compacité des fractions granulaires à la table à chocs", Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°246-247, 1994, pp. 101-115
- [10] LANCHON R., "Cours de laboratoire 1 et 2 : Granulas – Bétons - Sols", Brevets de Technicien et Baccalauréats F (Bâtiment et Travaux Public) Formation Continue, Editions CASTEILLA, 1988.
- [11] MENSIS R., "Recueil d'essais sur les matériaux de construction", Manuel de laboratoire pour essais sur les matériaux de construction, photocopié de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2000.
- [12] BRAHAM L., " Empilements granulaires et formulation des bétons hydrauliques", à paraître dans les rapports interne du Ministère de l'Equipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire, Décembre, 2005.