

This article was downloaded by: [197.204.39.64]

On: 19 March 2014, At: 11:39

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



European Journal of Environmental and Civil Engineering

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tece20>

Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons

Salim Guettala ^a & Bouzidi Mezghiche ^b

^a Département de génie civil , Université de Djelfa , 17000 , Djelfa , Algérie E-mail:

^b Laboratoire de recherche en génie civil LRGCB , Université de Biskra , 07000 , Biskra , Algerie

Published online: 30 Jan 2012.

To cite this article: Salim Guettala & Bouzidi Mezghiche (2011) Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 15:10, 1483-1507, DOI: [10.1080/19648189.2011.9723355](https://doi.org/10.1080/19648189.2011.9723355)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2011.9723355>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons

Salim Guettala* — Bouzidi Mezghiche**

* Département de génie civil, Université de Djelfa
17000 Djelfa, Algérie
guettalasalim@yahoo.com

** Laboratoire de recherche en génie civil LRGCB, Université de Biskra
07000 Biskra, Algérie

RÉSUMÉ. Les ciments avec additifs permettent non seulement de réduire les coûts de production mais aussi de régler certains problèmes environnementaux en plus d'offrir au béton de meilleures performances. Ce travail expérimental a porté essentiellement sur l'étude de la possibilité d'utiliser le sable de dune en poudre comme addition partielle en masse au ciment Portland. L'incorporation du sable de dune en poudre, sous forme de substitution au ciment Portland permet d'obtenir une nouvelle variété de ciment composé ayant des propriétés physico-mécaniques supérieures à celles du ciment Portland. Les résultats obtenus montrent que la contribution de l'addition du sable de dune en poudre à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de trois effets : physique, physico-chimique et chimique. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les propriétés des bétons.

ABSTRACT. Cements with additions will not only reduce production costs but also to solve some environmental problems in addition to offering better performance to concrete. This experimental work has focused on studying the possibility of using dune sand powder as part addition to Portland cement. The incorporation of dune sand powder as an alternative to Portland cement yields a new variety of cement compound with physico-mechanical properties superior to those of Portland cement. The results obtained show that the contribution of addition dune sand powder to the cement binding activity results primarily from three effects: physical, physico-chemical and chemical. These effects act simultaneously and in a complementary way on the properties of concrete.

MOTS-CLÉS : ciment Portland, addition, sable de dune en poudre, ciment composé, propriétés des bétons.

KEYWORDS: Portland cement, addition, dune sand powder, cement compound, properties of concrete.

DOI:10.3166/EJECE.15.1483-1507 © 2011 Lavoisier, Paris

1. Introduction

La société et les pouvoirs publics sont de plus en plus intransigeants vis-à-vis des problèmes de pollution occasionnés par le gaz carbonique dégagé et par la forte consommation de matières premières et d'énergie lors de la fabrication du ciment. La recherche d'un ciment moins coûteux en utilisant des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour pallier au déficit dans la fabrication du ciment. Depuis 1970, un grand effort de recherches a été fourni sur l'utilisation des additifs cimentaires en tant que substitution partielle au ciment Portland. Ces additifs proviennent de sources naturelles ou de sous-produits d'autres industries (Menendez *et al.*, 2003). Les additifs présentent une activité liante croissant avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance (Bessa, 2004). La compacité de la pâte de ciment peut être améliorée par la formation des silicates de calcium hydratés CSH II. Ces derniers s'obtiennent par introduction de fines particules siliceuses dotées d'un rôle pouzzolanique certain et contribuent à l'augmentation de la résistance et de la durabilité des bétons (Aïtcin, 2001). Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes. Benezet (1997), Cyr *et al.* (2006), Kara Ali (2002), Lawrence *et al.* (2003, 2005) s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions :

– un effet granulaire favorable qui conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante, soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci (Felekoglu *et al.*, 2006). De même Kronlof (1994) a montré en étudiant l'effet des agrégats ultrafins sur la résistance du béton, que l'incorporation dans le béton de trois additions de quartz de finesses différentes conduit à la diminution du besoin en eau en relation avec la quantité et la finesse ;

– un effet physico-chimique qui agit sur l'évolution de l'hydratation au cours de la prise et du durcissement et sur les propriétés physiques des matériaux cimentaires durcis. D'autres auteurs expliquent que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace (Cyr *et al.*, 2006 ; Lawrence *et al.*, 2005). Dans le même sens, Care *et al.* (2002) ont également montré, en étudiant l'effet des additions minérales inertes sur l'hydratation des mortiers, que le degré d'hydratation à court terme des mortiers contenant des additifs chimiquement inertes était toujours plus important que celui des mortiers de référence, et ont ainsi confirmé l'amélioration de l'hydratation du ciment avec des additions minérales inertes. Dans le même contexte, les additions minérales jouent un rôle de sites de nucléation au cours des réactions du ciment. Cette nucléation qui est un processus

physique, engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment qui dépend de la finesse des particules d'additions, de la quantité d'additif dans le mélange et de la nature de la poudre d'addition avec les hydrates de ciment (Lawrence *et al.*, 2003 ; Cheng-Yi *et al.*, 1985). L'effet physico-chimique concerne d'une façon générale tous les additifs minéraux indépendamment de leur nature minéralogique ;

– un effet chimique propre à certains additifs en milieu cimentaire, qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique. L'effet chimique est intimement lié à leur composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolanique et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment (Kara Ali, 2002). De même Benezet et Benhassaine (1999) ont montré en étudiant l'influence de la taille des particules de quartz dans la réaction pouzzolanique, que le quartz cristallisé en poudre, peut réagir avec la portlandite pour former des hydrates stables. La réactivité des poudres de quartz, mesurée dans un milieu statique (non activé) thermiquement (essai à 20 °C), attribuée jusqu'à présent à une amorphisation de la surface des grains, résulte de la présence de grains très fins adsorbés sur la surface des grains plus gros. Dans le même sens, l'analyse par diffractométrie aux rayons X a mis en évidence le rôle pouzzolanique du sable de dune en poudre (SDP). En effet, la faible quantité de portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence de SDP traduit la réaction pouzzolanique partielle, qui contribue à l'augmentation de la résistance mécanique et qui améliore la compacité de la pâte, et montre aussi que le SDP est constitué de minuscules grains de quartz SiO₂ bien cristallisé du type low-quartz (Arroudj et Oudjit, 2002 ; Arroudj *et al.*, 2004). Contrairement aux résistances mécaniques à 7 jours, les résistances mécaniques à 90 jours, des bétons à base d'addition de SDP par substitution dépassent celles du béton témoin, ce qui signifie que cette addition a un rôle pouzzolanique qui se traduit par la formation de silicate de calcium hydraté CSH II de deuxième génération. La cinétique de formation de CSH II par les additions dépend de leur finesse de leur teneur en silice et plus particulièrement de leur structure (Arroudj *et al.*, 2004).

Le sable de dune est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. La contribution de l'addition du sable de dune en poudre SDP à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de deux effets : un effet physico-chimique et un effet chimique. Son rôle est d'une part de modifier le processus d'hydratation du ciment ainsi que la structuration des produits hydratés et, d'autre part, de réagir en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés.

Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les propriétés des bétons. Le troisième effet physique est l'effet granulaire relatif aux modifications induites par la présence des particules fines dans le squelette solide du mélange.

A la lumière de ce qui a été évoqué précédemment, l'objectif recherché est d'évaluer expérimentalement la contribution combinée des effets physique, physico-chimique et chimique de l'addition du sable de dune en poudre sur les propriétés physiques, mécaniques et la déformabilité des bétons.

2. Matériaux

Il s'agit ici d'un broyage du sable de dune et de clinker. Le broyage est effectué à l'aide d'un broyeur conventionnel à boulets, après en procède au tamisage.

2.1. *Sable de dune en poudre*

Le choix d'une addition par rapport à une autre est en général, après la disponibilité locale à des coûts acceptables, fait en fonction de la teneur élevée en silice. Nous avons utilisé un sable de dune de la région de Biskra.

2.1.1. *Analyse chimique*

Les analyses chimiques sont effectuées au niveau du laboratoire de la cimenterie de Ain Touta (Batna), elles sont présentées dans le tableau 1. Du point de vue chimique la constatation importante à signaler est la présence d'un fort pourcentage en silice SiO_2 qui est supérieur à 74 %, et par conséquent le sable de dune de Biskra est un sable siliceux.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Cl	PAF
74,61	1,35	0,86	17,3	0,29	0,04	0,47	0,005	5,04

Tableau 1. *Analyse chimique du sable de dune en poudre en (%)*

2.1.2. *Nature minéralogique*

L'analyse par diffractométrie aux rayons X utilisant la méthode des poudres, trouve son principal emploi dans la détermination des minéraux. Chaque corps cristallin produit en effet un spectre ou diffractogramme X qui rend compte de sa structure interne et de la nature des minéraux. A cet effet, nous avons analysé par diffractométrie aux rayons X le sable de dune en poudre, pour mettre en évidence sa nature minéralogique. Les résultats de l'essai sont représentés sur la figure 1.

Par la suite, nous avons suivi la cinétique de fixation de la chaux en fonction du temps des mélanges en pâtes préalablement conservés dans des tubes en PVC à 20 ± 1 °C fermés hermétiquement.

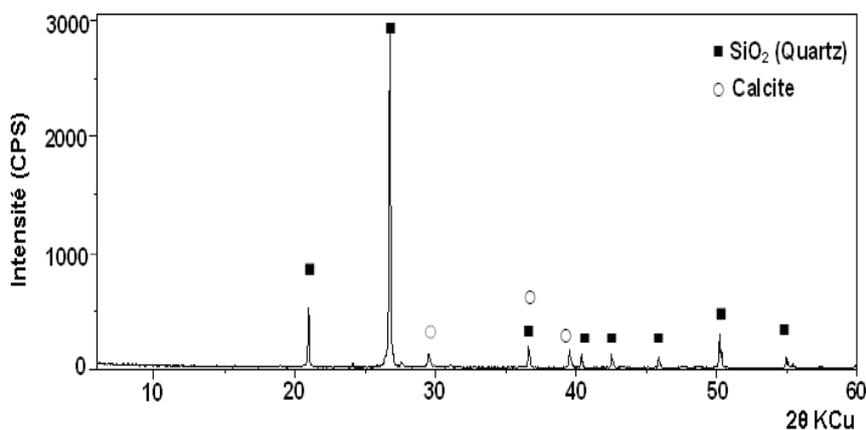


Figure 1. *Diffractogramme des rayons X (sable de dune en poudre)*

La figure 1, montre que le SDP présente une structure siliceuse cristallisée du type low-quartz.

La silice cristalline présente une structure tridimensionnelle régulière, le motif de base est un tétraèdre dont chacun des sommets est occupé par un atome d'oxygène et le centre par un atome de silicium. (Bouchouika, 2002). D'après de Larrard (1988) aucune ultrafine n'est inerte. Ainsi le quartz broyé réputé cristallin est amorphisé en surface. Ils peuvent donc s'associer à la chaux selon la réaction pouzzolanique classique. Le SDP qui est siliceux, peut donc avoir les mêmes avantages physiques et pouzzolaniques que les autres additions, malgré son caractère cristallin (Pascal, 1965).

2.1.3. Propriétés physiques

Masse volumique apparente = 1300 kg/m³

Masse volumique des grains = 2770 kg/m³

Surface spécifique BLAINE SSB = 4000 cm²/g

2.2. Ciment Portland

Le ciment utilisé est un ciment Portland CEM I de classe 42,5 MPa. Il résulte du broyage du clinker avec environ 5 % du gypse, pour la régularisation de la prise. Le clinker est celui de la cimenterie d'Ain-Touta (Batna).

2.2.1. Analyse chimique et minéralogique

L'analyse chimique du clinker montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301 à savoir : % (MgO + CaO (libre)) < 5 %. La composition minéralogique potentielle

du clinker est calculée selon la formule empirique de Bogue (1955). Elle est indiquée dans les tableaux 2 et 3.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R.I	CaO libre	SO ₃	PAF
22,00	5,02	2,94	64,36	2,07	0,73	0,30	1,94	0,64

Tableau 2. Composition chimique du clinker (en %)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
51,28	24,68	8,33	8,94

Tableau 3. Composition minéralogique du clinker (en %)

2.2.2. Propriétés physiques

Masse volumique apparente = 1120 kg/m³
 Masse volumique des grains = 3050 kg/m³
 Surface spécifique BLAINE SSB = 3200 cm²/g

2.3. Eau

L'eau utilisée est l'eau potable (eau du robinet) qui contient peu de sulfate et dont la température est de 20 ± 1 °C, sa qualité est conforme aux prescriptions de la norme NFP 18-404. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau sont portés dans le tableau 4.

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₂	NO ₃	Insol	PH
116	36	80	3	140	170	305	5	786	7,9

Tableau 4. Analyse chimique de l'eau en (mg/l)

2.4. Sable

Le sable utilisé provient de la région de Biskra (rivière d'Oued-Djedi). La courbe granulométrique du sable s'inscrit dans le fuseau recommandé. L'analyse granulométrique est donnée sur la figure 2.

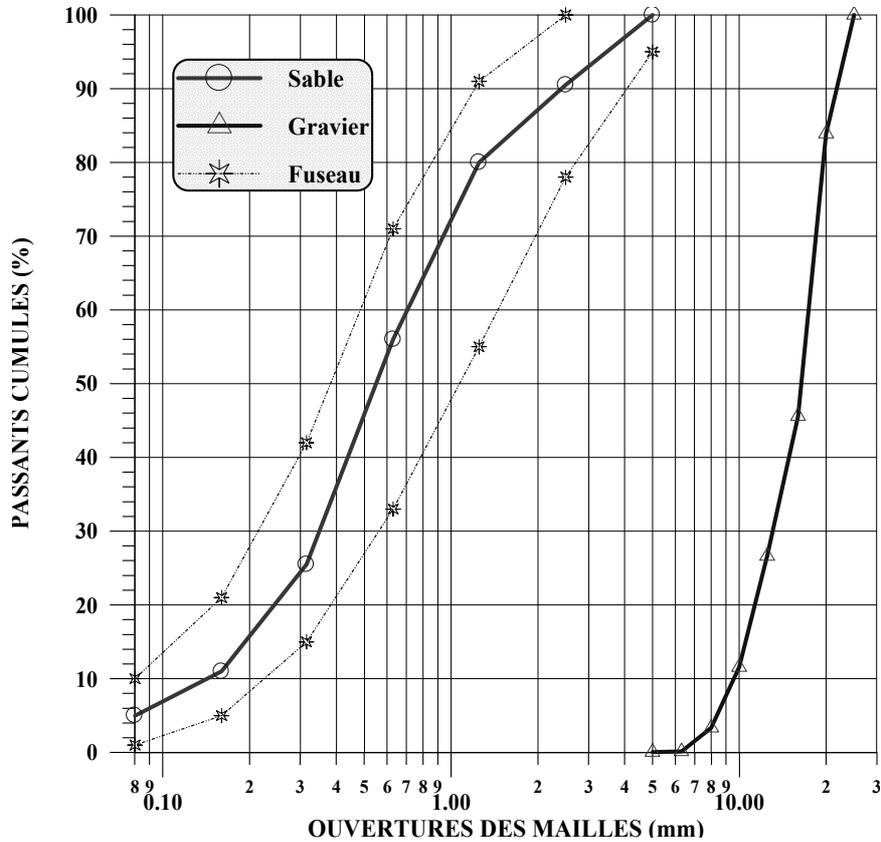


Figure 2. Courbe granulométrique du sable et gravier

Propriétés physiques

Masse volumique apparente	= 1440 kg/m ³
Masse volumique des grains	= 2500 kg/m ³
Module de finesse	= 2,37 (préférentiel)
Equivalent de sable (ES à vue)	= 73 (sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante)
Equivalent de sable (ES piston)	= 68

2.5. Gravier

Nous avons utilisé des pierres concassées de fractions 7/15 et 15/25 de la région de AIN-TOUTA (Batna). La courbe granulométrique est présentée sur la figure 2.

Propriétés physiques

Masse volumique apparente = 1420 kg/m³

Masse volumique des grains = 2610 kg/m³

Coefficient de Los Angeles = 21 % (dur)

3. Résultats et discussions**3.1. Réactivité pouzzolanique du sable de dune en poudre**

Ce travail consiste à analyser par diffractométrie aux rayons X (DRX) l'évolution de l'hydratation des pâtes de ciment Portland à base du SDP. Afin de mieux cerner l'effet pouzzolanique de cette addition dans les pâtes de ciment, nous avons suivi l'hydratation des mélanges en pâtes (50 % chaux + 50 % SDP). Cette étude est une approche simplifiée de celle des pâtes de ciment (80 % CEM I + 20 % SDP) dans lesquelles la réaction principale est la fixation de la chaux, provenant de l'hydratation du ciment, en présence du SDP (réaction pouzzolanique). A un âge donné, une partie de la pâte est broyée en une poudre très fine, dont le diamètre maximum des grains est inférieur à 40 µm, pour être testée par DRX.

3.1.1. Évolution de l'hydratation des mélanges (50 % chaux + 50 % SDP)

L'évolution de la réaction pouzzolanique en fonction du temps a été étudiée par diffractométrie aux rayons X sur des pâtes contenant 50 % chaux pure + 50 % SDP.

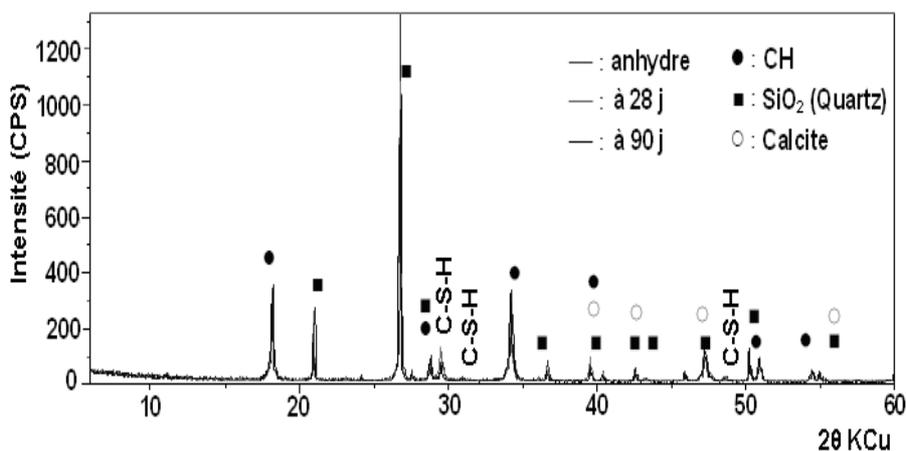


Figure 3. Hydratation des pâtes aux différents âges (50 % chaux + 50 % SDP)

Les diffractogrammes X de la figure 3 montrent que l'intensité des raies de la chaux ($d = 4,9 \text{ \AA}$, $d = 2,62 \text{ \AA}$ et $d = 1,92 \text{ \AA}$) diminue en fonction du temps, ce qui indique la fixation de la chaux par les grains de silice pour former du silicate de calcium hydraté CSH II semi-cristallisé de deuxième génération (réactivité pouzzolanique partielle du SDP).

3.1.2. Évolution de l'hydratation des mélanges (80 % CEM I + 20 % SDP)

De la même manière, nous avons suivi par diffractométrie aux rayons X l'évolution de l'hydratation des mélanges sous forme de pâtes (80 % CEM I + 20 % SDP) en fonction du temps. Les modifications des cinétiques d'hydratation du ciment, en présence du SDP sont mises en évidence par DRX.

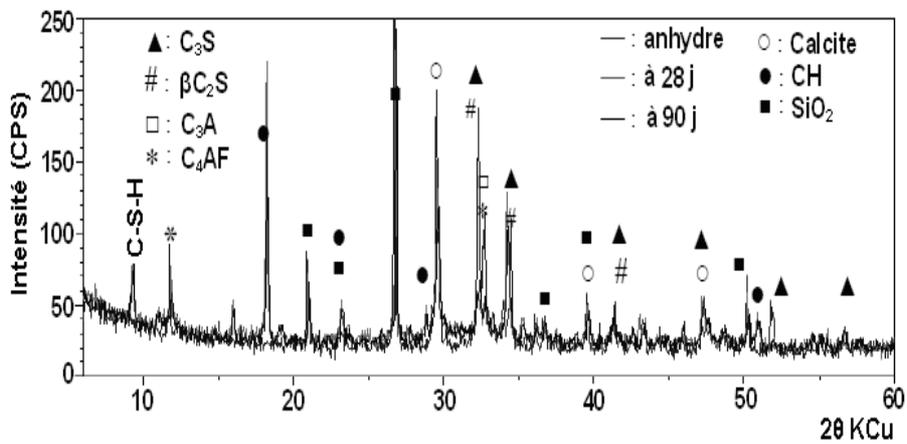


Figure 4. Hydratation des pâtes à différents âges (80 % CEM I + 20 % SDP)

Les diffractogrammes X de la figure 4 conduit aux observations suivantes :

- à 28 jours d'hydratation les raies de chaux CH et de silicate de calcium hydraté CSH apparaissent, et l'intensité des raies de C_3S et βC_2S diminue ce qui indique l'hydratation des silicates de calcium ;

- en présence du SDP et à 28 jours d'hydratation les intensités des raies du quartz diminuent comparativement à celles du mélange anhydre, donc la réaction pouzzolanique partielle du SDP, ce qui confirme les résultats trouvés précédemment ;

- à 90 jours d'hydratation les intensités des raies de chaux et des minéraux du ciment, de même que celle du quartz, diminuent d'une manière significative, ce qui montre l'effet pouzzolanique partiel du SDP.

3.1.3. Influence de la teneur en sable de dune en poudre

La superposition des diffractogrammes X montre que le sable de dune en poudre ne modifie pas la nature des hydrates après 14 jours d'hydratation.

La figure 5 montre que la portlandite formée lors des réactions d'hydratation du ciment en présence du SDP a été partiellement consommée. En effet, le pic correspondant a diminué par rapport à celui du référence (pic apparaissant à $9^\circ \theta_{Cu K\alpha}$ soit P centré à la distance réticulaire $d = 4,9 \text{ \AA}$). Le choix de cette raie est lié au fait qu'elle est distincte de celles des autres minéraux. Plus le pourcentage du SDP contenu dans la pâte augmente, plus l'intensité de la raie correspondant à $4,9 \text{ \AA}$ augmente. Ce résultat confirme que le SDP n'est pas inerte et participe à la formation de nouveaux CSH II qui rendent la pâte plus dense et plus compacte.

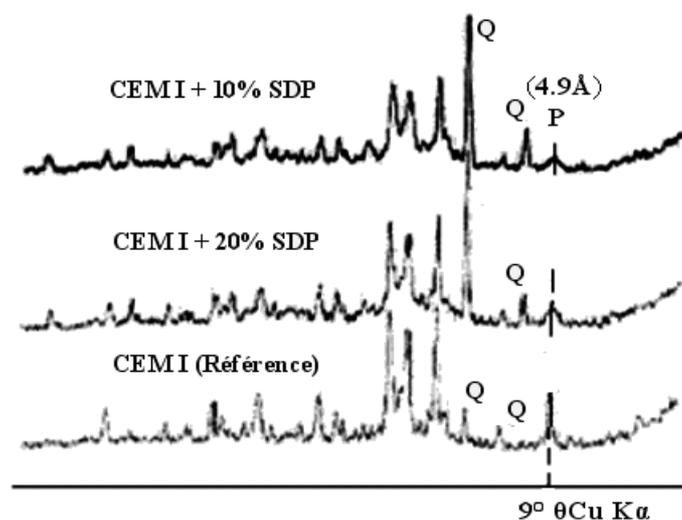


Figure 5. Diffractogrammes X des pâtes de ciment en présence du SDP à 14 jours

3.2. Propriétés physiques des pâtes

Le choix de la composition optimale de ciment prémélangé avec le sable de dune en poudre est fonction des critères physiques. Nous avons étudié la consistance normale, la prise et la stabilité volumique.

3.2.1. La consistance et la prise

Les pâtes du ciment sont préparées dans un malaxeur normalisé EN 196-1 en suivant le mode opératoire indiqué par la norme EN 196-3 relative à la consistance normale des pâtes pures. La consistance ainsi que les temps de début et de fin de prise sont donnés par le tableau 5.

Essais (T = 27°C)	CEM I + SDP %				
	0 %	5 %	10 %	15 %	20 %
Consistance normale (%)	27	26,7	26,5	26,3	26
Début de prise (min)	95	100	105	105	105
Fin de prise (min)	240	229	227	225	225
Gonflement à chaud (mm)	1,20	1,15	1,10	1,10	1,10

Tableau 5. *Propriétés physiques des pâtes*

D'après les résultats on remarque que la teneur en SDP % n'a pas engendré de modifications significatives sur le temps de prise des pâtes de ciment. Par contre l'addition diminue considérablement les consistances initiales (les pâtes deviennent plus fluides). Pour diminuer la demande en eau, il faut augmenter les proportions en petites et grosses particules afin de diminuer les vides intergranulaires.

Du fait de leur finesse supérieure à celle du ciment CEM I on remarque dans le tableau 5 que l'addition de SDP remplit les vides intergranulaires et diminue la demande en eau, donc le SDP joue un rôle de lubrifiant.

3.2.2. *La stabilité volumique*

La réaction d'hydratation est accélérée par un traitement thermique de la pâte, de façon à pouvoir observer l'expansion (gonflement) éventuelle du ciment dans un délai très court. Un essai permet de s'assurer que le ciment ne contient pas de substances susceptibles de provoquer une expansion dangereuse au cours du temps. Cet essai consiste à mesurer l'écartement des extrémités des deux aiguilles de l'appareil de Le Châtelier. D'après le tableau 5, le ciment prémélangé du SDP présente une bonne stabilité volumique parce que les valeurs de gonflement à chaud sont inférieures à 10 mm.

3.3. *Résistance en compression des ciments*

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages de sable de dune en poudre SDP et l'influence du rapport $(E/(C + SDP) = 0,4, 0,3 \text{ et } 0,25)$ sur la résistance en compression des pâtes du ciment, on a choisi quatre pourcentages en masse (5 %, 10 %, 15 % et 20 %) pour les additionner au ciment CEM I et obtenir une nouvelle variété de ciment composé (optimisation de la teneur du ciment en SDP). On a utilisé des éprouvettes cubiques de $(2 \times 2 \times 2) \text{ cm}^3$ en pâte pure à raison de six éprouvettes par essai. La confection des éprouvettes est réalisée conformément aux modalités des normes NFP 18-404 et NFP 18-405. Le durcissement étant en conditions naturelles, on soumet les éprouvettes à une cure

dans l'eau potable à 20 ± 1 °C (Mezghiche, 2005). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 6 et 7.

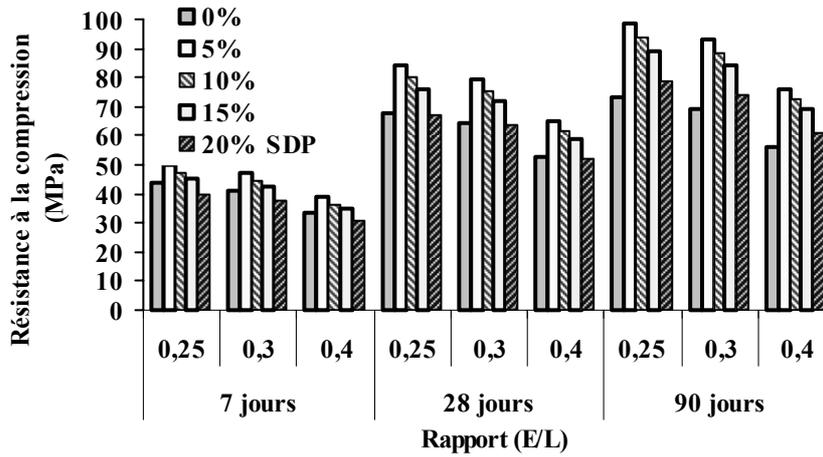


Figure 6. Variation de la résistance à la compression en fonction du rapport E/L à 7, 28 et 90 jours

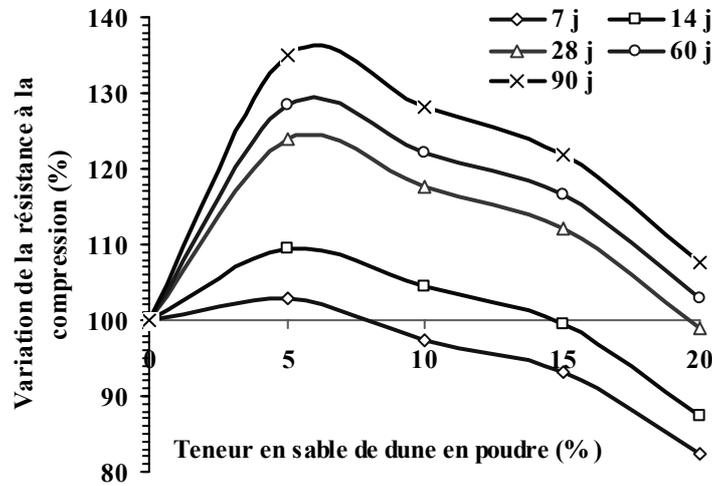


Figure 7. Variation de la résistance à la compression en (%) par rapport à la pâte de référence en fonction de la teneur en sable de dune en poudre (E/L = 0,25)

D'après ces résultats, on remarque que l'augmentation de la résistance du CEM I seul à 28 et 90 jours, par rapport à celle à 7 jours, est de 56 % et 68 % respectivement ; l'augmentation de résistance des ciments à 5 et 20 % de sable de dune en poudre est de 69 % à 28 jours et 97 % à 90 jours, ce qui traduit le rôle chimique joué par le SDP à long terme, donc confirme l'activité pouzzolanique.

Les résistances en compression augmentent lors de la substitution du ciment par le sable de dune en poudre, traduisant ainsi l'amélioration de la compacité par trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire :

- effet physique : amélioration de la consistance du mélange frais (les pâtes deviennent plus fluides) ;

- effet physico-chimique : un processus physique, qui dépend de la quantité et de la finesse du SDP, engendre une activation chimique de l'hydratation du ciment et agit sur l'évolution des résistances en compression aux jeunes âges ;

- effet chimique : la chaux fournie dans le cas du ciment Portland est consommée par la réaction pouzzolanique du fait de l'addition du SDP au ciment, et ceci améliore les résistances en compression des pâtes du ciment à moyen et surtout à long terme.

D'après les résultats obtenus, on remarque que le ciment avec 5 % SDP présente la résistance maximale à la compression avec un rapport $E/(C+SDP) = 0,25$. En ajoutant 20 % SDP par rapport à la masse totale du ciment on obtient une résistance à 28 jours comparable à celle d'un ciment de référence CEM I.

On peut observer globalement qu'au bout de 28 jours, la résistance en compression à 5, 10 et 15 % de SDP est supérieure à celle du ciment de référence CEM I. Le sable de dune en poudre SDP joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20 % avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10 %.

Concernant l'effet du rapport $E/(C+SDP)$, on voit nettement que la résistance de toutes les pâtes de ciment durcies à tout âge décroît avec l'augmentation du rapport $E/(C+SDP)$, ce qui explique que les pâtes du ciment avec $E/(C+SDP)$ faible développent très rapidement leur résistance à la compression par une concentration élevée en CSH.

3.4. Mortier normalisé

Dans cette partie, nous présentons des essais de compression, flexion, traction par flexion. Le sable utilisé pour la confection du mortier est un sable normalisé, la quantité d'eau a été ajusté jusqu'à obtenir une maniabilité de référence. La maniabilité de référence a été choisie correspondant à un étalement de 111 mm sur la table à secousses.

Les éprouvettes sont conservées dans un environnement humide (20 ± 1 °C et 95 % HR) et ce, jusqu'à la réalisation de l'essai de flexion. Les deux bouts de chaque

épreuve seront testés en compression afin de déterminer la résistance du mortier. Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, à raison de trois éprouvettes par essai (Mezghiche, 2005).

Les résistances à la compression des différents mortiers MR, M10, M20 sont déterminées par écrasement selon la norme NF EN 196-1. Les résultats de compression, flexion et traction par flexion à 28 jours, sont illustrés sur la figure 8.

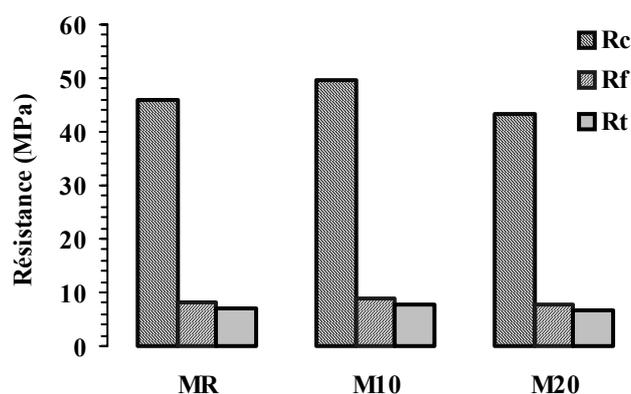


Figure 8. Résistance des mortiers à la compression, flexion et traction à 28 jours

Le mortier M10 à base de CEM I + 10 % SDP présente une résistance à la compression supérieure à celle du mortier M20 et du mortier de référence MR à base de CEM I.

L'effet du sable de dune en poudre sur la résistance à la flexion et à la traction par flexion est similaire à celui sur la résistance à la compression.

3.5. Étude des bétons

3.5.1. Formulation

L'optimisation de la formulation des bétons s'appuie sur plusieurs critères qui doivent faire l'objet d'un compromis: la consistance, la résistance, la durabilité et l'économie.

Devant la multiplicité des méthodes utilisées pour déterminer la composition des bétons, on a utilisé celle qui donne des résultats exacts et qui semble être la moins connue. C'est la méthode de Scramtaiv. Cette méthode repose sur le fait que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un mètre cube est égale au volume de la composition du béton damé (Mezghiche, 2005).

On désire réaliser un béton dont la résistance moyenne $R_{b28j} = 35$ MPa et dont la consistance est telle que son affaissement au cône soit de 7 cm. Dans tous les essais le rapport $E/L \geq 0.4$, $A = 0.6$, $D_{\max} = 25$ mm et $S/G = 0.42$. Les compositions des trois mélanges de bétons sont reportées dans le tableau 6.

Constituants	Bétons		
	BO	B10	B20
Eau/liant	0,52	0,49	0,46
Ciment CEM I	350	315	280
Sable 0/5	538	538	538
Gravier 7/15	446	446	446
Gravier 15/25	828	828	828
10 % SDP	-	35	-
20 % SDP	-	-	70

BO : Béton ordinaire à base de CEM I

B10 : Béton à base de CEM I + 10 % SDP

B20 : Béton à base de CEM I + 20 % SDP

Tableau 6. Compositions des bétons en (kg/m^3)

3.5.2. Propriétés physiques des bétons

3.5.2.1. Consistance

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant prise et durcissement. Parmi ces propriétés, la consistance qui peut se définir comme la facilité de la mise en oeuvre des bétons. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams norme NF P 18-451 est actuellement en usage dans le monde entier ; il fournit des mesures fiables, de variabilité restreinte. En fonction des affaissements obtenus, la classe de consistance des différents bétons est plastique (l'affaissement varie de 5 à 9 cm).

3.5.2.2. Porosité volumique

Gallé (2001) indique que la porosimétrie à l'eau peut être une méthode plus réaliste que la porosimétrie par intrusion de mercure. En effet, la porosimétrie à l'eau prend en compte la micro-porosité capillaire (c'est-à-dire les pores dont le diamètre moyen est compris entre 0,8 et 2 μm) ainsi que la porosité des CSH (volume interfoliaire) car l'eau peut pénétrer dans des espaces d'une taille de 0,5 μm . A partir du volume de l'éprouvette, on peut alors calculer sa porosité volumique représentant le rapport de son volume poreux à son volume total.

Sur une base expérimentale, soit par la pesée hydrostatique d'une éprouvette saturée, on détermine alors le volume total de l'éprouvette (fraction poreuse et solide) et on calcule ainsi sa porosité volumique, $\varepsilon_{\text{expé}}$ à partir de la relation suivante :

$$\varepsilon_{\text{expé}} (\%) = ((M_{\text{sss}} - M_{\text{sèche}}) / (M_{\text{sss}} - M_{\text{eau}})) \times 100 \%$$

Où :

$\varepsilon_{\text{expé}}$: Porosité volumique établie expérimentalement par pesée hydrostatique, excluant le volume d'air piégé et/ou entraîné (%).

M_{sss} : Masse de l'éprouvette saturée, superficiellement sèche (g).

$M_{\text{sèche}}$: Masse sèche de l'éprouvette (g).

M_{eau} : Masse de l'éprouvette saturée, superficiellement sèche, pesée dans l'eau (g).

La procédure d'évaluation de la porosité est la suivante : Les éprouvettes sont séchées dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures, puis immergées dans l'eau pendant 48 heures, l'échantillon est mis ensuite dans un bain d'eau bouillante pendant 5 heures, les éprouvettes sont retirées pour être pesées à l'air et à l'eau (pesée hydrostatique).

La méthode utilisée dans ce test est celle établie par ASTM désignation C 624. (AFPC-AFREM, 1997). La porosité est estimée après 28 et 180 jours de durcissement sur des éprouvettes cubiques de $(10 \times 10 \times 10)$ cm³. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 9.

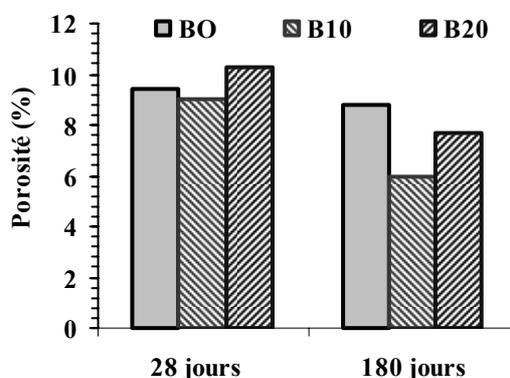


Figure 9. Porosité accessible à l'eau des bétons en fonction du temps

La porosité du matériau est le premier indicateur de la durabilité, car la porosité est le siège des agressions extérieures : plus le matériau est poreux, plus la

pénétration d'agents est facilitée, et donc plus sa durabilité est limitée. Les résultats montrent que :

- à 28 jours de durcissement, la porosité du béton B10 est inférieure à celle des autres bétons, ce qui est expliqué par la bonne qualité de l'interface mortier/gravier ;

- à 180 jours, la porosité diminue pour atteindre les valeurs représentées sur la figure 9, l'addition du 10 % SDP a provoqué une réduction de 46 % de la porosité par rapport à celle du béton ordinaire. Les bétons améliorent leur porosité à long terme, ce qui confirme la continuation des réactions d'hydratation, conduisant ainsi au développement de la structure interne par la production de nouveaux produits d'hydratation qui précipitent pour fermer les pores déjà existant dans la structure, en faisant diminuer le nombre de gros pores et augmenter celui des petits pores.

3.5.2.3. Interface mortier/gravier

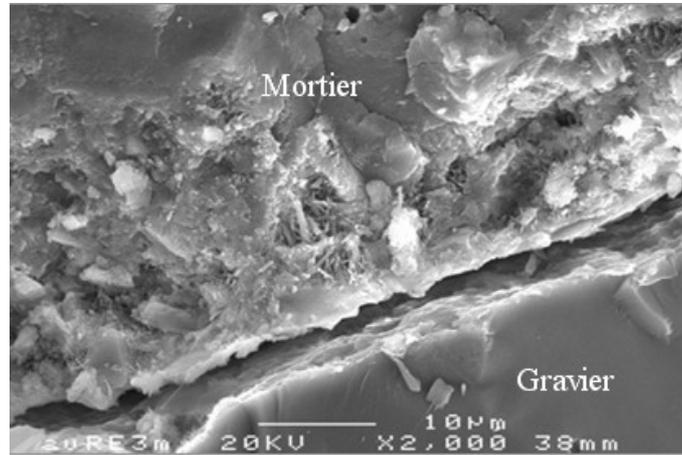
L'interface mortier/gravier est souvent décrite comme une zone dont l'épaisseur, variable de 10 à 50 μm , dépend principalement des propriétés pouzzoloniques des additions minérales. Cette zone présente une forte porosité ce qui induit des caractéristiques mécaniques médiocres. Il est souvent avancé que l'adhésion entre le gravier et le mortier conditionne la résistance mécanique des bétons (Liao *et al.*, 2004 ; Gao *et al.*, 2005).

Pour examiner la zone de transition interfaciale à 180 jours des bétons BO et B10, nous avons procédé à un agrandissement ($\times 2000$) à partir d'un microscope électronique à balayage MEB.

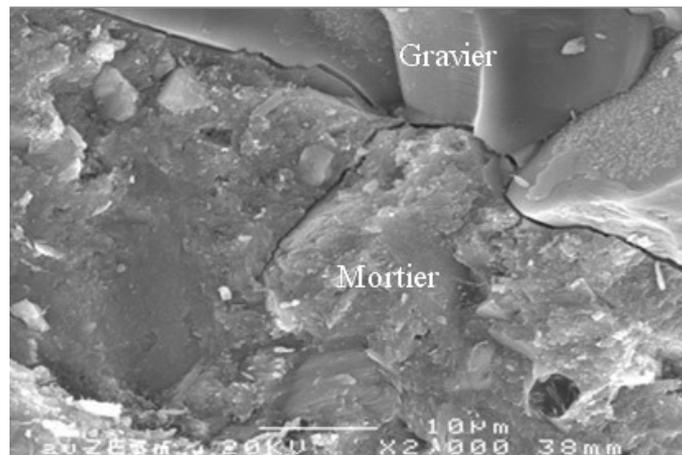
Pour cela, l'échantillon doit être coupé et poli afin de présenter une surface plane. La qualité des analyses est donc directement liée à la qualité du polissage. La surface analysable est de $(4 \times 4) = 16 \text{ cm}^2$ et l'épaisseur de l'échantillon ne doit pas dépasser 1 cm. Les photos obtenues sont présentées sur les figures 10a et 10b.

Les figures 10a et 10b représentent respectivement l'observation au MEB du point de contact mortier/gravier des bétons BO et B10. On peut voir que, la zone de transition interfaciale est presque inexistante pour le béton B10, le mortier est en contact direct avec le gravier. Inversement, une couche d'environ 30 μm sépare le mortier du gravier pour le béton ordinaire BO. La microstructure des bétons se différencie essentiellement au niveau du degré de décollement à l'interface mortier/gravier. On constate que le degré de décollement à l'interface pour le béton ordinaire BO est toujours plus marqué que celui qui prévaut dans le cas de béton B10.

Pour le béton B10, la fissuration amorcée au sein du mortier est littéralement freinée à l'interface mortier/gravier par la présence de SDP (figure 10b). La réaction pouzzolonique permet d'augmenter la résistance à l'interface mortier/gravier. En effet, la portlandite cristallise à la surface des granulats, la réaction avec le SDP permet de consommer celle-ci et de créer des hydrates de type CSH II semi-cristallisé de deuxième génération bien liés aux granulats.



a) béton ordinaire à base de CEM I



b) béton à base de CEM I + 10 % SDP

Figure 10. Observation au MEB de la zone de transition interfaciale

3.5.3. Propriétés mécaniques

La résistance mécanique est exprimée par le pouvoir du béton à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues aux différentes charges de compression, de flexion et de traction. Dans cette partie, il s'agit des essais de compression, flexion et traction par fendage sur des éprouvettes cubiques, prismatiques et cylindriques, respectivement (Mezghiche, 2005).

On a confectionné trois sortes de bétons BO, B10 et B20, chaque série comprend trois échantillons. Les éprouvettes ont été conservées à l'eau pour éviter tout échange d'eau avec l'extérieur, la température a été maintenue constante à 20 ± 1 °C. Les résultats obtenus des résistances à 7, 28, 90 et 180 jours, sont illustrés sur la figure 11.

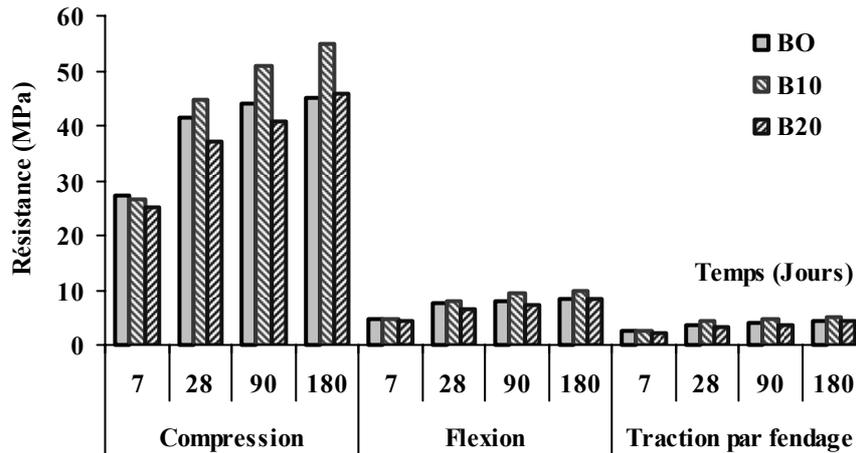


Figure 11. Résistance à la compression, à la flexion et à la traction par fendage des bétons en fonction du temps

3.5.3.1. Variation de la résistance mécanique en fonction du temps et du type de ciment

Pour confirmer le résultat de la pâte de ciment, des essais ont été effectués sur des bétons qui ont donné par suite la même variation de résistance en compression que celle donnée par la pâte. Pour tous les bétons la résistance en compression augmente progressivement avec l'âge de conservation dans l'eau, ce qui peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment en fonction du temps en présence d'une humidité suffisante. L'évolution des résistances en fonction du temps (de 7 à 180 jours) montre que pendant les premiers âges, les résistances sont faibles pour tous les échantillons, tandis que dans les périodes qui suivent, les résistances augmentent sensiblement (figure 11). Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction du SDP avec la portlandite.

La présence du SDP accélère la réaction d'hydratation du ciment Portland. Cet effet accélérateur sur l'hydratation, combiné à l'effet de remplissage dû à leur finesse, peut conduire à de meilleures résistances des bétons. La résistance en compression, montre que le béton B10 est clairement supérieur aux bétons BO et

B20, ce qui permet également de réduire la teneur en ciment pour une résistance et un affaissement donnés.

Cette dernière caractéristique est très intéressante du point de vue économique, étant donné que le ciment est l'ingrédient le plus cher dans la composition des bétons. Un autre avantage est qu'il permet au béton de poursuivre l'amélioration de ses performances mécaniques même après la période de 28 jours. L'effet du sable de dune en poudre sur la résistance à la flexion et la traction par fendage est similaire à celui de la résistance à la compression. On a remarqué aussi que la résistance à la traction est environ 10 fois plus faible que la résistance à la compression.

3.5.3.2. Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité volumique

Les résistances en compression des bétons sont inversement proportionnelles à la porosité. La contribution du sable de dune en poudre à l'amélioration de la résistance en compression est beaucoup plus significative que celle sur le remplissage de la porosité. La composition minéralogique du sable de dune en poudre influe sur cette contribution qui semble être le résultat d'un effet structurant améliorant la solidité mécanique des liaisons mortier/gravier.

3.5.4. Déformabilité

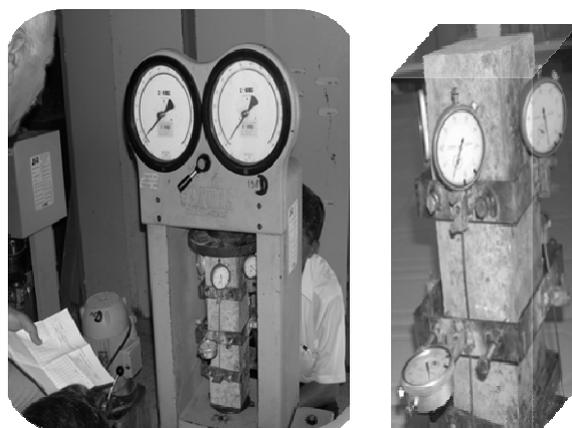


Figure 12. Déformations mesurées pendant la compression

Dans le but d'étudier l'influence du sable de dune en poudre sur la déformabilité des bétons à 28 jours du durcissement, on a confectionné trois sortes des bétons BO, B10 et B20, chaque série comprend trois échantillons prismatiques de $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$. La déformation a été mesurée au moyen d'indicateurs à cadran indiquant le 0,01 mm qui sont installés à l'aide de cadres appropriés sur une surface

de 200 mm dans le sens longitudinal et de 100 mm dans le sens transversal, comportant des plots de mesure (distants de 20 cm). L'éprouvette est centrée sur les plateaux de la presse comme pour un essai de rupture en compression (Mezghiche, 2005) (figure 12).

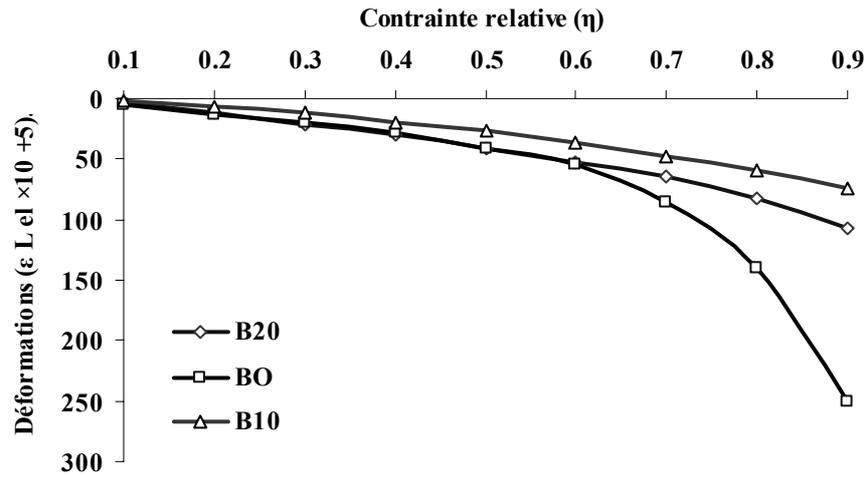


Figure 13. Déformations élasto-instantanées longitudinales des bétons en fonction des contraintes relatives

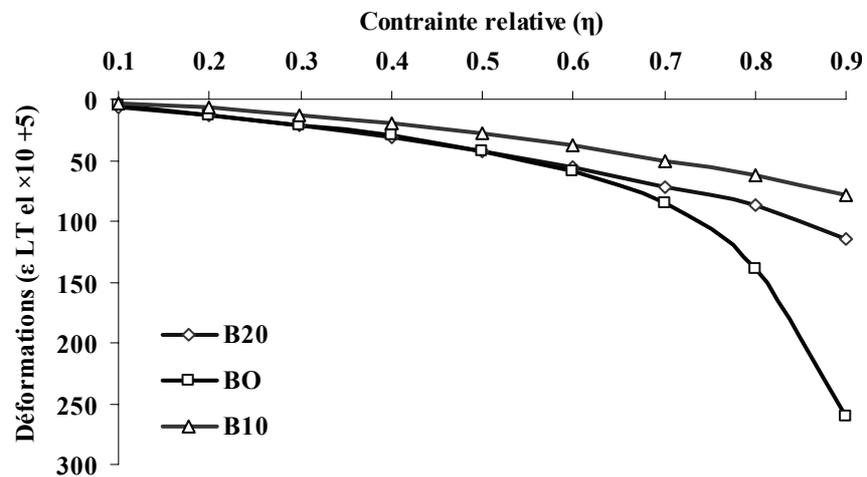


Figure 14. Déformations élasto-instantanées totales longitudinales des bétons en fonction des contraintes relatives

A partir des résultats des essais sur les prismes on a construit des graphiques présentant l'évolution du module de déformation des bétons en compression, des déformations élasto-instantanées longitudinales (t) et relatives totales ($t + \Delta t$) avec la contrainte relative (η). Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures 13, 14, 15 et 16.

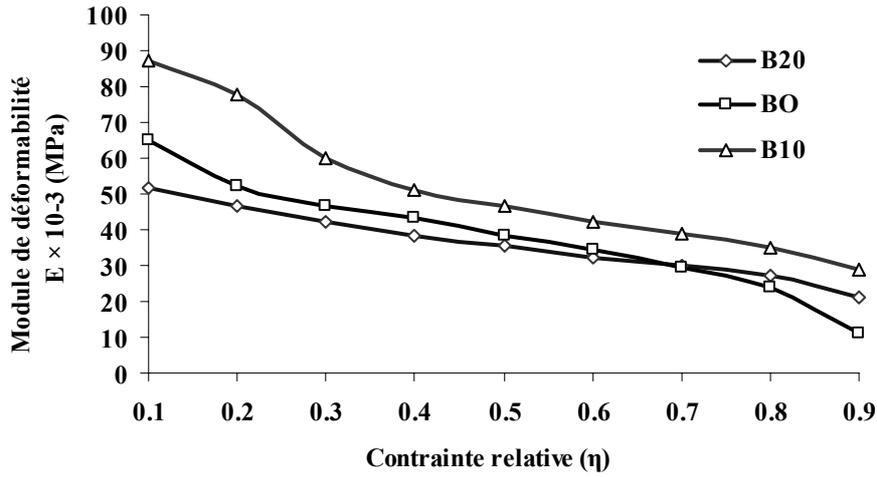


Figure 15. Module de déformabilité des bétons en fonction des contraintes relatives

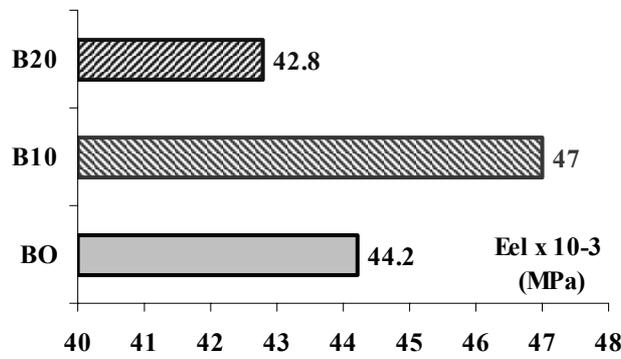


Figure 16. Module d'élasticité des bétons

Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'effet du sable de dune en poudre sur la déformation des bétons en compression, et de préciser un certain nombre de points :

La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées des bétons revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle $\eta = 0,1 - 0,6$, ce qui indique un comportement élastique linéaire.

La relation entre η et les déformations est curviligne dans l'intervalle $\eta = 0,6 - 0,9$, ce qui signale le développement dans les bétons de déformations irréversibles.

Le sable de dune en poudre exerce une influence notable sur l'évolution des déformations élasto-instantanées longitudinales et relatives totales pour une sollicitation de courte durée. Les valeurs les plus basses de la déformation relative totale sont propres au béton B10, dont macrostructure est très compacte.

Le module de déformabilité diminue avec l'augmentation de la contrainte relative : au fur et à mesure que la contrainte relative augmente, le module de déformabilité du béton B10 reste supérieur à celui des bétons BO et B20. Le module d'élasticité du béton B10 est supérieur à celui des bétons BO et B20.

Le module d'élasticité augmente lorsque la résistance à la compression augmente, mais il n'y a pas de consensus sur la forme exacte de cette relation. La seule chose certaine est que l'augmentation du module d'élasticité est plus progressive et plus lente que l'augmentation de la résistance à la compression. Les déformations transversales montrent des tendances similaires aux déformations longitudinales.

4. Conclusion

A la lumière des essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation du ciment prémélangé au sable de dune en poudre est un excellent moyen pour diminuer les émissions de dioxyde de carbone CO_2 , améliorer les résistances en compression et même la consistance du mélange frais (les pâtes deviennent plus fluides).

On peut observer globalement qu'au bout de 28 jours, la résistance en compression à 5, 10 et 15 % de SDP est supérieure à celle du ciment de référence CEM I. Le sable de dune en poudre SDP joue un rôle bénéfique jusqu'à des teneurs de 20 % avec un effet optimum pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10 %.

Le sable de dune en poudre est constitué de minuscules grains de quartz SiO_2 bien cristallisés du type low-quartz. L'analyse par DRX a mis en évidence le rôle pouzzolanique du SDP. En effet, la faible quantité de portlandite détectée dans les pâtes de ciment en présence du SDP, traduit la réaction pouzzolanique partielle, qui contribue à l'augmentation de la résistance en compression et qui améliore la compacité des pâtes du ciment par trois effets : physique, physico-chimique et chimique. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment combinée à l'effet physique, tandis que celles à moyen et surtout à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique.

L'utilisation du sable de dune en poudre améliore globalement la structure poreuse des bétons et contribue aussi à la densification de l'interface mortier/gravier. De ce fait, le sable de dune en poudre modifie les propriétés de rupture, ce qui permet une nette augmentation de la durabilité des bétons. Ces résultats justifient bien l'intérêt que présente la valorisation du sable de dune.

5. Bibliographie

- AFPC-AFREM, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », *Compte rendu des journées techniques* du 11 et 12 décembre, Toulouse, vol. 238, 1997.
- Aïtcin P.C., *Bétons Hautes performances*, Édition Eyrolles, vol. 683, Paris, 2001.
- Arroudj K., Oudjit M.N., « Influence du sable de dune finement broyé sur l'hydratation des ciments », *2^e Colloque maghrébin en génie civil*, Biskra, Algérie, 10 et 11 décembre, 2002, p. 119-127.
- Arroudj K., Oudjit M.N., Lanez M., Carayon M.T., « Mise en évidence par diffractométrie aux rayons X des CSH de seconde génération », *1^{er} séminaire sur les technologies du béton, le béton, perfection et incertitudes*, 18-19 septembre, Hôtel Hilton Alger, 1^{er} août 2004.
- Bessa A., Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers, thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2004.
- Benezet J.C., Réactivité pouzzolanique dans le système quartz-oxyde de calcium-eau, thèse de Doctorat, université de Montpellier II, 1997.
- Benezet J.C., Benhassaine A., « Influence de la taille des particules sur la réactivité pouzzolanique de poudres de quartz », *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 219, 1999, p. 17-28.
- Bogue R.H., *Chemistry of Portland Cement*, New York, Reinhold, vol. 790, 1955.
- Bouchouika A., Etude physico-chimique et mécanique des bétons à hautes performances à base de matériaux locaux, thèse de Magister, ENTP, 2002.
- Care S., Linder R., Baroghel Bouny V., De Larrard F., Charonnat Y., *Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage du béton. Plan d'expérience et analyse statique*, LCPC, Ouvrages d'art OA 33, février 2002.
- Cheng-Yi H., Feldman R.F., "Hydration reactions in Portland cement silica fume blends", *Cement and Concrete Research*, vol. 15, n° 4, 1985, p. 585-592.
- Cyr M., Lawrance P., Ringot E., "Efficiency of mineral admixtures in mortars, quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 2, 2006, p. 264-277.
- De Larrard F., Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, Rapport de Recherche LCPC n° 149, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, France, mars 1988.

- Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B., "The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n° 9, 2006, p. 1719-1726.
- Gallé C., "Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry. A comparative study between oven-, vacuum-, and freeze-drying", *Cement and Concrete Research*, vol. 31, n° 10, p. 1467-1477, 2001.
- Gao J.M., Qian C.X., Liu H.F., Wang B., Li L., "ITZ microstructure of concrete containing GGBS", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 7, 2005, p. 1299-1304.
- Kara Ali R., Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires, thèse de Doctorat de l'université de Cergy-Pontoise, 2002.
- Kronlof A., "Effect of very fine aggregate on concrete strength", *Materials and Structures*, vol. 27, n° 1, 1994, p. 15-25.
- Lawrence P., Cyr M., Ringot E., "Mineral admixtures in mortars, effect of inert materials on short-term hydration", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 12, 2003, p. 1939-1947.
- Lawrence P., Cyr M., Ringot E., "Mineral admixtures in mortars, effect of type, amount and finesses of fine constituents on compressive strength", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 6, 2005, p. 1092-1105.
- Liao K.Y., Chang P.K., Peng Y.N., Yang C.C., "A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 6, 2004, p. 977-989.
- Menéndez G., Bonavetti V., Irassar E.F., "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag", *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, n° 1, 2003, p. 61-67.
- Mezghiche B., *Les essais de laboratoire des matériaux de construction*, Publication universitaire Biskra, vol. 12, 2005.
- Pascal P., *Nouveau traité de chimie minérale (Silicium)*, Tome VIII, 2^e fascicule, Paris, Masson, 1965, p. 2-90, p. 423-445.

Received : 26 March 2010

Accepted : 1 December 2010