

II.1-Introduction :

Dans le but de mettre en évidence le comportement d'un MAP à base de sable de carrière avec l'ajout de pouzzolane naturel (en diminuant le ciment) dans des milieux agressifs, et dans le but de mettre en évidence l'influence de pouzzolane naturel sur les propriétés mécaniques et durabilité du MAP. Nous avons effectué une série d'essais, chimiques, physiques, minéralogiques dans le laboratoire suivant :

- Laboratoire de l'université de ZIANE Achour Djelfa.

Les essais ont été réalisés sur un seul type du MAP:

MAP contenant sable de carrière et du ciment CPJ – CEM II/A 42,5 R

Pour l'étude de la résistivité de ce MAP vis-à-vis de différents milieux agressifs, nous avons tenu à garder le même rapport eau/ciment pour la composition du MAP

(Eau/Liant = 0.42)

Les mortiers auto-plaçant composés sont :

- 1) Mortier auto-plaçant (100% du ciment CPJ – CEM II/A 42,5 R et 0% de pouzzolane) avec du sable de carrière.
- 2) Mortier auto-plaçant (95% du ciment CPJ – CEM II/A 42,5 R et 5% de pouzzolane) avec du sable de carrière.
- 3) Mortier auto-plaçant (90% du ciment CPJ – CEM II/A 42,5 R et 10% de pouzzolane) avec du sable de carrière.
- 4) Mortier auto-plaçant (85% du ciment CPJ – CEM II/A 42,5 R et 15% de pouzzolane) avec du sable de carrière.

Le but de cette substitution est de modifier la composition minéralogique du liant élaboré à base du ciment CPJ – CEM II/A 42,5 R et la variété de l'utilisés nous donne la possibilité de comparer entre les différents composites, ce qui nous permettra d'évaluer l'effet d'ajout de pouzzolane naturel sur la durabilité du mortier auto-plaçant dans de différents milieux agressifs.

Les ciments ont subi des essais de caractérisations physiques et chimiques indispensables avant toute étude expérimentale.

La plupart des essais de caractérisation des matériaux ont été réalisés conformément aux normes européennes, au sein du laboratoire de matériaux du département de Génie Civil de Djelfa.

II.2-Matériaux utilisés :

II.2.1- Ciment :

Le ciment utilisé dans tous les essais est un Ciment CEM II/A-L42.5R

Les résultats des essais de la masse volumique apparente et absolue du ciment utilisé sont :

- La masse volumique apparente = 1080 kg m^3
- La masse volumique absolue = 3150 kg/m^3

II.2.1.1. Surface spécifique:

Selon la norme EN-196-6, la surface spécifique des ciments est mesurée par comparaison avec un ciment de référence dont la surface spécifique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment, plus la surface spécifique de cette poudre est importante plus le temps mis par l'air, pour traverser la poudre, est long.

II.2.1.2 Temps de prise :

Il constitue une indication précieuse pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons normaux. Il varie en fonction du ciment (à prise lente ou rapide), de la finesse de mouture qui favorise l'hydratation et la température qui influe sur la vitesse des réactions chimiques et accélère la prise ; il est généralement supérieur à 90 mn pour les ciments courants à une température de 20°C. L'essai de prise est réalisé par l'appareil de Vicat. Selon la norme NFP15-431.[44]

Le temps de prise du ciment est :

Débit de prise : 150 min

Fin de prise : 230 min

II.2.1.3 Caractéristiques Chimiques :

L'analyse chimique du ciment utilisé est présentée dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : pourcentage des composants chimiques essentiels du ciment d'après la fiche technique.

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Résidu insoluble	SO ₃	Chaux libre	Cl ⁻	PAF
%	20.43	5.37	3.00	61.69	1.80	1.12	2.20	0.97	0.027	5.03

On remarque que le ciment utilisé contient des pourcentages appréciables en chaux et en silice.

II.2.1.4 Composition Minéralogique du Clinker :

Selon les normes NFP15-301 [45,46], le clinker est obtenu par la cuisson des matières premières constitué principalement de calcaire et d'argile, la composition chimique du clinker entrant dans la composition du ciment utilisé est donnée par le tableau II-2.

Tableau II.2 Composition minéralogique du clinker d'après la fiche technique.

Composants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	64.14	10.54	9.16	9.12

II.2.1.5 Propriétés Physiques et Mécaniques du Ciment :

Résistance à la compression :

Tableau II.3: La résistance mécanique minimale à la compression d'après la fiche technique

2 jours (Mpa)	10
28 jours (Mpa)	42.5

II.2.1.5.2 Propriétés physique :

Tableau II.4: Les principales propriétés physiques d’après la fiche technique

Consistance normale (%)	26.5
Finesse suivant la méthode de blaine (cm ² /g)	3700-5200
Retrait à 28 jours (um/m)	1000
Expansion (mm)	3.0

II.2.2 La pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée est d’origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Beni-Saf. Le gisement est représenté par une montagne de forme conique appelée El-Kalcoul situé à la côte absolue de 236 m. Cette pouzzolane est essentiellement formée de scories et de pierres ponces bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir.

La pouzzolane naturelle utilisée dans tous les essais est sous forme d’une poudre (figureII.4), résultante de concassage des scories pouzzolaniques (figure II.3) ; les étuvés pendant 24 heures à une température de 50°C afin d’éliminer leur humidité, ensuite les broyées jusqu’à ce que la poudre résultante puisse passer à travers un tamis démailles 80 µm.



Figure II.1: Scories de la pouzzolane Naturelle de Beni-Saf avant broyage. Figure II.2: Poudre de la pouzzolane Naturelle de Beni-Saf après broyage, < 80 µm.

La composition chimique de la pouzzolane naturelle après broyage est montrée dans le tableau II.5.

Tableau II.5:Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Beni-Saf[42]

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Cl	CaCO ₃
12,36	42,95	16,32	9,49	0,01	1,39	3,00	4,20	0,00	10,75

La masse volumique absolue de la pouzzolane naturelle est: $\rho = 2,45 \text{ g/cm}^3$ [42].

La surface spécifique de Blaine de la pouzzolane naturelle est: $S_{SB} = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ [42].

II.2.3- Le sable :

Les sables utilisés dans cette étude est :

- le sable de carrière de Djelfa.

Illustré dans les tableaux et les figures ci-dessous :

Tableau II.6 Analyse chimique du sable de carrière [47-48]

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	NaCl	CaO	SO ₃	MgO	LOI	PAF
Sable de Carrière	--	0.03	--	55.50	--	0.80	43.6	--

II.2.3.1 Masse Volumique Apparente :

La masse volumique apparente du sable, c'est la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides

II.2.3.2 Masse Volumique Absolue :

C'est la masse par unité de volume de la matière solide qui constitue le sable sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains

Tableau II.7 : Caractéristiques physiques du sable utilisé

Masse volumique	Sable de carrière
Masse volumique absolue [g/cm ³]	2.61
Masse volumique apparente [g/cm ³]	1.84

Tableau II.8 : Coefficient d'absorption d'eau

Coefficient d'absorption d'eau	Sable de carrière
A _b [%]	2

Tableau II.9 : Équivalent de sable (par méthode visuelle)

Équivalent de sable	Sable de carrière
ES [%]	76

II.2.3.3- Analyse Granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF P18-560 EN 933-2 [49,50]

L'analyse granulométrique est effectuée après l'élimination des particules supérieures à 5 mm Les résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé sont représentés dans le tableau II.10

Tableau II.10 Les résultats d'analyse granulométrique du sable utilisé

Overture des Tamis en (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Passant en (%)
5.000	8.1	8.1	0.81	99.19
2.500	72.1	80.2	8.02	91.98
1.250	325.2	405.4	40.54	59.46
0.630	198.8	604.2	60.42	39.58
0.315	115.0	719.2	71.92	28.08
0.160	71.3	790.5	79.05	20.95
0.080	44.9	835.4	83.54	16.46
Fond	163.9	999.3	99.93	00

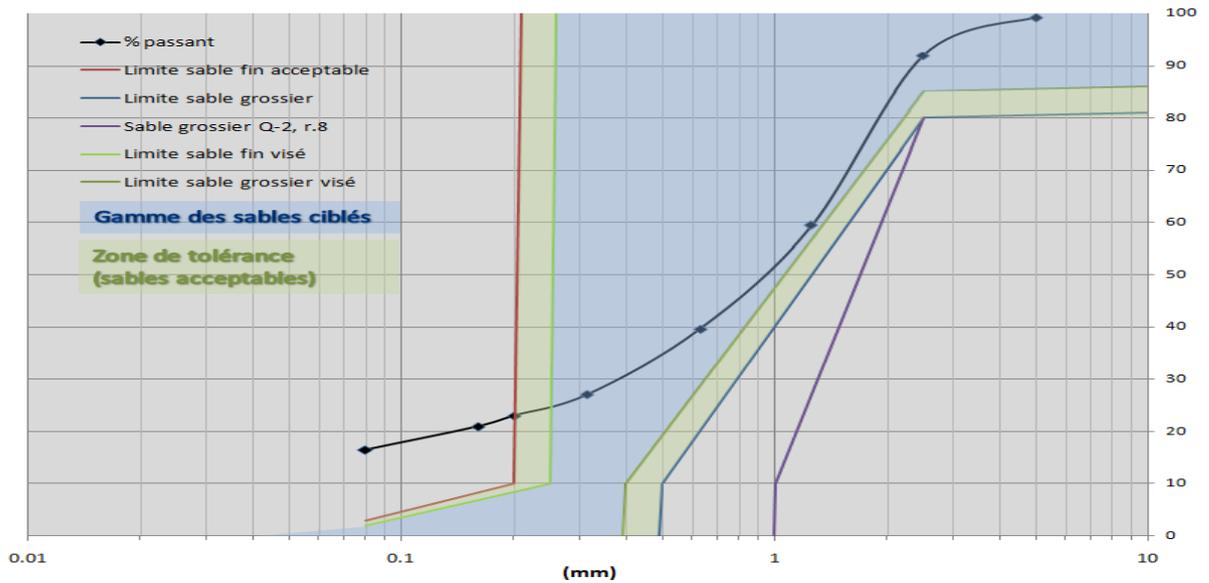


Figure II.3: Courbes granulométriques des sables

Le module de finesse MF selon la norme française (NF 18-540) est défini par :

La somme des pourcentages des refus cumulés ramené à l'unité pour les tamis d'ouverture (0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5) en mm.

Dans notre cas : $Mf(\text{sable de carrière}) = (79.05 + 71.92 + 60.42 + 40.54 + 8.02 + 0.81) / 100 = 2.61$

Le sable de carrière utilisé est un sable préférentiel.

II.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation du béton est l'eau de robinet. Sa composition chimique est illustrée dans le tableau II-11:

Tableau II.11: composition chimique de l'eau de robinet

Composantes chimiques	Mg/L	Meq /L
Calcium (Ca)	52.70	2.64
Magnésium (Mg)	32.00	2.63
Sodium (Na)	/	/
Potassium (K)	/	/
Chlorure (Cl)	71.00	2.00
Sulfates (SO ₄)	115.14	2.35
Carbonates (CO ₃)	Néant	Néant
Bicarbonates (HCO ₃)	170.35	2.80
balance cations	84.95	5.25
Balances anions	357.02	7.20
Conductivité a 25°C		0.72
Résidu sec a 105°C		491

PH		7.5
----	--	-----

II.2.5 Super plastifiant

Le super plastifiant utilisé est un "MEDAFLOW 30" à base de polycarboxylates d'Ether conforme à la norme (EN 934-2). Il est un haut réducteur d'eau de la troisième génération. Les caractéristiques de ce super plastifiant sont données par le tableau II.12

Tableau II.12 : caractéristiques du super plastifiant

Masse volumique	1100 kg/m ³
pH	6- 6.5
Teneur en chlore	< 0,1 g/l
Pourcentage d'extrait sec en masse	30 %
Plage du dosage recommandée	0.5 à 2.0 %

II.3- Formulation des MAP

La formulation que nous avons adoptée est basée sur la formulation proposée par le japonais OKAMURA et appelée la méthode générale, avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport super plastifiant/liant. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel acceptables. Pour la sélection des quantités d'air et de graviers, la méthode OKAMURA a été maintenue.

Tableau II .13 : Composition du MAP dans 1m³

Composants du mélange (Ciment/Pouzzolane)	100% Ciment et 0% Pouzzolane	95% Ciment et 5% Pouzzolane	90% Ciment et 10% Pouzzolane	85% Ciment et 15% Pouzzolane
Ciment (kg)	696.9	656.4	616.5	557.19
Pouzzolane (kg)	0	34.55	68.5	101.86
Sable (kg)	1325	1325	1325	1325
Eau (L)	278.8	278.8	278.8	278.8
Sp %	0.9	0.9	0.9	0.99

Rapport E/C	0.42	0.42	0.42	0.42
--------------------	-------------	-------------	-------------	-------------

II.4- Préparation des MAP

On a préparé les MAP avec les procédures de malaxage suivant [51]

Séquence de malaxage du mortier autoplaçant

- On place (Sable+ ciment) dans le malaxeur et on malaxe pendant 30 seconds.
- On ajoute 2/3 de la quantité d'eau, avec malaxeur en marche, pendant 60 seconds
- On ajoute l'eau restante avec le super plastifiant pendant 60 seconds
- On continue le malaxage pendant cinq minutes de façon à homogénéiser le mortier
- On arrête le malaxage pendant deux minutes de repos.
- Malaxage pendant 30 seconds
- A la fin un léger malaxage est fait manuellement.

Les différentes éprouvettes de mortier préparées, sont conservées pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes de mortier obtenues sont conservées dans l'eau du robinet pendant 28 jours.

II.5-Méthodes d'Essais

- Après 28 jours de cure sous l'eau les éprouvettes (4x4x16) cm³ sont pesés pour déterminer M1 (**Photo II.4**).



Photo II.4 Préparation des éprouvettes pour la pesée.

Puis elles sont immergées dans les solutions d'acide (**Photo II.5**) suivantes :

- 5% d'acide chlorhydrique (HCl)
- 5% d'acide sulfurique (H₂SO₄)



5% H₂SO₄ 5% HCl

Photo II.5- MAP immergés dans la solution acide.

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions est évaluée selon la norme ASTM C 267-96 [52], les éprouvettes sont nettoyées 3 fois avec de l'eau douce pour éliminer le mortier et/ou composite altéré et puis on les laisse sécher pendant une ½ heure. Ensuite on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse M2. Cette opération est effectuée après 1, 7, 14, 21 et 28 jours après l'immersion. La solution d'attaque est renouvelée chaque 7 jour ou chaque mois (selon la valeur du pH).

Enfin la résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte de masse de l'éprouvette:

L'attaque est évaluée par la formule (II.1) :

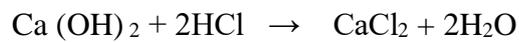
$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M1-M2) / M1] \times 100 \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec M1, M2 les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.

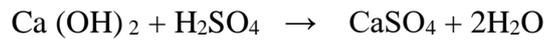
II.6 Equations chimiques

L'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide chlorhydrique (HCl) sont des acides inorganiques, ils sont plus nuisibles pour les bétons et que les acides organiques et les solutions salins.

Les acides inorganiques forment avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hydroxyde de calcium) contenu dans la pâte de ciment durcie des composés facilement solubles dans l'eau. Concernant les acides inorganiques utilisés dans notre étude, on a :



Hydroxyde de calcium + acide chlorhydrique \rightarrow chlorure de calcium



Hydroxyde de calcium + acide sulfurique \rightarrow sulfate de calcium

Donc on peut établir qu'un acide est autant plus nuisible que les sels de calcium formés sont plus facilement solubles. L'acide sulfurique devrait être relativement inoffensif, mais les ions de sulfates jouent en l'occurrence un rôle nuisible pour le béton (gonflement dû aux sulfates).

Les acides inorganiques forts ne réagissent pas uniquement avec l'hydroxyde de calcium, ils attaquent également les autres composants de la pâte de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gels de silice) [53].

Tableau II.14 Les différents type des essais utilisé [47]

Type d'essais	Formule	appareillage	Type de moule	Norme
Masse volumique apparente	$\varphi = \frac{M}{V}$	Cylindre de volume 1L		GOST 6427-75
Masse volumique absolue	$\varphi = \frac{M}{V_2 - V_1}$	Eprouvette Graduée		GOST 6427-75
Analyse Granulométrique		Tamiseuse électrique et les Tamis		GOST 8736-77
Absorption d'eau	$W_m = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$		4×4×4 cm ³	GOST 12730.3-78
Affaissement		Coned'abrams		NF-P18-451

II.7 Conclusion

Les conclusions qu'on peut tirer de la caractérisation des matériaux utilisés sont :

- le ciment utilisé est un CPJ CEMII A/ 42.5R de 2.9 a une prise satisfaisante aux spécifications des ciments courants.
- La pouzzolane naturelle : La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Beni-Saf.
- Le sable utilisé est :

Sable de carrière de région de Djelfa est une granulométrie préférentiel.

- L'eau de gâchage est celle de robinet du laboratoire.
- L'adjuvant utilisé c'est un super plastifiant de type "MEDAFLOW 30" et un pH neutre et de teneur en chlore faible et qui a pour effet l'amélioration de l'ouvrabilité
-