

# L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons

## RÉSUMÉ

Cet article présente une étude théorique et expérimentale décrivant l'influence du granulat sur la résistance à la compression du béton. Une première distinction est faite entre les aspects topologiques et mécaniques. Le premier effet, appelé *effet de confinement*, inclut celui du volume de pâte et de la dimension maximale des granulats, qui sont décrits au moyen d'un paramètre physique simple appelé *épaisseur maximale de pâte* (EMP). L'épaisseur maximale de pâte est définie comme la distance moyenne entre deux granulats grossiers adjacents. Des équations sont données pour calculer l'épaisseur maximale de pâte et ses effets sur la résistance à la compression. Le second type d'effet concerne la liaison entre la pâte et le granulat (*effet d'adhérence*) ; quant au troisième, il consiste en la limitation de la résistance du béton due à la résistance intrinsèque de la roche (*effet plafond*). Des essais ont été réalisés sur treize mélanges fabriqués avec cinq sources de granulats, afin de comparer la résistance de la pâte pure et celle des mélanges (mortier et béton). L'estimation quantitative des trois effets du granulat sur la résistance à la compression donne une précision de 2,2 MPa, sur les mélanges étudiés. Un tel modèle semble approprié pour être incorporé dans un logiciel d'aide à la formulation, pour des bétons de constructions courantes comme pour des bétons à hautes performances.

**MOTS CLÉS :** 32 - *Granulat - Résistance (matér.) - Béton hydraulique - Compression - Essai - Pâte de ciment - Adhésivité - Modèle mathématique - Béton hautes performances - Liaison (chim.) - Epaisseur.*

François de LARRARD

Docteur ENPC

Chef de la division Méthodes et matériels de construction et d'entretien des routes

Albert BELLOC

Technicien supérieur\*

Section Formulation et mise en œuvre des bétons  
Division Béton et ciment pour ouvrages d'art

Laboratoire central des Ponts et Chaussées

## Introduction

La résistance à la compression du béton reste, du point de vue de l'ingénieur, la propriété la plus importante du matériau. Depuis longtemps, la relation entre la composition du béton et la résistance à la compression a intéressé les chercheurs. Cependant aucune théorie fondamentale et universellement adoptée n'existe en la matière, au delà de la notion commune de rapport eau/ciment.

Abrams [1] a été probablement le premier à montrer l'importance de ce paramètre dont dépend la résistance de la compression, tandis que, vingt ans auparavant, Féret [2] prévoyait les résistances (en compression et en traction) en fonction de la concentration volumique du ciment dans la pâte  $\gamma$  :

$$\gamma = \frac{C}{C + E + A} \quad (1)$$

où C, E et A sont les volumes de ciment, eau et d'air occlus.

Féret fait l'hypothèse que la résistance à la compression est proportionnelle à  $\gamma^2$ , tandis que la résistance à la traction serait proportionnelle à  $\gamma$ . On voit au passage que la relation dépend directement du rapport c/c, si le volume d'air prévu est négligé :

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{E + A}{C}} \approx \frac{1}{1 + \frac{\rho_e}{\rho_c} \frac{e}{c}} \quad (2)$$

où  $\rho_c$ , e et c sont respectivement la masse volumique du ciment, les masses d'eau et de ciment, par unité de volume.

\* En retraite.

Quel que soit le paramètre retenu, celui-ci sera à la base de toute approche fondamentale : la résistance à la compression est principalement influencée par la nature de la pâte, le volume et la nature du granulat n'ayant qu'un rôle secondaire. Cependant, bien que le rapport e/c soit une notion de base dans la technologie du béton, il n'est pas suffisamment précis pour une maîtrise complète de la résistance à la compression. D'autres paramètres sont nécessaires [3] si l'objectif est de prévoir cette caractéristique avec une précision relative de quelques pour-cent.

Cette question ancienne est toujours d'actualité ; à notre époque, des modèles élaborés conduisant à des calculs d'une certaine complexité peuvent être facilement utilisables par les praticiens, en utilisant des logiciels correctement programmés. Par ailleurs, les limites de la notion de rapport e/c sont beaucoup plus apparentes depuis le développement des bétons à hautes performances, dans lesquels le granulat joue un rôle très important [4], [10]. Tout ceci justifie donc la tentative de développer des modèles plus précis.

Le but de cette recherche est donc d'établir le rôle du granulat dans la résistance à la compression du béton, afin de pouvoir en déduire un modèle mathématique semi-empirique, intégrable dans un logiciel destiné à la formulation des mélanges.

Un tel logiciel peut être très utile pour les praticiens [11], en permettant :

- de trouver en laboratoire une composition optimale avec un minimum d'essais ;
- d'ajuster les dosages pendant la fabrication ;
- pour certaines applications inusitées, de trouver des réponses nouvelles en termes de mélanges spéciaux, du type des bétons à hautes performances (BHP).

La présente recherche concerne seulement les bétons de densité normale. Nous avons présenté ailleurs un modèle applicable aux bétons de granulats légers [12]. Notre approche traite des aspects topologiques (c'est-à-dire forme, dimensions et volume occupé par les granulats ou par la matrice), et aussi des autres effets plus mécaniques (liaison de la matrice avec les granulats et propriétés mécaniques du granulat lui-même). Des essais originaux ont été entrepris et un modèle a été construit.

## **Effet de l'épaisseur maximale de pâte**

Dans une série de bétons, produits avec les mêmes constituants (granulats, ciment et eau), toutes choses égales par ailleurs, on peut s'at-

tendre à certaines tendances systématiques, présentées dans les deux paragraphes suivants :

### **Effet du volume du granulat**

Stock et al. [14] ont publié une étude concernant l'effet du volume du granulat sur la résistance à la compression. La plus grande partie des références citées dans cet article soutient que l'assertion selon laquelle la résistance diminue quand le volume de pâte augmente (à nature de pâte constante). Ces auteurs ont aussi publié quelques expériences originales dans lesquelles ils ont réalisé une série de bétons avec différents volumes de granulats de même granulométrie, liés par la même matrice. Ils ont évité la ségrégation dans les mélanges fluides par une mise en rotation des moules après mise en place du matériau. Malheureusement, les essais de résistance à la compression sur cubes (éprouvettes cubiques) ont donné des résultats assez dispersés. Cependant la tendance mentionnée plus haut est reproduite, au moins dans le domaine des concentrations usuelles en granulat, soit 60-75 % (fig. 1). Notons que l'effet du granulat, qui n'est pas monotone, peut être modifié par une augmentation de l'air occlus quand la maniabilité diminue. Selon le paramètre de Féret (Eq. [1]) le volume d'air joue un rôle similaire à celui de l'eau au regard de la résistance.

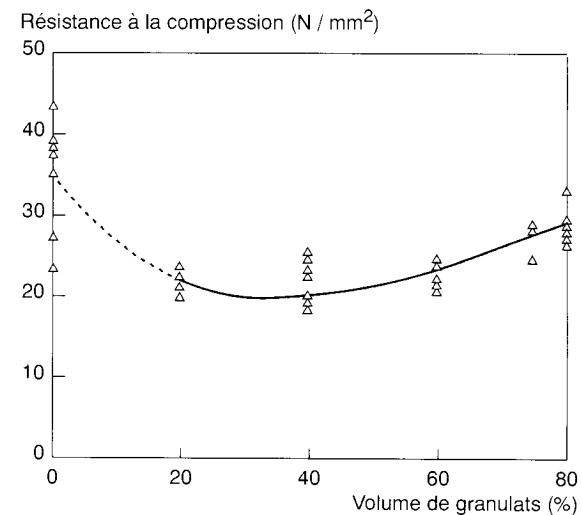


Fig. 1 - Effet de volume de granulat,  
d'après Stock et al. [14].

### **Effet de la taille maximale du granulat**

Dans les années 1960, Walker et Bloem ont publié un article [15] qui suscita à l'époque beaucoup de discussions [16] : la majorité des résultats présentés montraient un effet négatif de la dimension maximale du granulat (D) sur la résistance à la compression, à rapport e/c constant. Cette constatation étonna la communauté scientifique, celle-ci présumant générale-

ment qu'avec un D important, le béton, plus compact, présenterait une résistance mécanique supérieure et une meilleure durabilité.

Cependant, deux causes exercent des effets contradictoires : pour une quantité donnée de ciment, en augmentant le D, on tend vers une réduction de la demande en eau, tandis que la résistance obtenue à rapport e/c donné diminue. Par conséquent, quand le volume du ciment et la maniabilité restent constants, on a un effet du D sur la résistance à la compression qui n'est pas monotone. Une valeur optimale de la dimension du granulat existe, qui décroît quand la quantité de ciment augmente [17].

### Un principe unificateur : l'épaisseur maximale de pâte

Bien que les deux effets précédents soient maintenant bien connus, ils n'ont pas cependant été décrits quantitativement. Selon notre opinion, ils sont les deux faces d'un paramètre physique unique, en rapport avec la topologie du granulat, considéré comme une inclusion dans la matrice que constitue la pâte de ciment.

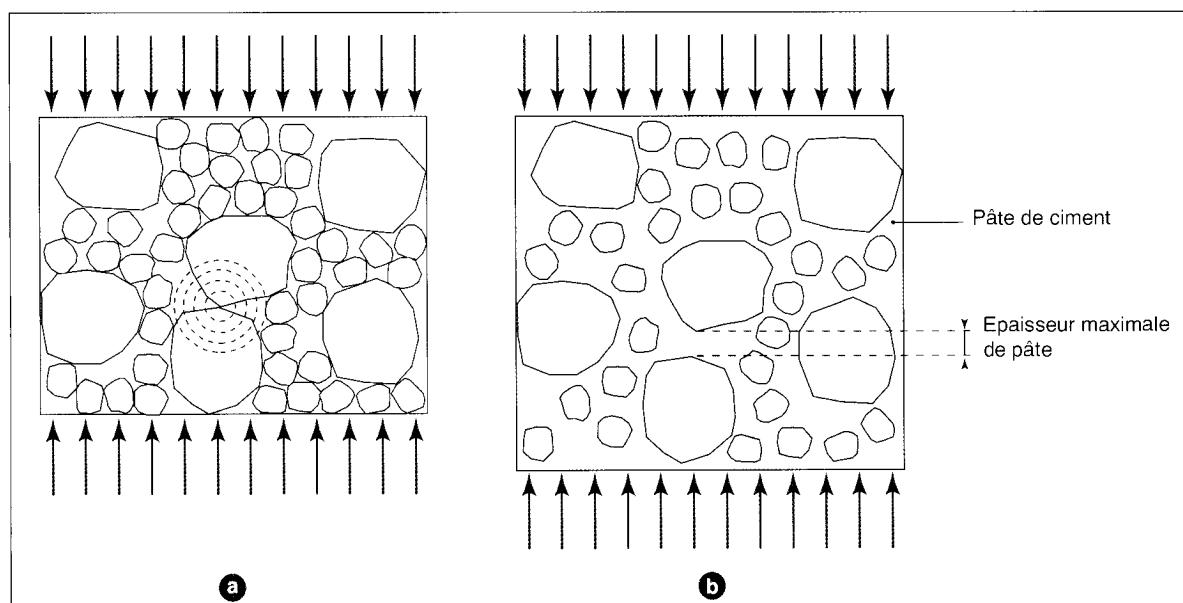
Dans un empilement sec de particules chargé en compression, il est connu que les particules grossières tendent à « capter » les contraintes [18]. Elles jouent ainsi le rôle de points durs dans le milieu mou constitué du mélange poreux des

particules plus fines. Certains couples de ces granulats grossiers peuvent être en contact direct. Ces points de contact seront alors le siège de fortes concentrations de contraintes (fig. 2a). Si à présent nous considérons le même squelette rempli avec de la pâte de ciment venant occuper la porosité interstitielle des grains, avec un volume plus grand que cette dernière pour obtenir une certaine maniabilité, on peut penser que la pâte placée entre deux gros granulats préalablement en contact sera fortement sollicitée (fig. 2b). Elle constituera en fait le premier « fusible » lorsque le matériau composite sera chargé en compression. La distance entre ces granulats est appelée l'épaisseur maximale de pâte  $e_{pmax}$  parce qu'elle est, dans un tel processus de dilatation uniforme, le plus grand intervalle existant entre deux particules adjacentes.

Nous présentons à présent une méthode simple pour l'évaluation de l'épaisseur maximale de pâte: si nous appliquons une dilatation uniforme sur les grains du granulat (fig. 2b) (avec un rapport égal à  $\lambda$ ), chaque centre de gravité de grain demeurant à la même place, le volume du granulat va devenir :

$$g^* = \lambda^3 g \quad (3)$$

où  $g$  est le volume du granulat par unité de volume de béton (avant dilatation).



a. Empilement sec de particules soumis à un chargement uni-axial.

b. Béton vu comme un empilement « injecté » de pâte de ciment.

Figure 2

Quand les grains sont en contact avec leurs voisins, le granulat devient un *empilement* de particules ;  $g^*$  est égal à la compacité de cet empilement, considéré comme mélange sec. Mais cette compacité est aussi celle du granulat originel (avant dilatation), car une homothétie, multipliant toutes les distances par un même coefficient, ne modifie pas la porosité d'un empilement granulaire.

D'autre part nous avons :

$$\lambda = \frac{e_{p\max} + D}{D} \quad (4)$$

où  $D$  est la taille maximale du granulat et  $e_{p\max}$  l'épaisseur maximale de pâte. Donc nous déduisons l'équation pour calculer l'épaisseur maximale de pâte :

$$e_{p\max} = D \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad (5)$$

Comme on pouvait s'y attendre, l'épaisseur maximale de pâte est à la fois fonction de la taille maximale du granulat, et du degré d'écartement des grains par la pâte de ciment.  $D$  et  $g$  peuvent être facilement déduits de la composition du béton. Quant au paramètre  $g^*$ , il peut être soit mesuré, soit calculé en utilisant un modèle récent (tel que le modèle de suspension solide [19], [20], soit encore évalué en utilisant une formule simplifiée proposée par Caquot [21] :

$$g^* = 1 - 0,47 \sqrt[3]{\frac{d}{D}} \quad (6)$$

où  $d$  et  $D$  sont le minimum et le maximum des dimensions du granulat correspondant à 10 et 90 % de passant, respectivement. Nous avons affiné les versions de cette formule [13], proposant respectivement les expressions

$$g^* = 1 - 0,39 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,22} \quad (7)$$

pour des granulats roulés et

$$g^* = 1 - 0,45 \left( \frac{d}{D} \right)^{0,19} \quad (8)$$

pour des granulats concassés.

La preuve du caractère significatif de l'épaisseur maximale de pâte est démontrée dans la figure 3, où la résistance expérimentale divisée par le carré du paramètre de Féret  $\gamma^2$  est donnée en fonction de l'épaisseur maximale de pâte, pour des jeux de données correspondant à diverses sources de granulats [13]. Quantitativement, ces résultats peuvent être décrits par l'équation empirique suivante :

$$f'_c \propto MPT^p \quad (9)$$

où  $p$  est compris entre 0,13 et 0,16<sup>13,22</sup>. L'erreur moyenne faite en utilisant la formule de Féret dans la prévision de la résistance à la compression du béton est divisée par deux, lorsqu'on introduit le terme dépendant de l'épaisseur maximale de pâte (fig. 4).

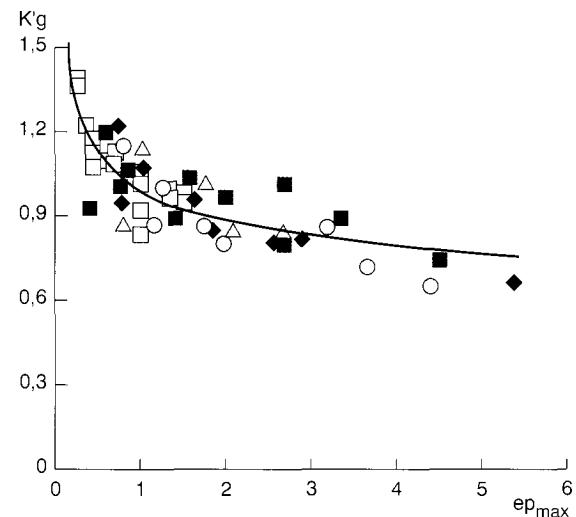
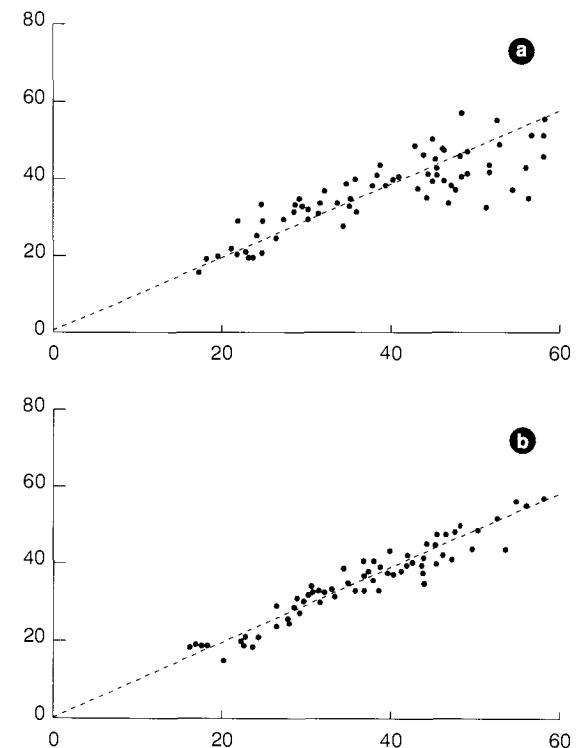


Fig. 3 - Relation entre la résistance en compression (après que l'effet du rapport eau/ciment ait été éliminé) et épaisseur maximale de pâte, pour quatre ensembles de données indépendants [3]. Paramètre sans dimension en fonction de l'épaisseur minimale en millimètres.



a. Formule de Féret.

b. Formule comprenant un terme tenant compte de l'épaisseur maximale de pâte.

Fig. 4 - Comparaison entre valeurs prédites et mesurées de la résistance en compression

Physiquement, l'épaisseur maximale de pâte pourrait avoir un rapport avec *l'auréole de transition*, zone poreuse entourant parfois les granulats dans le béton durci, et résultant de l'effet de paroi exercé par le granulat sur l'arrangement des grains de ciment, combiné à une accumulation d'eau par ressuage interne (pour les parties horizontales situées sous les granulats). L'auréole est le siège privilégié du développement des premières fissures lors de chargements mécaniques ; elle joue également un rôle important dans les phénomènes de transport à travers le béton durci. Cependant, il est surprenant de réaliser que, quand l'épaisseur maximale de pâte décroît, la résistance à la compression croît alors que la proportion de l'espace interstitiel occupé par l'auréole augmente aussi. Une explication peut-être plus convaincante est fournie par l'orientation des cristaux de CSH : plus l'épaisseur maximale de pâte sera mince, plus les hydrates seront orientés, ce qui pourrait accroître leur capacité portante sous chargement de compression.

Le concept d'épaisseur maximale de pâte incorpore les effets du volume du granulat et de sa taille maximale (termes g et D dans l'équation 5). Mais une influence systématique de la nature de la roche, non contenue dans ce concept, s'ajoute aux précédents effets. Les expérimentations qui suivent ont pour objet de mettre en évidence cette autre influence.

## Expérimentations

### Matériaux

Cinq granulats de différentes sources ont été utilisés :

- un silex roulé du Crotoy (granulat marin),
- un calcaire dur concassé du Boulonnais,
- un calcaire mi-dur concassé d'Arlaut,
- un basalte concassé de Raon l'Etape,
- un quartzite concassé, assez hétérogène, de la région de Cherbourg.

La caractérisation de ces granulats est donnée dans le tableau I. Chaque carrière a fourni un sable et un gravillon suivant des granulométries variables, exceptée la carrière du Crotoy. Pour les mélanges réalisés avec le gravillon de Crotoy, un sable siliceux roulé de Seine, présentant une similitude pétrographique, a été utilisé. Le ciment Portland à haute résistance (CEM I 52,5 suivant la Norme européenne de référence ENV 197) contenait 10 % d'alumi-

nate tricalcique ( $C_3A$ ). Il a été utilisé en combinaison avec un dosage de 10 % de fumée de silice densifiée. Un superplastifiant de type mélamine a été également utilisé dans les mélanges.

Mortiers et bétons ont été définis afin qu'ils aient la même composition de pâte ( $e/c' = 0,285$ ) et une consistance mesurée au cône d'Abra ms supérieure à 20 cm. Pour chaque type de granulat et chaque D, les proportions des mélanges ont été optimisées pour contenir le minimum de pâte, en utilisant le logiciel RENE-LCPC [23]. Les proportions des mélanges sont données dans le tableau II.

### Essais

La pâte, les mortiers et les bétons ont été fabriqués en moules cylindriques en acier de  $110 \times 200$  mm et mis en place sur table vibrante. Aucune ségrégation ni ressuage n'ont été constatés dans les mélanges réalisés contenant la pâte pure, à cause du faible rapport  $e/c$  et de la présence de fumée de silice. Ce fait mérite d'être signalé, car des phénomènes semblables affectent fréquemment la qualité des essais mécaniques effectués sur pâte de ciment.

Les éprouvettes ont été démoulées à 20 heures, et les faces d'essais ont été surfacées par rectification au lapidaire, à quelques micromètres près, après une protection latérale pour assurer l'étanchéité par rapport à l'eau de refroidissement du lapidaire. La résistance à la compression a été mesurée à 1, 3 et 28 jours pour tous les mélanges (sur trois éprouvettes). La résistance à la traction par fendage et le module élastique ont été mesurés à 28 jours. Pour les essais au-delà d'un jour, les cylindres ont été enveloppés d'une feuille d'aluminium, afin d'éviter tout échange d'humidité avec l'extérieur. Ce processus a été adopté car, si l'eau pouvait pénétrer dans les cylindres à faible  $e/c$ , elle serait susceptible d'y engendrer d'importants effets d'autocontrainte. La température de cure était de  $20 \pm 2$  °C. Les résultats des essais mécaniques sont donnés dans le tableau II.

En outre, une série de cylindres de pâte a été mise en cure à température contrôlée dans un bain d'eau (à même leurs moules en acier) à  $20 \pm 1$  °C, afin de limiter la montée en température des éprouvettes en évitant toute pénétration d'eau. Le processus a été efficace, car la résistance à 1 jour (62,1 MPa) a significativement baissé, comparativement aux éprouvettes homologues conservées dans les mêmes conditions que les éprouvettes de mortier et de béton, dont la résistance mesurée fut de 91,4 MPa.

**TABLEAU I**  
**Caractéristiques des granulats utilisés dans les présents essais**

Classes granulaires	Sable de Seine	Crotoy 5/12,5	Crotoy 12,5/25	Boul. 0/5	Boul. 5/12,5	Boul. 12,5/20	Arlaut 0/5	Arlaut 5/12,5	Arlaut 12,5/25	Raon 0/2	Raon 1/4	Raon 6/10	Raon 10/20	Cherb. 0/3,15	Cherb. 4/10	Cherb. 10/20
$f'_c$ (MPa)	*	285	285	160	160	160	111	111	111	250	250	250	250	*	*	*
Compa-cité**	0,711	0,653	0,634	0,778	0,635	0,597	0,708	0,6022	0,584	0,742	0,615	0,601	0,600	0,758	0,543	0,570
Tamis (mm)	% de passant															
0,005														0		
0,0063										1				1		
0,008										1				1		
0,01										2				2		
0,0125										3				3		
0,016										4				3		
0,02										4				4		
0,025										5				5		
0,0315										6				5		
0,04										7				6		
0,05										7				7		
0,063			0							8				7		
0,08	0			8			0			9				8		
0,1	1			11			1			12				11		
0,125	3			14			2			14				14		
0,16	7			19			4			16				17		
0,2	12			24			8			19				21		
0,25	17			30			13			22				26		
0,315	24			34			18			26				31		
0,4	35			40			26			30	0			37		
0,5	48			46			34			35	1			44		
0,63	60			51			44			41	2			53		
0,8	70			57			52			46	2			58		
1	76			63			61			54	3			68		
1,25	80			68			72			64	4			77		
1,60	84			74			80			74	7			85		
2	88			79			88			86	12			92	0	
2,50	92			83			95			96	22			97	0,5	
3,15	95			88			97	0		100	40	0		100	1	
4	99			95	0		98	0,5			72	1			2	
5	99	0		100	1		99	2			95	2			4	0
6,30	100	7			11		100	10			100	9	0		17	1
8		20			33	0		31				39	1		48	2
10		41	0		57	1		64	0			84	4		89	12
12,5		89	4		93	10		100	1			100	30		100	41
16		100	48		100	53			14				78			82
20			95			92,5			38				96			100
25			100			100			92				100			
31,5									100							

\* Non mesurable (roche hétérogène).

\*\* Compacité calculée avec le logiciel RENé-LCPC [23].

**TABLEAU II**  
**Formulations et propriétés mécaniques des pâtes, mortiers et bétons**

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Origine du granulat</b>	-	Crotoy	Crotoy	Crotoy	Boulonnais	Boulonnais	Boulonnais	Arlaut	Arlaut	Raon l'Étape	Raon l'Étape	Cherbourg	Cherbourg
<b>Mélanges</b>	Pâte	Mortier	Micro-béton	Béton	Mortier	Micro-béton	Béton	Mortier	Béton	Mortier	Béton	Mortier	Béton
<b>Composition (masses par m<sup>3</sup> de mélange)</b>													
Gros pavillon				653			661		638	0	725		627
Petit pavillon			1 051	446		876	285		345	0	210		163
Sable		1 528	771	753	1 407	844	789	1 401	683	674	187	1 193	774
Sablon										854	701		
Ciment	1 543	644	444	431	717	539	525	670	500	673	513	826	612
FS	154,3	64,4	44,4	43,1	72,56	53,9	52,5	67	50	67	51,3	82,6	61,2
SP	30,9	16,1	11,1	10,8	17,9	13,5	13,1	16,8	12,4	16,9	12,8	20,6	15,2
Eau	417	190	136	134	204	156	153	215	173	201	158	231	174
g*		0,767	0,864	0,871	0,829	0,885	0,89	0,755	0,855	0,789	0,852	0,813	0,869
g		0,579	0,711	0,719	0,527	0,645	0,649	0,543	0,651	0,548	0,651	0,457	0,598
D (mm)		2,5	12,5	20	3,15	12,5	20	2	25	5	20	2	20
e <sub>pmax</sub> (mm)		0,246	0,839	1,32	0,513	1,39	2,22	0,232	2,378	0,646	1,8768	0,423	2,654
air (%)		3,5	0,8	0,7	2,5	1,1	0,8	3,8	0,8	1,7	0,5	3,1	1,4
Affaissement (cm)		25,5	24	23,5	26	25	25	25	22	26	23	22	21,5
f' <sub>c1</sub> (MPa)	(80)	56,9	45,9	47,5	72	72,4	61,8	56,3	53,4	61,4	46,3	71,8	61,9
Modèle (MPa)		56	47,7	45	75,3	68	64,8	67	53,4	55,1	48	72,2	60,6
f' <sub>c1</sub> (MPa)	109,2	76,4	64,9	62,7	94,9	90,7	82,6	79,2	71	76,9	64,2	87	76,7
Modèle (MPa)		76,4	65,1	61,4	95	86,5	82,6	83	67,4	75,2	65,5	88,9	75,9
f' <sub>c28</sub> (MPa)	152,3	106,3	90,5	86,8	112,1	109,5	107,7	101,9	89	104,9	90,9	108,4	101,8
Modèle (MPa)		106,6	90,8	85,6	119,3	109,5	105	101,9	84,7	104,9	91,3	108,4	94,3
R <sub>128</sub> (MPa)	2,57	6,34	5,91	5,48	5,45	4,71	4,86	5,23	4,59	6,53	5,62	5,60	5,70
E <sub>HS</sub> (MPa)	29,3	45,4	55,4	55,5	44,7	52,6	53,8	37,6	42	45,5	52,1	38	42,6

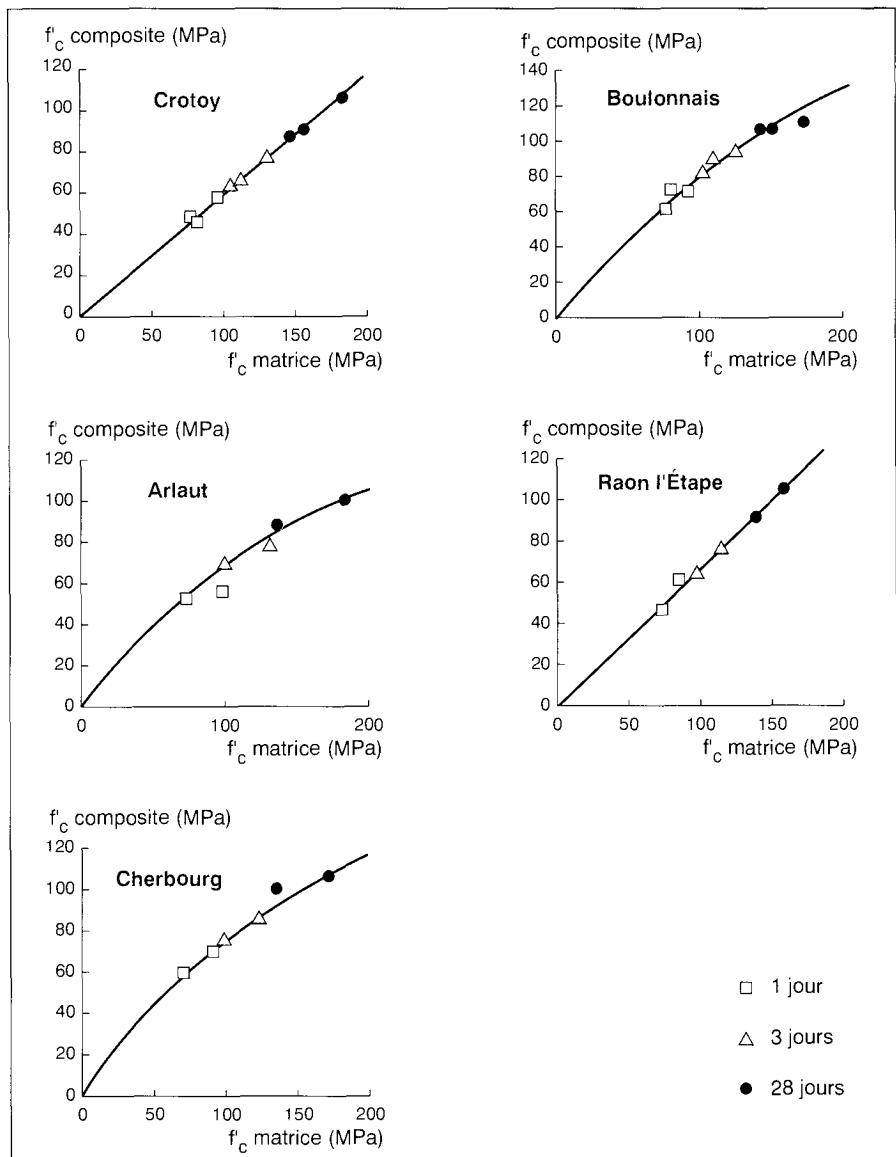
FS : Fumée de silice - SP : Superplastifiant.

## Analyse des résultats - Effet du type de roche

Pour analyser l'effet du granulat sur la résistance à la compression, une comparaison systématique a été entreprise entre résultats obtenus sur mortier ou béton, et ceux relatifs à la matrice (fig. 5). Une première correction a été faite sur la résistance de la pâte à un jour, afin d'effectuer des comparaisons à maturité constante (c'est-à-dire, à degré d'hydratation identique). En effet, l'éprouvette de pâte pure conservée dans l'air, à température ambiante, accuse une montée interne en température très supérieure à celle des mortiers et bétons, du fait de sa forte concentra-

tion en ciment. Cette élévation de température tend à augmenter artificiellement l'avancement de l'hydratation. Par contre, le fait de placer le moule métallique de pâte dans un bain thermostaté maintient la température intérieure à des valeurs plus faibles que celles observées dans les éprouvettes des mélanges avec granulats. Il est donc logique de prendre en compte une valeur de résistance de pâte à 24 heures intermédiaire entre les deux valeurs extrêmes mesurées. Une valeur de 80 MPa donne une stricte proportionnalité entre la résistance de la pâte et celle des composites formulés avec les granulats les plus durs ; elle a donc été adoptée comme résistance de la pâte à un jour.

Fig. 5 -  
Relations entre la résistance de la matrice (définie par l'équation 10) et celle du composite, pour différentes origines de granulat. Les courbes correspondent au modèle hyperbolique (équation 11).



### Confirmation de l'effet de l'épaisseur maximale de pâte

Une comparaison directe entre les développements de la résistance à la compression de la pâte et des composites (tableau II) conduit aux remarques suivantes :

- la résistance de la pâte est toujours plus élevée, quel que soit le composite ;
- à un âge donné et pour un type de granulat donné, la résistance décroît quand D (et  $e_{pmax}$ ) augmentent.

Afin d'en tenir compte, la résistance du composite a été affichée en fonction de la résistance de la matrice. Ici, la résistance de la matrice  $f'_{cm}$  est définie comme la résistance de la pâte  $f'_{cp}$  multipliée par un terme décrivant l'effet de l'épaisseur maximale de pâte.

$$f'_{cm} = f'_{cp} \cdot e^{-0.13} \quad (10)$$

L'épaisseur maximale de pâte est calculée par l'équation (5) ; il est remarquable que tous les points obtenus avec un type de roche donné peuvent être placés sur une unique courbe maîtresse, caractéristique de la roche (fig. 5). Ceci est une confirmation complémentaire du concept avancé concernant l'épaisseur maximale de pâte. En outre, le concept est applicable également pour les cinq familles de granulats employées, bien qu'il ait été préalablement destiné à caractériser les granulats roulés [13].

### Effet plafond - un modèle pour la prévision de la résistance du béton à partir de la résistance de la pâte

Pour certains matériaux (Crotoy, Raon), le développement de la résistance du composite est strictement proportionnel à celui de la matrice (au moins dans la série examinée) tandis que pour les autres (Boulonnais, Arlaut, Cherbourg),

une non-linéarité est observée, due à un « effet limiteur » du granulat. Les courbes maîtresses ont été lissées avec un modèle hyperbolique du type suivant :

$$f'_{cc} = \frac{a \cdot f'_{cm}}{b \cdot f'_{cm} + 1} \quad (11)$$

où  $f'_{cc}$ , est la résistance du composite, a et b deux constantes empiriques dépendant du type du granulat (les valeurs de celles-ci sont données dans le tableau III). La précision moyenne de ce modèle, donné par les équations (10) et (11), est de 2,2 MPa.

Pour les très hautes résistances de la matrice, la résistance du composite tend vers  $a/b$ . Aussi, on s'attend à ce que ce rapport soit contrôlé par la résistance intrinsèque de la roche. Or, dans le tableau III, le classement entre les types de granulats, en terme de rapport  $a/b$ , est le suivant :

Arlaut ≈ Cherbourg < Boulonnais < Raon l'Etape ≈ Crotoy

tandis que le classement correspondant selon la résistance à la compression de la roche est :

Arlaut < Boulonnais < Raon l'Etape < Crotoy.

TABLEAU III  
Valeurs des paramètres des courbes maîtresses, pour chaque origine de granulat

	a	b (MPa <sup>-1</sup> )	a/b (MPa)	Granulats décollés	$f'_{c28}$ (MPa)
Crotoy	0,583	0	$\infty$	13	285
Boulonnais	1,111	0,0033	337	0	160
Arlaut	0,96	0,00399	241	0	111
Raon	0,651	0	$\infty$	13,6	250
Cherbourg	1,145	0,00469	244	0	-

La nature hétérogène du granulat de Cherbourg rend impossible l'obtention d'une résistance à la compression significative. À cette réserve près, on voit que les classements sont bien compatibles entre eux.

D'autre part, pour les basses résistances de la matrice, l'équation (11) est réductible à l'expression suivante :

$$f'_{cc} \approx a \cdot f'_{cm} \quad (12)$$

Dans ce dernier cas, où la contrainte supportée par le granulat est petite devant leur propre résistance, le paramètre a ne peut que décrire la liaison entre la pâte et le granulat. Or, il est depuis longtemps reconnu que les granulats calcaires procurent une excellente liaison avec le ciment de la matrice. Ceci est cohérent avec les hautes valeurs du paramètre a, obtenues avec les granulats du Boulonnais et d'Arlaut. Il n'est pas non plus surprenant que la valeur la plus faible de a soit obtenue avec le granulat roulé siliceux de Crotoy,

lequel, de par sa texture, offre peu de prises aux hydrates issus de la transformation du ciment.

Pour avoir confirmation de ce constat, une quantification systématique de la proportion de granulats décollés dans la surface de rupture des éprouvettes de fendage a été entreprise (fig. 6 et tableau III). Seuls les granulats de Crotoy et Raon l'Etape montrent des déchassements de granulats ; ces granulats correspondent aussi aux deux valeurs basses de a.

### Comparaisons supplémentaires entre les différentes sources de granulat

Toutes les courbes maîtresses obtenues avec les granulats essayés sont rassemblées dans la figure 7. Il faut bien avoir à l'esprit que ces courbes expriment la résistance potentielle de la roche, indépendamment de la granulométrie ou de la forme des particules. Par exemple, le granulat de Crotoy siliceux n'est pas si mauvais que ne le laisse attendre cette figure : du fait de sa forme arrondie, il est possible d'obtenir un faible rapport eau/ciment et une petite valeur d'épaisseur maximale de pâte lorsque le volume de ciment et la maniabilité sont fixés.

Il est intéressant de noter que, suivant le domaine de résistance du béton, la hiérarchie entre deux roches peut varier, phénomène déjà mis en évidence par Day [11]. Tel est le cas pour les matériaux de Raon l'Etape et d'Arlaut. Pour des bétons ordinaires, le dernier est préférable - c'est-à-dire qu'il demandera moins de ciment à résistance et maniabilité fixées - tandis que le premier pourra être plutôt choisi pour les bétons à hautes performances. Bien sûr, on suppose dans cette comparaison que des granulométries et des formes de particules à peu près identiques peuvent être obtenues avec ces deux sources de granulats.

### Efficacité du ciment

Il a été noté récemment qu'il existe une diminution dans l'efficacité du ciment [24], [25], quand de très hauts dosages en ciment sont utilisés, même en présence de superplastifiant. Un moyen pour mettre en évidence ce phénomène consiste à afficher la variation de la résistance en fonction du rapport *ciment/eau*, soit l'inverse du paramètre *e/c* usuel. Dans le domaine des basses résistances la courbe est rectiligne, tandis qu'elle devient non-linéaire lorsque la résistance augmente, et tend vers une asymptote horizontale. La présente théorie explique bien, au moins qualitativement, ce phénomène : d'une augmentation du volume de pâte, résulte une augmentation de l'épaisseur maximale de pâte (équation 5), ce qui est une première cause de non-linéarité. Ensuite, suivant le type de roche, l'effet plafond (équation 11) peut intervenir, et se traduit alors par un ralentissement supplémentaire dans le gain de résistance (dû à des ruptures dans les granulats).

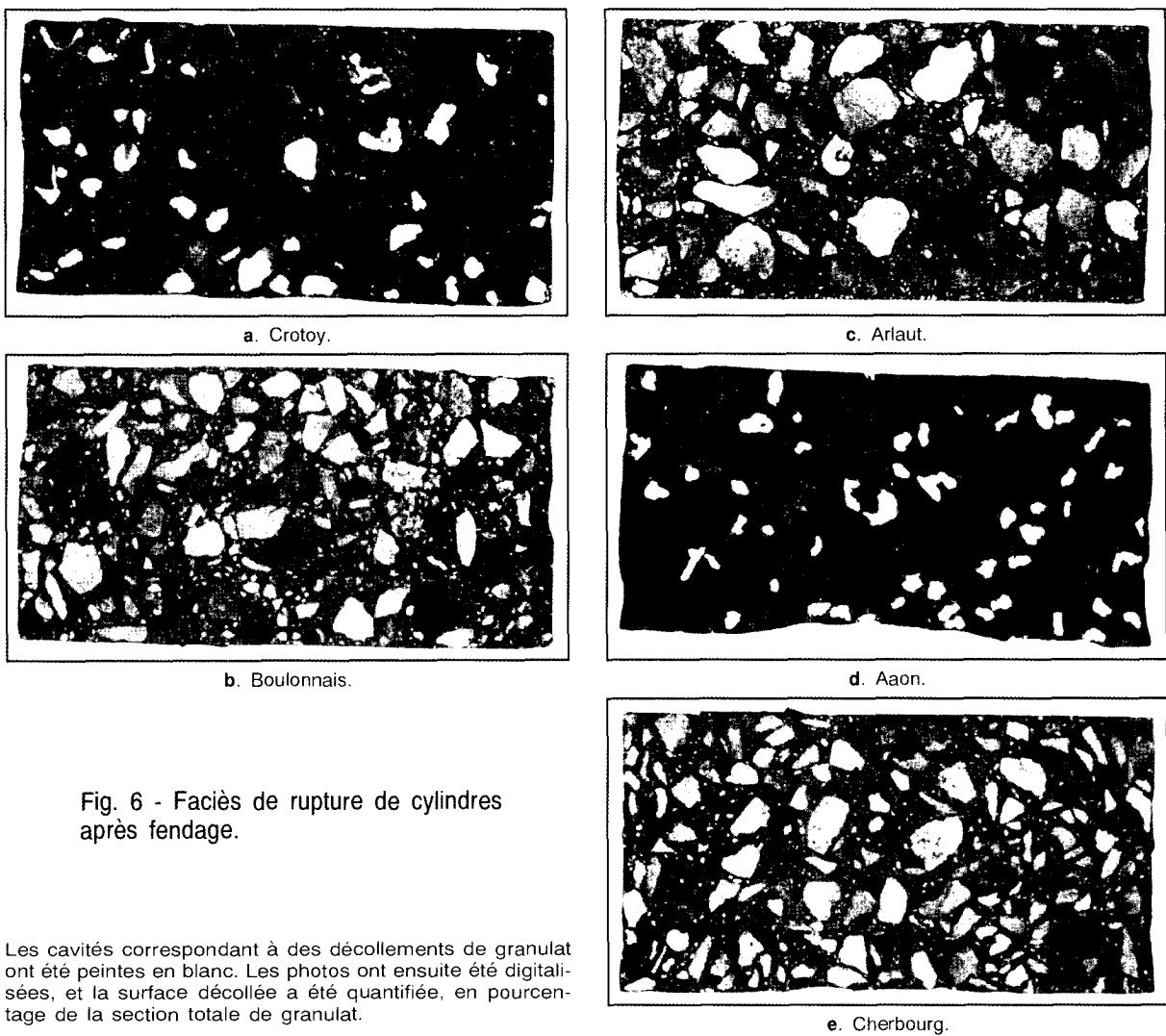


Fig. 6 - Faciès de rupture de cylindres après fendage.

Les cavités correspondant à des décollements de granulat ont été peintes en blanc. Les photos ont ensuite été digitalisées, et la surface décollée a été quantifiée, en pourcentage de la section totale de granulat.

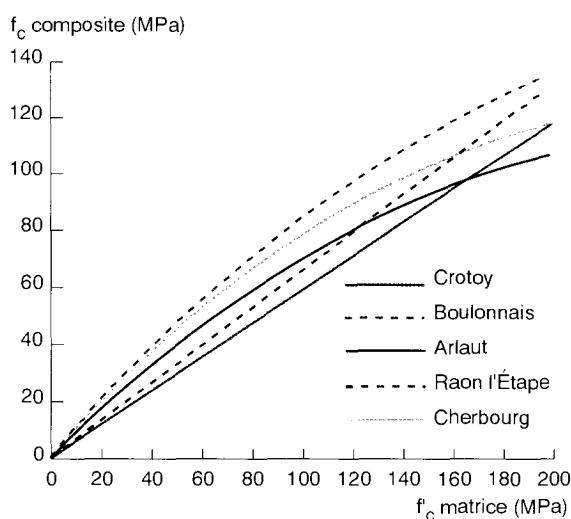


Fig. 7 - Comparaison entre les courbes maîtresses des différents granulats.

## Conclusion

L'effet du granulat sur la résistance à la compression du béton peut être analysé de la façon suivante :

- la pâte a une certaine résistance à la compression, dépendant des paramètres de composition (rapport eau/ciment, additions minérales éventuelles), du temps et de la cure ;
- devenant la matrice d'un squelette granulaire, la pâte voit sa résistance subir une modification due à l'épaisseur maximale de pâte (distance moyenne entre deux gravillons adjacents), la réduction de cette distance augmentant celle de la matrice. C'est ce qu'on appelle ici effet de *confinement* \* ;

\* Bien que présentant une analogie avec l'effet de confinement classique dans les géomatériaux - augmentation de la résistance en compression consécutive à une étreinte latérale - l'effet de l'épaisseur maximale de pâte ne peut pas lui être complètement identifié. En effet, comme on le voit dans le tableau II, la résistance des composites est systématiquement plus faible que celle de la pâte pure.

➤ pour une résistance normale de matrice, la résistance du béton est égale à celle de la matrice, multipliée par un coefficient dépendant de la qualité de la liaison entre pâte et granulat (coefficient  $a$  dans l'équation 11). C'est l'effet d'*adhérence* ;

➤ enfin, pour les hautes résistances de matrice, un effet supplémentaire est exercé par certains granulats, quand la résistance désirée du béton se rapproche de celle intrinsèque à la roche. C'est l'effet *plafond*.

Des équations ont été fournies pour décrire quantitativement les trois effets du granulat sur la résistance à la compression du béton. Ces équations seraient appropriées pour un logiciel destiné à la formulation et au contrôle de la qualité des mélanges, depuis les bétons classiques jusqu'aux bétons à très hautes performances.

La précision pouvant être attendue de ces équations (pourvu que la résistance de la pâte soit connue) est de 2,2 MPa (différence moyenne entre valeurs théoriques et valeurs expérimentales).

### Remerciements

*Les auteurs expriment leur gratitude envers E. Massieu, pour la fourniture des données relatives aux roches utilisées, et A. Trudel, pour l'analyse des faciès de rupture des éprouvettes de fendage.*

### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABRAMS L.D. 1919, (1981), *Properties of Concrete*, cité par NEVILLE A.-M., 3rd ed., Pitman.
- [2] FERET R. (1892), Sur la compacité des mortiers, *Annales des Ponts et Chaussées*, Série 7, Vol. 4, pp. 5-164.
- [3] POPOVICS S. (1990), Analysis of Concrete Strength vs. Water-Cement Ratio Relationship, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, 5, pp. 517-528.
- [4] KOKKILA A. (1989), *Interaction of Aggregates and Cement Paste in High-Strength Concrete*, RILEM 43rd General Council Meeting, Finnish Contributions, August, pp. 9-26.
- [5] AITCIN P.C., MEHTA P.K. (1990), *Effect of Coarse-Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete*, ACI Materials, March-April.
- [6] ALTNER W., RICHTER T. (1992), High-Strength Concrete - Control of the Compressive Strength, *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, Vol.2, pp. 81-85.
- [7] KANDA T., SAKURAMOTO F., SUZUKI K. (1992), *Compressive Strength of Silica Fume Concrete at Higher Temperatures*. 4th CANMET/ACI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP 132-59, Istanbul, May.
- [8] LINDGARD J., SMEPLASS S. (1992), *High Strength Concrete Containing Silica Fume - Impact of Aggregate Type on Compressive Strength and E-Modulus*, 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP 132-57, Istanbul, May.
- [9] KAKIZAKI M., EDAHIRO H. (1995), *Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of Ultra-High-Strength Silica Fume Concrete*, 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, Supplementary papers, June, pp. 493-512.
- [10] ÖZTURAN T., CECEN C. (1995), *Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of Concrete with Different Strengths*, Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, Supplementary papers, June, pp. 359-370.
- [11] DAY K.W. (1995), *Concrete Mix-Design, Quality Control and Specification*, E & FN SPON, 350 p.
- [12] DE LARRARD F. (1995), Une approche de la formulation des bétons légers de structure, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 195, pp. 39-47.
- [13] DE LARRARD F., TONDAT P. (1993), Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton, *Materials and Structures*, RILEM, Vol. 26, pp. 505-516.
- [14] STOCK A.F., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T. (1979), The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, 109, pp. 225-234.
- [15] WALKER S., BLOEM D.L. (1960), *Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete*, Journal of ACI, September.

- [16] ALEXANDER K.M. et al. (1961), *Discussions on* [15], Journal of ACI, March.
- [17] CORDON W.A., GILLESPIE H.A. (1963), *Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste Which Influence the Strength of Concrete*, Journal of ACI, August.
- [18] OGER L. (1987), *Étude des corrélations structure-propriétés des mélanges granulaires* (Study of correlations between structure and properties of granular mixtures), Thèse d'Etat, Université de Rennes, (in French).
- [19] DE LARRARD F., SEDRAN T., ANGOT D. (1994), Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. I: Fondements théoriques et calibration du modèle, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, pp. 59-70.
- [20] DE LARRARD F., HU C., SEDRAN T. (1995), *Best Packing and Specified Rheology : Two Key Concepts in High-Performance Concrete Mixture-Proportioning*, CANMET Adam Neville Symposium, Las Vegas, June.
- [21] CAQUOT A. (1937), *Rôle des matériaux inertes dans le béton*, Mémoire de la Société des Ingénieurs Civils de France, July-August.
- [22] DE LARRARD F. (1995), *Modelling the Compressive Strength of Structural Fly Ash Concrete*, 5th International ACI-CANMET Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP 153-6, Milwaukee, May.
- [23] SEDRAN T., DE LARRARD F. (1994), RENÉ-LCPC - Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil, Note technique, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **194**, pp. 87-93.
- [24] ADDIS B.J., ALEXANDER M.G. (1994), Cement-Saturation and Its Effects on the Compressive Strength and Stiffness of Concrete, *Cement and Concrete Research*, **Vol. 24**, 5, pp. 975-986.
- [25] DE LARRARD F., MARCHAND J. (1995), Discussion on ref. [24], *Cement and Concrete Research*, **Vol. 25**, 5, pp. 1124-1128.

## ABSTRACT

### The influence of the aggregate on the compressive strength of concrete

F. de LARRARD, A. BELLOC

This paper presents a theoretical and experimental study of the way in which the aggregate influences the compressive strength of concrete and makes an initial distinction between topological and mechanical properties. The first effect, known as the *confinement effect* involves both the effect of the volume of paste and the maximum particle size which are described by a simple physical parameter known as *maximum paste thickness*. This is defined as the mean distance between two adjacent coarse aggregate particles. The paper gives equations for calculating the maximum paste thickness and the effect this has on compressive strength. The second type of effect concerns bonding between the paste and the aggregate particles (*adhesion effect*). The third consists of the limitation imposed on concrete strength by the intrinsic strength of the rock (*ceiling effect*). Thirteen mixes with aggregate from 5 different sources were tested in order to compare the strength of the pure paste and mixes (mortar and concrete). The quantitative estimate of the three effects of the aggregate on the compressive strength was accurate to within 2.2 MPa for the tested mixes. This model appears to be suitable for inclusion in a mix design software program for both standard and high performance concrete.