



EFFETS DE LA FINESSE DES CIMENTS COMPOSÉS AU CALCAIRE SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS ORDINAIRES

THE FINENESS EFFECTS OF PORTLAND- LIMESTONE CEMENT ON THE PROPERTIES OF ORDINARY CONCRETE

Aidi MARZOUKI^{(1)*}, Mongi BEN OUEZDOU⁽¹⁾, Aouicha BEDDEY⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratoire de génie civil (LGC), Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis,
BP 37, 1002 Tunis Belvédère, Tunis.

⁽²⁾Académie Militaire Fondouk Jedid, 8012 Nabeul - Tunisie.

* aidi.marzouki@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Une précédente étude [1] avait montré l'influence de la qualité du broyage (finesse) de ciments aux calcaires vis-à-vis du comportement de pâtes et de mortiers, tant à l'état frais que durci. Sept ciments avaient été fabriqués industriellement par cobroyage avec le même clinker, le même sulfate de calcium et un taux croissant d'un même calcaire (de 0 à 35%). Les performances obtenues n'ont toutefois pas suivi les évolutions attendues, en raison manifestement de la qualité du broyage des ciments, qui a conduit à des produits de différentes finesses et de différentes granularités. Ces ciments ont alors été caractérisés par un « indice de broyage » égal à la surface spécifique Blaine divisée par le refus en clinker à 40 μm . Ce paramètre permet de combiner à la fois l'effet du calcaire et l'effet du broyage. En effet, le calcaire, plus tendre que le clinker, se concentre dans la fraction fine du ciment (augmentation de la surface spécifique), et l'intensité du broyage agit sur la taille des grains de clinker concentrés dans la fraction grenue du ciment [2]. Plus cet indice est élevé, alors meilleure est la qualité du broyage

du ciment [1]. Comme la réactivité d'un ciment dépend grandement de la finesse de son clinker, ce scalaire est finalement plus explicite que la teneur en fillers calcaire ou la surface spécifique Blaine du ciment. Il a permis d'obtenir de bonnes corrélations entre les propriétés obtenues.

La présente étude s'intéresse aux propriétés physico-mécaniques de différents bétons ordinaires, en relation avec la composition et, le plus souvent, la finesse du broyage des ciments au calcaire utilisés.

2. MATÉRIAUX ET PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

2.1. Ciments

L'étude présentée est basée sur les mêmes ciments que ceux utilisés précédemment par Marzouki *et al.* [1]. Rappelons qu'il s'agit de sept ciments fabriqués par cobroyage à l'échelle



Tableau 1 : Propriétés physiques et qualité de broyage des ciments

Ciment	MVA kg/m ³	SSB m ² /kg	R ₄₀ C %	R ₄₀ L %	R ₄₀ K %	IB
C0	3040	262	20,4	0,1	20,3	13
C5L	3023	264	32,8	0,9	31,9	8
C12L	2999	298	17,2	0,8	16,4	18
C20L	2972	341	17,7	1,8	15,9	21
C25L	2956	435	7,5	0,7	6,8	64
C30L	2939	474	6,1	0,9	5,2	91
C35L	2922	484	7,4	1,3	6,1	79

* MVA : masse volumique absolue

R₄₀C : pourcentage de refus à 40 µm du ciment

industrielle, en substituant une masse de clinker par du calcaire à des taux massiques de 0% (ciment de référence), 5, 12, 20, 25, 30 et 35%. Ces mélanges ont été faits sans modifier le taux de sulfate de calcium (ni la nature). Les ciments ainsi formés se classent alors dans les catégories CEM I, CEM II/A-L et CEM II/B-L de la norme EN 197-1 (classe de résistance 32,5 [1]). Ils sont désignés par C0, C5L, C12L, C20L, C25L, C30L et C35L, respectivement. La caractérisation de ces ciments est décrite dans [1] et leurs principales propriétés physiques sont reprises dans le tableau 1. Elles montrent que leur « indice de broyage » (IB), défini par le rapport entre la surface spécifique Blaine (SSB en m²/kg) et le refus en clinker à 40 µm (R₄₀K en %), est très différent selon les ciments. D'après ce critère, le ciment C30L est celui qui est le mieux broyé (IB = 91), alors que le ciment C5L est le plus grossier (IB = 8). Le ciment C20L contient le calcaire le plus grossier (refus à 40µm de nature calcaire R₄₀L=1,8%) alors que le ciment C25L renferme le calcaire le plus fin (R₄₀L=0,7%). L'indice de broyage est alors un paramètre déterminant pour repérer le comportement des ciments et des produits élaborés, de façon plus pertinente que leur teneur en fillers calcaire ou leur surface spécifique seules.

2.2. Formulation et gâchage des bétons

Notre choix s'est limité à l'étude de bétons courants et non adjuvés, formulés à partir d'un sable siliceux (SS, 0/5) et de des deux gravillons calcaires (G1, 4/12) et (G2, 10/20). Les bétons sont désignés fonction du pourcentage de fillers calcaire contenu dans le ciment par ; B0 (béton de référence), B5L, B12L, B20L, B25L, B30L et B35L. Pour le béton de référence B0 les quantités d'agréats, pour un mètre cube, sont déterminées par la méthode Dreux-Gorisse (ciment C0 = 350 kg, SS = 626 kg, G1 = 488 kg et G2 = 750 kg). Concernant les bétons à base des autres ciments, on a gardé la même nature, la même classe granulaire et le même dosage en sable et gravillons que le béton témoin. Pour les ciments, le dosage est toujours 350 kg/m³ pour toutes les formules étudiées, mais ils ne sont différenciés que par leur teneur en fillers calcaire. La quantité d'eau de gâchage est variable en fonction des différents ciments, assurant ainsi une ouvrabilité considérée comme constante et qui est caractérisée par un affaissement au cône d'Abrams A=12±1cm (classe S3 de la norme EN 206) (tableau 2).

2.3. Procédures d'essais

Trois mesures ont été réalisées sur les bétons à l'état frais, à savoir ; l'affaissement au cône d'Abrams, la masse volumique apparente par pesées des moules 16x32 cm avant et après remplissage de bétons, et la quantité d'air occlus.

Les mesures des résistances mécaniques des bétons durcis ont été effectuées sur cylindres 16x32 cm pour les résistances à la compression et des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm pour les résistances à la traction par flexion. Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau de robinet, à environ 20°C. Ces éprouvettes sont sorties du bassin de conservation une journée avant chaque échéance de mesure (3, 7, 28, 90 et 360 jours). La rectification des surfaces d'appuis des éprouvettes cylindriques (16x32 cm) a été effectuée au mortier de soufre. Les variations dimensionnelles ont été mesurées sur des éprouvettes cylindriques particulières de diamètre 71 mm et de longueur 640 mm (élancement ~ 9) afin d'augmenter la sensibilité de l'observation [4]. Des moules types « tube PVC » ont été utilisés afin de couler quatre éprouvettes pour chaque type de béton. Le démoulage commence par le démontage du système de plot (inférieur et supérieur) et le relevé de la longueur initiale [4]. Pour suivre l'évolution du retrait endogène (jusqu'à 28 jours d'âge), les extrémités libérées de deux éprouvettes ont été, immédiatement, fermées par du papier aluminium adhésif et conservées dans un local fermé et non régulé (température ≈ 20°C ; humidité relative ≈ 60%). Après 28 jours, le PVC de ces deux éprouvettes a été découpé puis conservées dans le même

Tableau 2 : Mesures sur bétons frais

Béton	Eau	E/C	Slump (mm)	Air (‰)	
				mesuré	calculé
B0	198,4	0,57	120	9,0	7,4
B5L	188,9	0,54	119	10,5	10,9
B12L	206,7	0,59	117	8,0	5,3
B20L	200,0	0,57	128	9,8	7,7
B25L	194,0	0,56	117	9,5	8,1
B30L	200,0	0,57	118	11,1	9,7
B35L	194,0	0,55	128	11,0	9,1

local du laboratoire afin de relever les retraits de dessiccation. Concernant les deux autres éprouvettes destinées à la mesure de gonflement sous eau, le découpage des PVC a été effectué après 24 heures. Ensuite, elles ont été immergées dans un bassin d'eau situé dans le même local. Ces mesures de retrait et de gonflement ont durées environ 3,5 ans.

Pour les mesures d'absorption d'eau par immersion de surface des bétons durcis, deux demi-éprouvettes 7x7x14 cm ont été prélevées à la scie dans deux éprouvettes 7x7x28cm conservées dans l'eau 28 jours, pour chaque béton. Ces demi-éprouvettes ont été séchées à l'air (température ~25 °C et humidité relative ~60%) jusqu'à masse constante (~1 mois). Les quatre faces latérales ont été scellées avec du papier aluminium adhésif, de sorte à ce que seule l'absorption unidirectionnelle soit possible. La masse initiale (m_i) a été relevée. Les éprouvettes ont été immergées sur 5mm (positionnement sur des calles en plastique) puis pesées après 5, 20, 60, 120, 240, 480 et 1 440 minutes ou 24 heures (m_j). A chaque échéance, elles ont été essuyées, pesées, puis replacées immédiatement sur leur support. Le gain massique par unité de surface dans le temps (Δm_t) et la sorptivité (A_w) sont déterminés conformément à la norme EN ISO 15148.

3. DISCUSSION DES RÉSULTATS

3.1. Bétons frais

Les résultats d'affaissements mesurés et les quantités d'eau correspondantes, rapportées à un mètre cube de béton, sont donnés par le tableau 2. Le rapport massique E/C n'a pas beaucoup varié en fonction de la quantité de calcaire, même pour les teneurs élevées en calcaire. Les valeurs restent dans l'intervalle 0,54-0,57 à l'exception de béton B12L (tableau 2). Le ciment utilisé pour la formulation du béton B5L est celui qui a subi le broyage le plus grossier (§ 2.1) et donc demande le moins d'eau. Le béton B30L à base de ciment le plus finement broyé (C30L) demande relativement plus d'eau de gâchage. Les

fillers calcaire ajoutés au ciment n'ont pratiquement pas d'effet sur la rhéologie des bétons. Ils se comportent comme le clinker broyé et seule la finesse du broyage intervient.

Les masses volumiques théoriques des bétons sont calculées à partir de la masse volumique réelle des constituants et de leurs proportions et en tenant compte de la quantité d'eau absorbée par les gravillons. Si on considère un rapport E/C constant (celui du béton de référence B0 par exemple), cette masse volumique diminue en fonction de la masse volumique du ciment (fig. 1). Par contre si on considère une densité constante pour les ciments (par exemple celle du ciment de référence C0) et un rapport E/C variable pour assurer une même consistance des mélanges, l'évolution de cette masse volumique n'est pas régulière à cause de la finesse des ciments, à l'exception de béton B12L (fig. 1). Les ciments C5L et C30L, respectivement grossier et fin conduisent à des bétons qui demandent respectivement moins et plus d'eau et donc à des masses volumiques plus forte et plus faibles que prévues. La masse volumique apparente (mesurée) des bétons frais à même consistance montre aussi une diminution avec la quantité de fillers calcaire. L'allure de l'évolution est comparable à celle de la masse volumique totale théorique (fig. 1). Sa variation est assez bien corrélée à la finesse du broyage des ciments.

La moyenne des résultats mesurés d'air occlus des bétons frais et les teneurs en air calculées à partir des masses volumiques réelles et théoriques des bétons complètent le tableau 2. Les quantités d'air occlus mesurées sont supérieures à celles calculées. L'écart maximum ne dépasse pas 3‰, ce qui peut être considéré comme très satisfaisant [4]. Conformément à Marzouki *et al.* [1], on constate alors que les fillers calcaire favorisent le piégeage de l'air dans le béton. La finesse du broyage des ciments semble, aussi, avoir un rôle certain.

3.2. Résistances mécaniques

L'évolution des résistances mécaniques (compression et traction) en fonction de la quantité de fillers calcaire est donnée respectivement fig. 2 et fig. 3. Au jeune âge (3 et 7 jours), les résistances restent généralement stables avec la quantité de

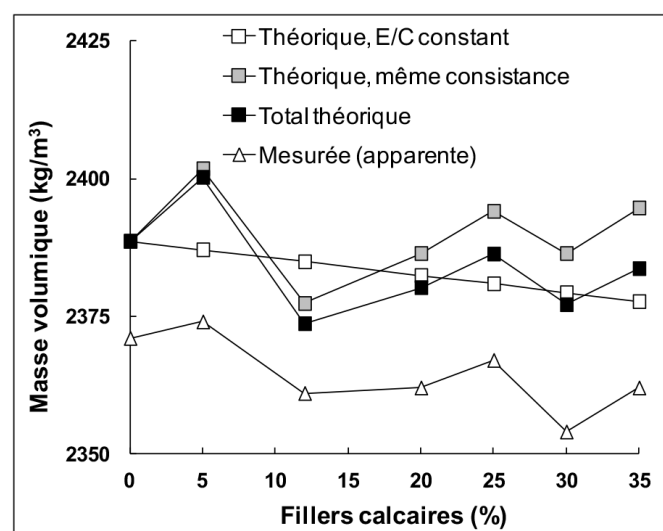


Figure 1 : Masses volumiques de bétons frais

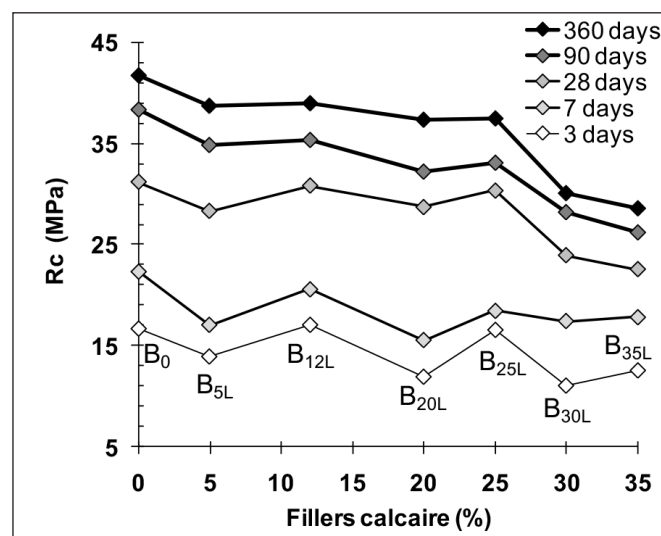


Figure 2 : Résistance à la compression en fonction de la quantité de fillers calcaire

Tableau 3 : Classes de résistance à la compression des bétons

Béton	B0	B5L	B12L	B20L	B25L	B30L	B35L
Résistance caractéristique à 28 jours (MPa)	31,2	29,0	30,8	28,8	30,4	24,0	22,5
Classe de résistance à la compression	C30/37	C25/30	C30/37	C25/30	C30/37	C20/25	C20/25
Résistance à 360 jours (MPa)	41,0	38,7	37,1	37,3	38,0	30,1	28,6
Classe de résistance à la compression	C40/45	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45	C30/37	C25/30

fillers en raison notamment de l'effet accélérateur de ces produits. La variabilité observée (figs. 2 et 3) est principalement liée à l'influence de la finesse du broyage des ciments. Avec l'âge de maturation, l'effet de cette finesse de broyage devient de plus en plus négligeable et jusqu'à 25% d'ajout fillers les performances des bétons sont sensiblement comparables. Pour les taux élevés, ces performances diminuent, en particulier, pour la résistance à la compression (fig. 2), mais en restant toutefois honorables. Ceci confirme les constatations de Marzouki *et al.* [1] concernant des mortiers réalisés avec ces mêmes ciments puisque les fillers calcaire ont un effet important et bien corrélié à la finesse du broyage sur les résistances des bétons au jeune âge. A plus long terme, un effet liant apporté par les fillers est intéressant, indépendamment de la finesse du broyage. Ces mesures de résistance mécanique permettent de définir les classes de résistance à la compression des bétons à 28 jours, selon la norme EN 206 (tableau 3). Les classes de résistance à la compression confirment nos observations précédentes. Entre 0 et 25% d'ajout fillers, les bétons présentent les mêmes classes de résistances que le béton de référence à l'exception des bétons B5L et B20L, à cause du broyage grossier des ciments. Après une année, l'effet du broyage s'estompe puisque ces différenciations ont disparu (les quatre bétons concernés ont la même classe C35/45). Pour les autres teneurs en fillers, les performances sont meilleures (pas de fillers) ou inférieures (30 et 35% de fillers). La figure 4 présente la relation obtenue entre la résistance à la traction et la résistance à la compression des bétons. Une loi de

puissance ajustée à l'ensemble des résultats donne une assez bonne satisfaction, comme d'ailleurs souvent annoncé dans la littérature [5]. Elle s'écrit :

$$R_t = 0.86 (R_c)^{0.56}$$

Les résultats sont plus dispersés pour les performances mesurées au jeune âge, traduisant ainsi l'effet de la finesse du broyage. A plus long terme, les performances sont moins dispersées et montrent que dans l'ensemble, les bétons à base de ciments avec ajouts calcaire se comportent de manière analogue à ceux de ciment sans ajout.

3.3. Variation dimensionnelle

Les résultats obtenus pour le retrait endogène et le retrait de dessiccation dans l'air ambiant du laboratoire sont présentés fig. 5. Les retraits endogènes sont faibles à l'exception de retrait de béton B35L (fig. 5). A 28 jours, le retrait du béton de référence est d'environ 40 µm/m. Jusqu'à 30% d'ajout calcaire, le retrait des autres bétons augmentent légèrement et cette hausse relative ne dépassant pas en moyenne 35 µm/m. Le retrait de béton B35L est beaucoup plus important et sa valeur dépasse 300 µm/m (fig. 5). Sur des pâtes réalisées avec les mêmes ciments de cette étude, Marzouki *et al.* [1] ont détecté, par DRX, la formation précoce de l'hémicarboaluminate et le carboaluminate à 28 jours d'âge pour les ciments contenant des taux élevés de calcaires.

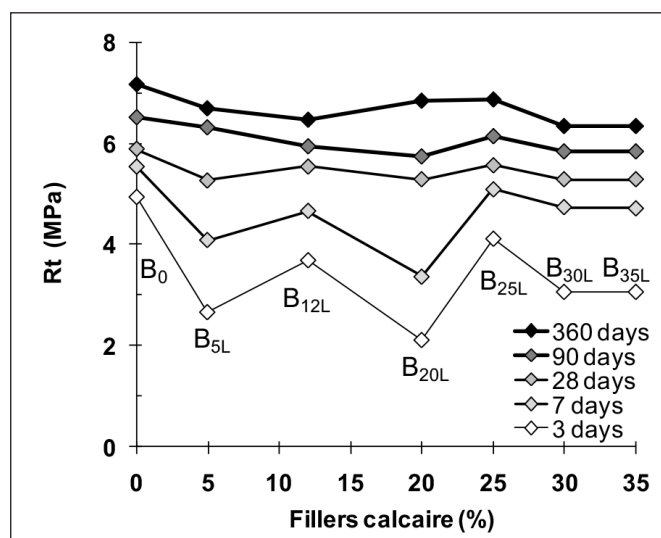


Figure 3 : Résistance à la traction en fonction de la quantité de fillers calcaire

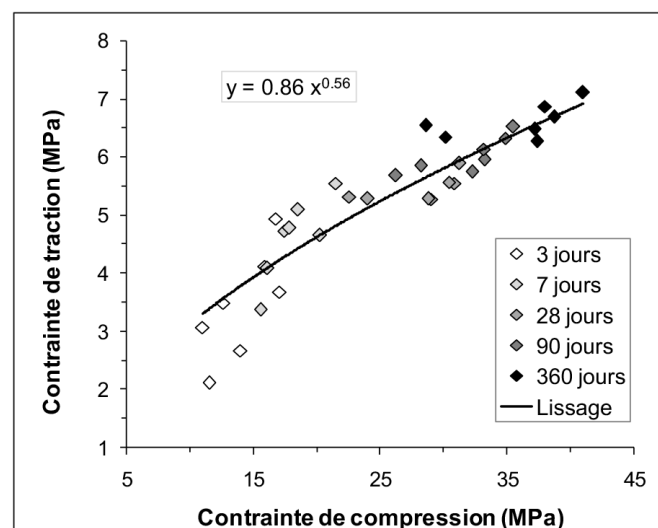


Figure 4 : Relation entre contraintes de traction et contraintes de compression des bétons

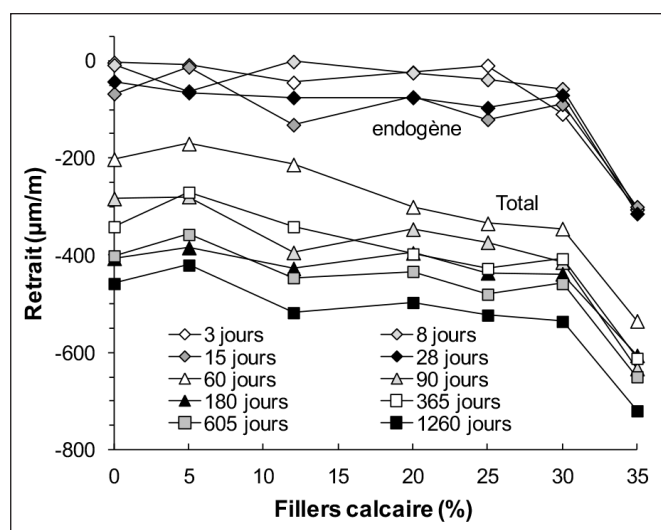


Figure 5 : Retrait (endogène/dessiccation) des bétons en fonction de la quantité de fillers calcaire

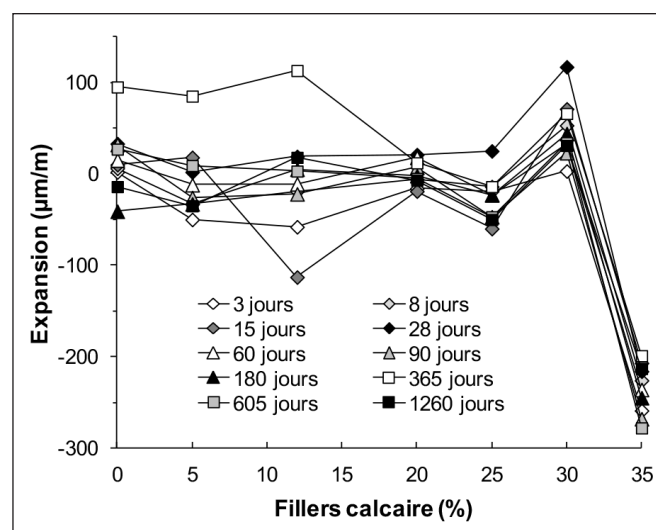


Figure 6 : Expansion dans l'eau des bétons en fonction de la quantité de fillers calcaire

Ces hydrates peuvent être la cause d'une auto-dessiccation supplémentaire et donc d'un retrait endogène plus important. Après exposition à l'air ambiant, les bétons subissent un retrait plus rapide. A plus long termes, ces retraits progressent encore légèrement. On constate un effet plus marqué de la quantité de fillers calcaire sur l'évolution des retraits de séchage (fig. 5). Il peut être attribué à la porosité induite par ce minéral ajouté [1] qui favorise en conséquence l'évaporation de l'eau libre contenue dans les bétons. L'hydratation du ciment C5L qui contient le clinker le plus grossier se poursuit dans le temps. Sa structure interne devient de plus en plus compacte et le retrait du séchage est relativement plus faible (fig. 5).

Pour les éprouvettes conservées dans l'eau, les variations dimensionnelles sont généralement semblables pour les bétons contenant jusqu'à 30% de fillers calcaire (figs. 6). Le béton de référence est celui qui présente la plus forte expansion, alors que les autres bétons présentent plus de retrait dans le temps. Les valeurs sont fluctuantes et dans l'ensemble elles n'excèdent pas les bornes de $\pm 100 \mu\text{m/m}$ (fig. 6). Ces fluctuations observées peuvent être attribuées aux variations des conditions climatiques entre hiver et été, ainsi qu'aux manifestations d'hydratation conditionnée par la présence du calcaire et de la finesse du broyage des ciments. Le béton B35L présente toujours le retrait le plus important (fig. 6). Dès trois jours, sa valeur et d'environ $250 \mu\text{m/m}$ et cette valeur fluctue faiblement ensuite dans le temps. La présence d'une grande quantité de fillers calcaire (cas du béton B35L) entraîne alors une modification de la perméabilité et des tensions capillaires internes induites par le développement d'un réseau de pores plus fins (capillaires) [6, 7]. D'autre part, la formation d'hydrates de type carboaluminate, à long termes [8, 9], consomme plus d'eau libre et provoque un assèchement des plus petits capillaires avec pour conséquence l'apparition d'un retrait.

3.4. Absorption

La Fig. 7 donne le coefficient de sorptivité A_w à 24 heures des différents bétons (gain de masse par unité de surface, en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$). Sa valeur dépend manifestement de la quantité de fillers dans le

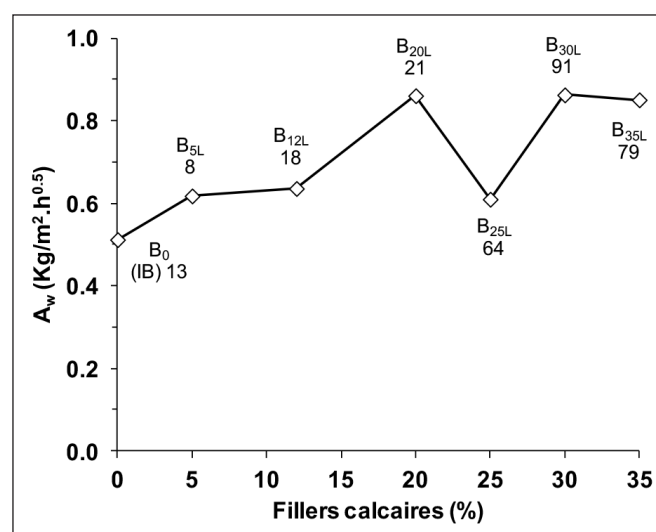


Figure 7 : Coefficient d'absorption d'eau des bétons

ciment et de la qualité du broyage. En effet, le béton B0 présente le coefficient le plus faible, bien qu'il ait une qualité de broyage médiocre, mais il ne contient pas de fillers calcaire. Le béton B20L présente le coefficient le plus élevé, pour une qualité de broyage un peu supérieure à B0, mais son ciment contient 20% de fillers. Le béton B25L a un faible coefficient, mais il est bien broyé. Les bétons B30L et B35L, qui contiennent le plus de fillers, ont des coefficients modérés car leur ciment est bien broyé. Le béton B0 contient donc moins de pores capillaires que les bétons avec les ciments aux fillers calcaire [7], pour lesquels deux familles se dégagent ; celle ayant des capillaires propices à l'absorption (B20L, B30L et B35L) et celle ayant des capillaires peu favorables à l'absorption (B5L, B12L et B25L). Ces deux familles résultent chacune d'une combinaison favorable ou défavorable entre la teneur en fillers calcaire, la qualité de broyage du ciment. Ces résultats permettent de montrer que les fillers calcaires favorisent généralement l'absorption d'eau, mais qu'un broyage adapté du ciment permet de réduire son ampleur.



4. CONCLUSIONS

A travers cette recherche on peut tirer les conclusions suivantes : Les fillers calcaires ont une action physique similaire à celle du clinker broyé, vis-à-vis de la rhéologie des bétons, et seule la finesse du broyage intervient. Ils favorisent le piégeage de l'air dans les bétons. Au jeune âge, ces fillers calcaires ont un effet important sur les résistances mécaniques et plutôt bien corrélé à la finesse du broyage. A plus long terme, l'effet de cette finesse de broyage devient de plus en plus négligeable et jusqu'à 25% d'ajout fillers les résistances des bétons sont sensiblement comparables. Pour les taux élevés, ces résistances diminuent. La quantité de fillers calcaire dans le ciment et/ou la finesse du broyage n'ont pas de conséquences particulièrement néfastes sur la stabilité dimensionnelle (retrait et gonflement). A dosage important, les fillers ont même un effet bénéfique, à cause des retraits observés dans l'eau. Pour un ajout allant jusqu'à 25% de calcaire, une diminution de l'absorption peut être apportée par une bonne finesse de broyage. Pour les taux élevés de calcaires cette absorption est toujours importante même à très bonne finesse de broyage. La finesse du broyage apparaît comme un paramètre déterminant dans le contrôle de ces propriétés. Si elle est médiocre, les résistances sont largement affectées, même en présence d'une faible quantité de fillers. Par contre, un broyage (finesse) plus poussé ne permet pas de compenser une forte présence de fillers.

Les résultats de cette recherche montrent qu'à partir d'un clinker Portland ordinaire, des ciments Portland au calcaire contenant jusqu'à 25% de fillers peuvent fournir des performances dans le temps quasi-identiques à celles du clinker Portland d'origine, sous réserve toutefois d'un broyage suffisant ou optimisé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Marzouki, A. Lecomte, A. Beddey, C. Diliberto, M. Ben Oueddou, "The effects of grinding on the properties of Portland-limestone cement," *Cons. Building Mat.*, vol48, pp 1145–1155, 2013.
- [2] S. Tsivilis, G. Batis, E. Chaniotakis, GR. Grigoriadis, D. Theodossis, "Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar," *Cem. Concr. Res.*, vol30, 1679–83, 2000.
- [3] I. Joudi-Bahri, A. Lecomte, M. Ben Oueddou, T. Achour, "Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer," *Cement & Concrete Composites.*, vol 34, pp 771–780, 2012.
- [4] I. Joudi-Bahri, "Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien," Thèse de Doctorat, Université de Lorraine-France et l'Ecole National d'Ingénieur de Tunis, 2012.
- [5] M. A. Neville, *Properties of concrete*, England: Addison Wesley Longman, 1996.
- [6] P. Pipilikaki, M. Beazi-Katsioti, "The assessment of porosity and pore size distribution of limestone Portland cement pastes," *Construction and Building Materials.*, vol 23, pp 1966-1970, 2009
- [7] Y. Benachour, C. A. Davy, F. Skoczylas, H. Houari, "Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar," *Cement and Concrete Research.*, vol38, pp727-736, 2008.
- [8] B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gallucci, K. Scrivener, "Influence of limestone on the hydration of Portland cements," *Cement and Concrete Research.*, vol38, pp 848–860, 2008.
- [9] N. Voglis, G. Kakali, E. Chaniotakis, S. Tsivilis, "Portland-limestone cements; Their properties and hydration compared to those of other composite cements," *Cement & Concrete Composites.*, vol 27, pp 191–196, 2005.