

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



N° D'ORDRE : H...../2012

# MÉMOIRE DE MAGISTER

SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL  
OPTION : MATÉRIAUX ET DURABILITÉ DES CONSTRUCTIONS

## THÈME

« Propriétés mécaniques des bétons autoplaçants à  
base des sédiments dragués »

Présenté Par

M<sup>elle</sup> Boukhlif Zoulikha

Soutenue le : 23/02/2012

devant le jury composé de :

Présidente : Mme Belas Nadia	Professeur	Uni. Mostaganem
Examineur : Mr BENDANI Karim	M. de conférence	Uni. Mostaganem
Examineur : Mr MEBROUKI Abdelkader	M. de conférence	Uni. Mostaganem
Encadreur : Mr BOUHAMOU Nasr-eddine	M. de conférence	Uni. Mostaganem

Année universitaire : 2011/2012

## **Remerciement**

*Avec l'aide de dieu tout puissant j'arrive à achever mon travail el hamdo lilah.*

*Je tiens tout d'abord à remercier madame Belas N pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury et pour tous les conseils qu'elle m'a souvent prodigué et pour la rigueur respectueuse qu'elle a toujours représenté.*

*Je souhaite adresser également mes remerciements à monsieur Bendani K d'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail.*

*J'adresse mes remerciements à monsieur Mebrouki A pour l'honneur qu'il m'a fait d'être examinateur de ce travail ; toute ma gratitude pour son aide et conseils et d'être présent dans les moments les plus difficiles.*

*Je voudrai faire des remerciements particuliers au mon encadreur, Monsieur Bouhamou N pour m'avoir encadré, conseillé ainsi que pour ses corrections de ce mémoire.*

*Ma reconnaissance s'adresse également à monsieur Khlifa B pour ses conseils et ses aides sur le plan expérimental.*

*J'adresse mes remerciements à toute l'équipe des laboratoires de : LTPO (Oran), CTC (Mostaganem), GCMO (université d'Oran) et Mostafa Stambouli (université de Mascara) pour leur sympathie, leur accueil et leur aide.*

*Je remercie cordialement tous mes professeurs responsables de ma formation en magister qui se sont dévoués à nous imprégner au domaine de la recherche scientifique et de l'enseignement supérieur.*

*Un sincère remerciement à mes parents et ma famille pour leur amour, leur soutien sans faille et à tout ce qu'ils ont pu m'apporter pour franchir les obstacles les plus difficiles.*

*J'exprime aussi toute ma sympathie envers mes amis de PG pour tous les moments que j'ai partagés avec eux et avec qui je garde des souvenirs impérissables... Merci donc à : Mostifa F, Larbi F, Belbachir N, Belguesmia K, Safer O et Benaissa M.*

---

---

Ministère de l'enseignement et de la recherche scientifique  
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de génie civil

M<sup>elle</sup> Boukhelif Zoulikha

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de : Magister

---

---

### Résumé

La dégradation de l'environnement et l'épuisement des matières premières sont parmi les problèmes du siècle. Les usines du ciment consomment chaque jour des hectares des terres d'argile et de calcaire, d'un autre côté le dépôt des sédiments dragés posent un grand problème environnemental.

Dans les dernières années l'utilisation des bétons autoplaçant dans le domaine de construction augmente progressivement, en parallèle les recherches scientifique à propos ce béton cherche d'améliorer ce béton et de valoriser des déchets dans ce béton et voire son comportement vis-à-vis de cette valorisation.

Cette étude vise à valoriser la vase issue du dragage des barrages de Chorfa et Fergoug (Mascara) dans les bétons autoplaçants et voir son effet sur les propriétés physico-mécanique à l'état frais et durci du BAP.

Sept formulations ont été étudiées : trois BAP à base de vase de Fergoug et trois autres à base de vase de Chorfa avec des taux de substitution de 10, 15 et 20%. Le septième BAP est un béton témoin sans vase. Des essais à l'état frais et durci ont été effectués sur ces bétons pour déterminer leurs propriétés physico-mécaniques.

L'étude a révélé qu'aux différentes échéances, Les résistances mécaniques des BAP à base de vase calcinée de Chorfa sont plus performantes que celles des BAP contenant la vase calcinée de Fergoug

---

---

Mots clé : Sédiment du dragage, béton autoplaçant, propriétés physico-mécaniques état frais, état durci.

---

---

---

---

Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem  
Faculty of Science and Technology  
Department of Civil Engineering

Miss Boukhelif Zoulikha

Memory to get a degree: Master

---

---

## **Summary**

The environmental degradation is the depletion of raw materials are allowed problems of the century. Cement plants consume each day hectares of land of clay and limestone, on the other hand the deposition of sediments Drag pose a major environmental problem.

In recent years, the use of self-compacting concrete in construction is gradually increasing, in parallel scientific research regarding the concrete trying to improve and enhance this concrete waste in the concrete and even his behavior vis-à-vis those that value.

This research is to enhance the mud after the dredging of dams Chorfa and Fergoug (Mascara) in concrete placing and even its effect on physico-mechanical fresh and hardened the SCC.

Seven formulations were studied: three SCC with substitution of mud of Chorfa's dam and three others with substitution mud of Fergoug's dam with substitution rates of 10, 15 and 20%. The last concrete is without substitution of the Sediment. Testing and spawning state were carried out on hardened concrete to determine these properties physico-mechanical properties.

The study found as different maturities, the mechanical strength of BAP-based mud calcined Chorfa perform better than those of BAP containing mud calcined Fergoug

---

---

Key words : sediment dredging, SCC, physico-mechanical fresh, cured state.

---

---

---

---

والبحث العلمي التعليم العالي وزارة  
مستغانم بن باديس عبد الحميد جامعة  
والتكنولوجيا كلية العلوم  
الهندسة المدنية قسم

الانسة : بوخليف زوليخة  
مذكرة تخرج لتحصل على شهادة: ماجستير

---

---

### ملخص

التدهور البيئي واستنزاف المواد الخام المسموح من أهم مشاكل القرن. مصانع الأسمنت تستهلك كل يوم هكتارات من أراضي الطين والحجر الجيري ، وعلى الجانب الآخر ترسب الرواسب يشكل مشكلة بيئية رئيسية. في السنوات الأخيرة استعمال الخرسانة ذاتية القولية في مجال البناء يتزايد تدريجيا، البحوث العلمية حول هذه الخرسانة في تطور مستمر فيما يتعلق بمحاولة ملموسة لتحسين خواصها و دمجها مع الرواسب و دراسة تأثير هذه الرواسب عليها هذه الدراسة تهدف إلى استعمال الرواسب الناتجة عن ترسب التربة و الطين في قاع سد الشرفة و سد فرقوق (ولاية معسكر) في تركيب الخرسانة ذاتية القولية و دراسة تأثيرها على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للخرسانة في الحالة السائلة و الصلبة.

تمت دراسة سبع تركيبات من الخرسانة ذاتية القولية :ثلاث تركيبات تحتوي على راسب من سد فرقوق و ثلاث أخرى تحتوي على راسب سد الشرفة بنسب 10%، 15% و 20%. أما التركيبة السابعة فلا تحتوي على راسب. ثم إجراء عدة اختبارات على هذه التركيبات لتحديد تأثير الرواسب على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية في الحالة الصلبة و السائلة.

النتائج المستخلصة من هذه الدراسة بينت أن المقاومة الميكانيكية الناتجة عن الخرسانة التي تحتوي على راسب سد الشرفة أفضل من مقاومة الخرسانة التي تحتوي على راسب سد فرقوق.

---

---

كلمات مفتاحية: الرواسب، الخرسانة ذاتية القولية، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.

---

---

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I : généralité sur les sédiments et Évolution de l'envasement des barrages en Algérie</i>	
I.1. Introduction .....	4
I.2.généralité sur les sédiments .....	4
I.2.1. Définition et origine .....	4
I.2.3. Constitution des sédiments.....	4
I.2.4. Granulométrie des sédiments.....	5
I.2.5. Composition minérale des sédiments .....	7
I.2.6. Altération des sédiments .....	7
I.2.7. Transport des sédiments .....	8
I.2.7.1. Transport par le vent .....	8
I.2.7.2. Transport par gravité pure .....	9
I.2.7.3. Transport par la glace.....	9
I.2.7.4. Transport par l'eau .....	9
I.2.8. Dépôt des sédiments .....	10
I.2.9. La contamination des sédiments .....	10
I.2.9.1. Les éléments nutritifs.....	10
I.2.9.2. Les métaux lourds .....	10
I.2.9.3. Les micro-polluants organiques.....	11
I.2.10 .Les techniques de dévasement.....	11
I.2.10.1. Etat des vases avant dragage.....	11
I.2.10.2.Méthodes de dragage et de transport .....	12
I.2.10.3. Evacuation des sédiments .....	17
I.2.10.4.Stockage des sédiments .....	17
I.3.Évolution de l'envasement des barrages en Algérie.....	19
I.3.1.Avant l'indépendance (1962) .....	19
I.3.2.Après l'indépendance (après 1962) .....	20
I.3.3.Les techniques de dévasement utilisées .....	24
I.3.3.1.Surélévation des barrages .....	25
I.3.3.2.Dragage des barrages.....	27
I.3.3.2.Le soutirage des courants de densité et les chasses périodiques.....	31

I.4. Bilan.....	36
-----------------	----

*Chapitre II : Valorisation des sédiments.*

II.1. Introduction .....	37
II.2. Industrie du ciment et le BTP.....	37
II.3 .Valorisation dans la fabrication de la brique.....	39
II.3.1.Aspect général .....	42
II.3.2.Résultats des analyses dimensionnelles .....	43
II.3.3.Résultats des analyses physiques .....	44
II.3.4.Résultats des essais mécaniques .....	46
II.4.Valorisation en technique routière .....	46
II.5.L'argile et la calcination .....	49
II.5.1.Les minéraux argileux.....	49
II.5.1.1.Les illites .....	50
II.5.1.2.Les montmorillonites .....	50
II.5.1.3. Le kaolin.....	50
II.5.2. Les roches argileuses .....	50
II.5.3.Les argiles de la zone d'altération météorique .....	51
II.5.4.Les argiles de la zone de sédimentation .....	51
II.5.5.Qu'est ce qu'une pouzzolane de synthèse.....	51
II.5.6.La Calcination .....	52
II.5.6.1.La calcination flash .....	52
II.5.6.2.La calcination lente .....	53
II.5.7.Transformation des argiles pendant un traitement thermique .....	55
II.5.7.1.La déshydratation .....	55
II.5.7.2.La déshydroxylation.....	56

*Chapitre III : Etat de connaissance sur les BAP*

III.1. Introduction .....	57
III.2. Définition .....	57
III.3. Mise en œuvre .....	57
III.4 Impacts socio-économiques .....	59
III.5. Caractérisation du béton à l'état.....	60
III.5.1. Caractérisation rhéologiques fondamentales des BAP.....	60

III.5. 2. Essais de Caractérisations technologiques des BAP .....	62
III.5.2.1 Mobilité en milieu non confiné .....	63
III.5. 2.2 Mobilité en milieu confiné .....	63
III.5.2.3 Stabilité.....	65
III.6. Modes de formulations des BAP .....	66
III.6. 1 Cahier des charges minimum à l'état frais .....	67
III.6.2.Les différents constituants d'un BAP .....	68
II.7. Méthodes de formulation .....	72
III.7.1 Optimisation du mortier .....	72
III.7.2 Optimisation de la quantité de pate .....	73
III.7.3 Optimisation du squelette .....	74
III.7.4. Méthode basée sur un plan d'expérience.....	75
III.8. Propriété du béton durci .....	75
III.8.1. Propriétés mécaniques.....	76
III.8.1.1 Résistance mécanique .....	76
III.8.1.2 Module d'élasticité (en compression) .....	77
III.8.1.3. Résistance à la traction .....	79
III.8.2. Retrait (état frais, état durci) .....	80
III.9. Bilan.....	84
Problématique et objectifs de la recherche.....	85
<i>Chapitre IV : Matériaux et procédures</i>	
IV.1. Introduction .....	87
IV.2. Les essais de caractérisations .....	87
IV2.1. Caractéristiques de ciment et vases .....	87
IV.2.2. Caractéristiques des granulats .....	91
IV.3. Les essais sur mortier .....	93
IV.4. Les essais sur BAP à l'état frai .....	94
IV.5. Les essais sur BAP à l'état durci .....	98
IV.5. 1.Cure et conservation des éprouvettes .....	98
IV.5.2 Le surfaçage au soufre .....	98
IV.5.3.Essai de compression .....	99
IV.5.4. Essai de traction par flexion .....	99
IV.6. Description des matériaux utilisés .....	100

IV.6.1.Le ciment.....	100
IV.6.2 Les granulats.....	101
IV.6.3 Additions utilisés (vases).....	105
IV.6.3.1.Préparation de la vase.....	105
IV.6.3.2.Caractéristiques des vases après calcination.....	106
IV.6.4. Adjuvant .....	109
IV.6.5. L'eau .....	109
IV.7. Formulation des mortiers normalisés.....	109
IV.8. Méthode de formulation des BAP.....	111
IV.9. Notation des BAP.....	112
IV.10.La mise en œuvre.....	112
<i>Chapitre V : Analyse et interprétation des résultats</i>	
V.1. Introduction .....	115
V.2. Essai sur pate .....	115
V.3 Essai sur mortier.....	118
V.4. Essai sur béton .....	123
V.4.1. Etat frais .....	123
V.4.2. Etat durci.....	124
V.4.2.1. Résistance à la compression.....	124
V. 4.2.2. Résistance à la traction par flexion .....	127
V.4. 3. Comparaison des résistances à la compression des deux vases .....	130
V. 4.4. Comparaison des résistances à la traction des deux vases.....	132
V.4.5. Perte de résistance à la compression et à la traction par rapport au BAP témoin .....	134
V.4.6.L'évolution de la résistance à la traction.....	135
V.5.Bilan.....	137
Conclusion générale .....	138
Références bibliographiques .....	141

## Liste des figures

### *Chapitre I : généralité sur les sédiments et Évolution de l'envasement des barrages en Algérie*

Figure I.1 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins.....	7
Figure I.2: Drague à godets .....	14
Figure I.3: Drague à pelle.....	14
Figure I.4: Drague à benne .....	14
Figure I.5: Aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement .....	15
Figure I.6: Aspiratrice en marche .....	15
Figure I.7 : Dragues fendables .....	16
Figure I.8: Système "JETSED ".....	16
Figure I.9: Ecoulement de la vase à sa sortie d'une vidange de fond.....	18
Figure I.10: Zone de stockage des sédiments-Rejet en cours par drague suceuse-(Barrage de Fergoug).....	18
Figure I.11. Situation des premiers barrages en exploitation depuis 1962 .....	20
Figure I.12. Evolution dans le temps de l'envasement des barrages en Algérie.....	21
Figure I.13. Situation géographique des barrages les plus menacés par l'envasement.....	23
Figure I.14. Situation des barrages surélevés .....	26
Figure I.15. Capacités récupérées par la surélévation des digues de barrages .....	27
Figure I.16. Situation des barrages dévasés par le dragage .....	28
Figure I.17. Dragage de la retenue du barrage de Zardezas en 1993 .....	29
Figure I.18. Opération de dragage au niveau de la retenue de Fergoug en 2005.....	30
Figure I.19. Évacuation de 4 Mm <sup>3</sup> de vase de la retenue de Foug El Gherza pendant 18 mois .....	30
Figure I.20. Capacités récupérées par le dragage des barrages .....	31
Figure I.21. Situation des barrages dans lesquels est pratiquée les chasses ou le soutirage des courants de densité .....	32
Figure I.22. Six vannes de fond du barrage de Beni Amrane .....	33
Figure I.23. Barrage de Beni Amrane – Évolution de la quantité de vase chassée par les vannes de fond durant la période 1988-2000 .....	33
Figure I.24. Vannettes de dévasement du barrage de l'oued El Fodda .....	34
Figure I.25. Évolution dans le temps de la quantité de vase soutirée par les vannettes	

de dévasement des barrages.....	35
---------------------------------	----

*Chapitre II : Valorisation des sédiments.*

Figure II.1 : Résistances mécaniques des 4 mélanges étudiés.....	38
Figure II.2 : Résistance à la compression des mortiers.....	39
Figure II.3 : Briques à base de la vase du barrage de Oued Lelhel.....	39
Figure II.4 : Organigramme général du processus de fabrication des briques.....	41
Figure II.5: Résultats des analyses dimensionnelles.....	43
Figure II.6 : Résultats des analyses physiques.....	45
Figure II.7 : Coefficient d'absorption d'eau des produits finis.....	45
Figure II.8 : Résultats des essais mécaniques.....	46
Figure II.9: Organigramme des étapes de valorisation des sédiments.....	47
Figure II. 10 : Evolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau pour les formulations issues de sédiments marins.....	48
Figure II.11 : Evolution de l'indice portant immédiat en fonction de la teneur en eau pour les formulations issues de sédiments marins.....	48
Figure II 12 : Température du four en fonction du temps.....	53
Figure II.13 : Exemple d'analyse thermique différentielle d'un kaolin.....	55

*Chapitre III : Etat de connaissance sur les BAP*

Figure III.1 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton.....	61
Figure III.2 : Essai d'étalement au cône.....	63
Figure III.3 : Essai de la boîte en L (L-box test).....	64
Figure III.4 : Essai du tube en U (à gauche) et du caisson (à droite).....	64
Figure III.5 : Essai de stabilité au tamis.....	65
Figure III.6 : Essai de ressuage à l'aéromètre.....	66
Figure III.7 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle.....	67
Figure III.8 : Action des superplastifiants- Déflocculation des grains de ciment.....	69
FigureIII.9 : Influence de la qualité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton.....	69
Figure III.10: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton	71
Figure III.11 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant.....	76
Figure III.12 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés	

avec leurs valeurs expérimentales.....	77
Figure III.13: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation.....	78
Figure III.14: Ecart relatif du module des BAP ( $g = 62\%$ , $E_g = 75$ GPa) par rapport aux prévisions du BAEL.....	79
Figure III.15 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure ( $T = 20^\circ\text{C}$ , 50% HR)	80
Figure III.16: Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés.....	80
Figure III.17 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP.....	81
Figure III.18 : Retrait endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC° en fonction de la résistance mécanique à 28 jours.....	82
Figure III.19: Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP.....	82
Figure III.20: Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant.....	83
Figure III.21: Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C.....	84

#### *Chapitre IV : Matériaux et procédures*

Figure IV.1 : Principe de fonctionnement du perméabilimètre de <b>Blaine</b> .....	88
Figure IV.2 : Mesure de la masse volumique absolue de la vase calcinée par l'appareil " Le Chatelier ".....	88
Figure IV.3 : Appareil de VICAT munie de la sonde de consistance.....	89
Figure IV.4 : L'appareil de VICAT minu d'aiguille.....	90
Figure IV.5 : Tamiseuse électrique.....	91
Figure IV.6 : Méthode de l'éprouvette.....	92
Figure IV.7: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	93
Figure IV.8 : Dispositif de rupture en compression.....	94
Figure IV.9 : Essai d'étalement.....	94
Figure IV.10 : Essai de la boîte en L.....	95
Figure IV.11 : Essai de stabilité au tamis.....	96
Figure IV.12 : Essai de ressuage.....	96
Figure IV.13 : L'essai de colonne.....	97
Figure IV.14: Le surfacage au soufre.....	98
Figure IV.15 : Essai de compression.....	99
Figure IV.16 : Essais de traction par flexion 3 points.....	100
Figure IV.17 : Courbe granulométrique du sable de mer et de carrière.....	102

Figure IV.18 : Courbe granulométrique des graviers 3/8 et 8/15.....	104
Figure IV.19 : Prélèvement de la vase.....	104
Figure IV.20 : Conservation de la vase après prélèvement.....	104
Figure IV.21 : Etuve de séchage.....	105
Figure IV.22: Le broyeur.....	105
Figure IV.23: Tamiseur électrique après calcination.....	105
Figure IV.24 : Vase obtenue après tamisage.....	105
Figure IV.25 : Le four utilisé.....	106
Figure IV.26: Calcination de la vase.....	106
Figure IV.27 : Vase après calcination (produit final).....	106
Figure IV.28 : Granulométrie de la vase calcinée de Fergoug.....	108
Figure IV.29 : Granulométrie de la vase calcinée de Chorfa .....	108
Figure IV.30 : Les mortiers normalisés après démoulage.....	110
Figure IV.31 : Organigramme des séquences de malaxage des BAP.....	113

#### *Chapitre V : Analyse et interprétation des résultats*

Figure V. 1 : Variation des valeurs de la consistance normale des différentes pâtes de ciment.....	116
Figure V.2 : Variation du temps de prise des différentes pâtes de ciment.....	117
Figure V.3 : Comparaison de l'indice et coefficient d'activité des deux vases.....	119
Figure V.4 : Comparaison de la distribution des constituants de béton entre le BAP témoin et le BAP à base de vase Chorfa.....	123
Figure V.5 : Comparaison de la distribution des constituants de béton entre le BAP témoin et le BAP à base de vase Fergoug.....	122
Figure V.6: Evolution de la Résistance a la compression des différents BAP à base de vase Fergoug .....	125
Figure V.7 : Résistance a la compression des différents BAP à base de vase Fergoug....	125
Figure V.8 : Evolution de la Résistance a la traction des différents BAP à base de vase Fergoug .....	126
Figure V. 9: Résistance a la compression des différents BAP à base de vase Chorfa.....	126
FigureV. 10 : Evolution de la Résistance a la traction par flexion des différents BAP à base de vase Fergoug.....	128
Figure V.11: Résistance à la traction par flexion des différents BAP à base de vase Fergoug	129
Figure V.12 : Evolution de la Résistance a la traction par flexion des différents BAP à base	

de vase Chorfa.....	129
Figure V.13 : Résistance a la traction par flexion des différents BAP à base de vase Chorfa.	130
Figure V. 14 : Comparaison des résistances a la compression des BAP des deux vases Fergoug et Chorfa .....	131
Figure V. 15 : Comparaison des résistances à la traction par la flexion des BAP des deux vases Fergoug et Chorfa.....	133
Figure V.16 : Perte de résistances a la compression à 28 et 90 jours des BAP des deux vases Fergoug et Chorfa par rapport au béton témoin.....	134
Figure V.17 : Perte de résistances à la traction à 28 et 90 jours des BAP des deux vases Fergoug et Chorfa par rapport au béton témoin.....	135

## Liste des tableaux

### *Chapitre I : généralité sur les sédiments et Évolution de l'envasement des barrages en Algérie*

Tableau I.1 : Classes granulométriques d'un matériau .....	6
Tableau I. 2 : Métaux lourds présents dans les sédiments fluviaux.....	11
Tableau I.3. Taux d'envasement déduit par les levés de 1986 et 2004 .....	22
Tableau I.4. Les barrages abandonnés en Algérie .....	24
Tableau I.5. Anciens barrages remplacés par un nouveau barrage.....	25

### *Chapitre II : Valorisation des sédiments.*

Tableau II 1. Résultats des analyses minéralogiques.....	40
Tableau II.2 : Composition minéralogique de l'argile jaune .....	40
Tableau II.3 : Résultats des analyses chimiques.....	42

### *Chapitre IV : Matériaux et procédures*

Tableau IV.1 : Caractéristiques phasiques du ciment utilisé.....	100
Tableau IV.2 : Composition chimique du ciment utilisé.....	100
Tableau IV.3 : Composition minéralogique du clinker selon de Bogue .....	101
Tableau IV.4 : caractéristiques physiques du sable de carrière et de mer.....	101
Tableau IV.5 : caractéristiques chimiques du sable de mer et de carrière.....	102
Tableau IV.6 : caractéristiques physiques des différents gravillons .....	103
Tableau IV.7 : caractéristiques chimiques des différents gravillons .....	103
Tableau IV.8 : caractéristiques chimiques des différentes vases Fergoug et Chorfa.....	107
Tableau IV.9 : caractéristiques physiques des différentes vases Fergoug et Chorfa.....	107
Tableau. IV.10 : Caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW 113 .....	109
Tableau IV.11 : la formulation des mortiers prismatiques (4x4x16).....	110
Tableau IV.13 : la formulation des bétons autoplaçants à base du vase de Chorfa.....	114
Tableau IV.12 : la formulation des bétons autoplaçants à base du vase de Fergoug.....	114

### *Chapitre V : Analyse et interprétation des résultats*

TableauV.1: Consistance normale pour les différentes pâtes.....	115
---	-----

Tableau V. 2 : Temps de prise pour les différentes pâtes.....	117
Tableau V. 3 : Résistances mécaniques des différents mortiers.....	118
Tableau V. 4 : indice et coefficient d'activité des deux vases.....	119
Tableau V. 5 : Résultats à l'état frais des différents BAP à base de vase Fergoug.....	120
Tableau V. 6 : Résultats à l'état frais des différents BAP à base de vase Chorfa.....	120
Tableau V.7 : Récapitulatif des masses volumiques en Kg/m <sup>3</sup> .....	122
Tableau V.8 : Résultats résistance à la compression des différents BAP à base de vase Fergoug.....	124
Tableau V.9 : Résultats résistance à la compression des différents BAP à base de vase Chorfa.....	124
Tableau V. 10 : Résultats résistance à la flexion des différents BAP à base de vase Fergoug.....	127
Tableau V.11 : Résultats résistance à la flexion des différents BAP à base de vase Chorfa..	128
Tableau V.12 : Comparaison des valeurs des résistance à la traction des BAP mesurés à celles calculés par les lois V.1, V.2 et V.3.....	136

## Symbole

BAP	Béton aitoplaçant.
BV	Béton vibré.
CPA	Ciment portland artificiel.
C-S-H	Silicates de calcaim hydratés.
C <sub>3</sub> S	Silicate tricalcique
C <sub>2</sub> S	Silicate bicalcique
C <sub>3</sub> A	Aluminate tricalcique
C <sub>4</sub> AF	Ferroaluminate tricalcique
Ca(OH) <sub>2</sub> , (CH)	Hydroxyde de calcaim (Portlandite)
CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	Gypse.
CaO	Chaux libre.
CaCO <sub>3</sub>	Calcite
CO <sub>2</sub>	Anhydres carbonique
H <sub>2</sub> O	Eau de combinaison
SiO <sub>2</sub>	Silice
MgO	Magnésie
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumine
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxyde de fer
SO <sub>3</sub>	Sulfates
Cl	Chlorures

## Introduction générale

L'Algérie fait face à de sérieux problèmes, dégradation de l'environnement et l'épuisement ou la perte de ressources naturelles. Les indicateurs sont au rouge ; ils incitent à des actions rapides.

La protection de l'environnement en Algérie doit être prise comme partie intégrante du développement lui-même. Bâtir des politiques publiques constitue le socle de base pour la mise en œuvre des programmes d'utilisation rationnelle des ressources naturelles, de fourniture de services environnementaux de qualité et d'amélioration de la performance environnementale.

Des grands efforts ont été déployés en Algérie dans la réalisation des barrages, mais malheureusement le pays figure parmi les plus négativement touchés par l'érosion et l'envasement. Des opérations de dragage sont épisodiquement programmées, coûteuses mais indispensables, les matières issues ont causées de nombreux dégâts à l'environnement.

Le traitement et la valorisation des déchets peuvent contribuer positivement à la protection de l'environnement et à la diminution de la quantité de déchets évacués vers les décharges en augmentant leur durée d'exploitation ; cela permettra de créer une économie substantielle des matières premières, de retrouver un meilleur équilibre de ses écosystèmes, de préserver les droits et l'accès des générations futures aux ressources naturelles et bien sur vivre dans un environnement sain.

Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire de faire participer tous les secteurs, particulièrement le génie civil qui est considéré comme l'un des plus importants secteurs consommateurs de ressources naturelles (argile, calcaire et granulats).

L'industrie du ciment qui est dans notre pays en pleine croissance comme tous les autres secteurs. Les trois groupes industriels et commerciaux algériens, à savoir l'ERCE (Entreprise régionale des ciments de l'est), l'ERCC (Entreprise régionale des ciments du Centre) et l'ERCO (Entreprise régionale des ciments de l'ouest) qui comprennent 12 cimenteries totalisant une capacité de production de 11,5 millions de tonnes/an. Par exemple en 2006, le secteur public a commercialisé 10,8 millions de tonnes. Et avec l'importation de la nouvelle technologie, et la privatisation partielle telles de l'usine Meftah, Sour El Ghozlane, Zahana et Hadjr Soud, nous disposerons d'une production qui oscillerait entre 23 et 24 millions de tonnes par an [Chikouche 2008].

Cet essor dans ce secteur demande en premier lieu de la prospection, l'argile et le calcaire doivent être en grandes quantités. Mais la production abusive du clinker doit être ralentit par l'ajout de matériaux secondaires, comme du laitier granulé de haut fourneau ou des cendres volantes par exemple.

Parmi ces matériaux qu'on ajoute au clinker on trouve les pouzzolanes naturelles qui proviennent des roches volcaniques, ou artificielles qui sont obtenues par différentes méthodes, les plus couramment employées sont les cendres volantes des centrales thermiques, les laitiers des hauts fourneaux, les bauxites, les argiles calcinées.

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis une vingtaine d'années, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferrillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles. La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Cependant, malgré l'intérêt croissant des chercheurs sur ce nouveau matériau, le BAP n'a pas encore gagné l'acceptation mondiale comme matériau de construction et son utilisation reste limitée. Le développement d'un BAP économique ayant des propriétés intéressantes à l'état frais et durci est important pour qu'un tel béton soit employé dans l'industrie du bâtiment.

Pour trouver de nouvelles solutions économiques s'ajoutant aux solutions techniques, des recherches sur les BAP économiques ont été conduites au cours des dernières années.

Notre étude porte sur une contribution à la valorisation d'un déchet urbain qui est nuisible en raison de son caractère encombrant et inesthétique, et qui avant son rejet rendait de nombreux services dans la vie quotidienne, il s'agit des sédiments fluviaux dragué du barrage de Fergoug et Chorfa au niveau de la wilaya de Mascara.

L'étude que nous entreprenons, consiste à la formulation d'un béton autoplaçant avec cet ajout, il s'agit de substituer une partie du ciment par les vases de Fergoug et Chorfa,

sachant que ces deux dernières ont subi un traitement thermique dans le but d'améliorer leurs propriétés (activité pozzolanique).

La présente étude englobe cinq principaux chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur les sédiments et l'évolution de l'envasement des barrages en Algérie.
- Le deuxième chapitre concerne les généralités sur la valorisation des sédiments dragés dans le domaine de génie civil.
- Dans le troisième chapitre est exposée une actualisation bibliographique sur les bétons autoplaçants qui concerne son utilisation, son mode d'emploi, les différentes méthodes de formulation et leur propriété à l'état frais et durci.
- Le quatrième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux et les méthodes d'essai et d'expérimentation, où nous donnons des aperçus sur les méthodes et les modes opératoires des différents essais effectués sur le ciment, les vases, les granulats ainsi que la formulation du BAP et les essais effectués sur ce dernier à l'état frais et durci.
- Quant au cinquième chapitre, il englobe les résultats expérimentaux relatifs aux bétons à l'état frais et les propriétés mécaniques des bétons à l'état durci. Puis nous procéderons à l'analyse des résultats des essais sur ces bétons à l'état frais (essai d'étalement, boîte en L, stabilité au tamis, essai de colonne essai de ressuage) et à l'état durci (résistances mécaniques).
- Enfin, nous clôturons notre étude par une conclusion générale et des perspectives susceptibles d'ouvrir d'autres horizons vers d'autres axes de recherches toujours bénéfiques à l'environnement et à la qualité de la construction.

# **Chapitre I : Généralité sur les sédiments et évolution de l'envasement des barrages en Algérie**

## **I. Introduction :**

L'accumulation de particules sédimentaires au fond et sur les bords de cours d'eaux et de voies de navigation ainsi que dans les ports maritimes conduit à les encombrer et les obstruer. Pour les cours d'eau navigables, cela ralentit l'écoulement et empêche les activités de transport qui s'y pratiquent. Pour les cours d'eau non navigables, cette accumulation augmente le risque de crues. Afin de maintenir et de restituer ces accès, il est nécessaire de draguer ou de curer régulièrement.

## **I.2. Généralité sur les sédiments**

### **I.2.1. Définition et origine**

Dans le dictionnaire de géologie [Foucault et Raoult, 1980], les sédiments, plus communément appelés vases, sont définis comme « un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport ». La sédimentation désigne l'ensemble des processus par lesquels ces particules organiques ou minérales en suspension et en transit cessent de se déplacer.

On distingue 2 origines aux sédiments [Schneider, 2001], [Bertreau, et al 1993] :

- Origine endogène : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux ;
- Origine exogène : il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micro-polluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques.

### **I.2.3. Constitution des sédiments**

Les vases sont constituées de 4 éléments principaux [Agence de l'eau (1), 2002] :

- La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates);
- La fraction argileuse (kaolinite, illite ou smectite);
- La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques et humiques) ;

· Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

Les argiles sont des silicates d'aluminium hydratés qui présentent une structure cristalline en feuillets. Cette constitution permet l'hydratation des argiles, avec parfois un phénomène de gonflement très important. La plupart des argiles sont thixotropiques. Elles perdent leur rigidité en présentant le comportement d'un liquide lorsqu'elles subissent une sollicitation mécanique, et retrouvent leurs caractéristiques initiales au repos. La souplesse des liaisons entre les feuillets, permet aux argiles d'avoir un comportement plastique. La dernière propriété des argiles est l'interaction avec les espèces ioniques. En effet, les charges négatives des argiles sont neutralisées par des cations compensateurs. Or, ces cations peuvent s'échanger avec ceux présents dans le milieu et notamment avec les métaux lourds : c'est le phénomène d'adsorption.

En ce qui concerne la matière organique, on retrouve dans les sédiments tous les composés organiques naturels, issus des végétaux, des algues et des animaux, ou biosynthétisés par la microflore, ainsi que les colloïdes humiques. La décomposition de ces matières est très lente (plusieurs centaines d'années) et combine de très fortes propriétés tensioactives et complexantes. Les substances humiques colorent la vase en noir et interagissent avec la partie minérale, provoquant des agglomérations. En général, la proportion massique de matière organique est de l'ordre de 2 à 10 % pour les sédiments des cours d'eaux et elle est constituée à 60% de composés humiques [Schneider, 2001].

Enfin, la nature de l'eau contenue dans les vases, appelée « eau interstitielle » afin de la différencier de la colonne d'eau qui se trouve au-dessus, peut être répartie en 4 catégories :

- L'eau libre qui n'est pas liée aux fines;
- L'eau capillaire, liée aux fines par des forces de capillarité;
- L'eau colloïdale qui hydrate les colloïdes;
- L'eau adsorbée qui est liée à la surface des particules et constitue un film autour d'elles.

#### **I.2.4. Granulométrie des sédiments**

La distribution granulométrique d'un sédiment et plus globalement, de n'importe quel matériau, constitue son empreinte physique. Elle caractérise en effet la taille des particules constituant la phase solide du matériau. D'autre part, la répartition de fréquence de taille des grains explique la répartition des sédiments dans un milieu aquatique. En effet, les grosses particules restent en amont tandis que les plus fines se retrouvent en aval. Les différentes classes granulométriques couramment utilisées sont présentées dans le tableau 1.

Diamètre	Dénomination
> 20 mm	Cailloux
2 mm à 20 mm	Graviers
63 µm à 2 mm	Sables (grossiers et fins)
2 µm à 63 µm	Limons (ou silt)
< 2 µm	Argiles

Tableau I.1 : Classes granulométriques d'un matériau [Scordia, 2008]

Une vase est généralement constituée des 3 dernières classes : sables, limons et argiles. Précisons que le terme d'argile utilisé en minéralogie n'a pas le même sens que celui utilisé en granulométrie. Ici, c'est un critère uniquement basé sur la taille des particules et non sur leur composition chimique et minéralogique.

La proportion de sables, limons et argiles d'un sédiment peut varier très fortement en fonction de leur provenance géographique, du lieu de prélèvement (portuaire, estuarien ou fluvial), de la nature de la matière solide, etc. Cependant, la fraction argileuse est généralement prédominante. Par exemple, une étude effectuée par les Voies Navigables de France (VNF) a montré que sur le bassin de l'Escault, 90 % du volume des échantillons sont composés d'éléments de taille inférieure à 400 µm parmi lesquels 50 % se situent en dessous de 63 µm [Boucard, 2006].

Pour classer les matériaux fins dont la taille des particules est inférieure à 2 mm, les géotechniciens utilisent le diagramme triangulaire des sols fins de la figure I.1. Ce type de diagramme est particulièrement adapté aux sédiments [Bonnet, 2000].

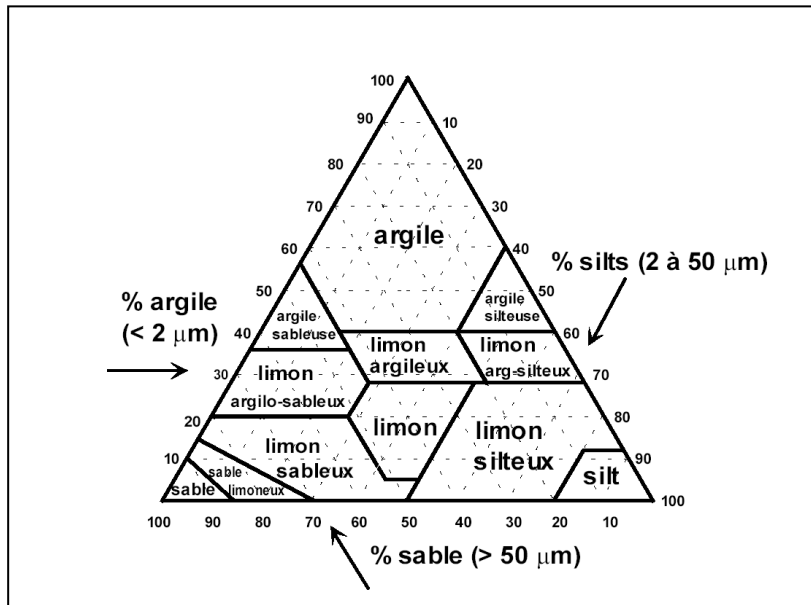


Figure I.1 : Diagramme triangulaire utilisé pour les sols fins [Scordia, 2008]

### I.2.5. Composition minérale des sédiments :

C'est selon la provenance que la composition minérale des sédiments diffère. Donc les sédiments terrigènes sont Les blocs, les cailloux, les graviers et les sables, sont issus de l'érosion des sols ; leur nature chimique dépend principalement des terrains érodés. Les sables sont essentiellement quartzeux (silice SiO<sub>2</sub>) ou silicatés (mica, feldspath), souvent accompagnés de minéraux lourds (amphiboles, grenats, disthène...) qui dépendent de la nature des sols érodés. On trouve aussi des sables calcaires. Enfin, les particules les plus fines telles que les limons, les boues et les vases, sont composées de minéraux argileux d'origine terrigène, et aussi des squelettes d'organismes d'origine endogène. Les sédiments se caractérisent également par leur granulométrie. [Agostini, 2006].

### I.2.6. Altération des sédiments :

La destruction des roches et des êtres vivant est à l'origine de la formation des différents sédiments, les actions purement mécaniques des agents d'érosion produisent des fragments qui sont à l'origine des sédiments détritiques. Les phénomènes chimiques donnent des solutions de lessivage riches en métaux qui sont à l'origine des sédiments chimiques. Les sédiments qui en résultent, grâce aux autres actions mécaniques et réaction chimiques donnent des sédiments d'autres compositions minéralogiques qui eux même, en présence d'agent d'érosion, peuvent être déblayés à leur tour et transportés sous forme solide ou en solution. Ils

peuvent se déposer temporairement dans des pièges continentaux, mais sont finalement remobilisés de force à force pour être déversés dans le milieu marin. [Beauchamp, 2005].

Le changement de température entraîne la dilatation et la contraction accompagnée d'une variation de volume grâce à la création des fissures ; d'un sédiment à l'autre, ça diffère dans les mêmes conditions. De plus, cette fissuration peut inclure d'eau qui, suite à la baisse de température, gèle en augmentant le volume causant ainsi son éclatement. L'eau qui pénètre est saline, et les sels qu'elle contient peuvent se développer en cristaux et produisent des craquelures. Enfin, le transport par l'eau, et accessoirement l'action du vent, use les matériaux et produit des éléments plus fins, étant donné que les grossiers transportés s'entrechoquent et se brisent.

Les réactions chimiques des sédiments se font en présence d'eau; elles sont générées notamment en milieu humide. Les réactions sont des hydrolyses, des oxydations, des hydratations, des décarbonatations pour les sédiments calcaires. Les éléments solubles peuvent être lessivés. Ceux insolubles restent en place en se recombinaison et formant des autres minéraux de néoformation tels que des argiles. Des organismes peuvent intervenir à ce processus d'altération pour qu'ils fournissent en particulier des matériaux minéraux ou organiques.

### **I.2.7. Transport des sédiments :**

Les sédiments ne peuvent être transportés sauf en présence de l'un des agents de transport tel que le vent, la gravité pure, la glace et l'eau [Beauchamp, 2005].

#### **I.2.7.1. Transport par le vent :**

Comme l'air a une densité un millier de fois inférieure à l'eau, sa capacité de transport est beaucoup plus faible et les matériaux grossiers sont laissés sur place, formant un "pavement". Le vent possède par contre un bon pouvoir de classement et le transport s'effectue essentiellement par saltation et collisions intergranulaires des grains sableux, avec le matériau fin exporté plus loin. Ceci explique l'homogénéité granulométrique des dépôts éoliens. Contrairement à leurs équivalents marins, les courants aériens n'ont pas la limitation imposée par la surface de la mer et les dunes éoliennes ne sont limitées en hauteur que par la force des vents et l'apport en sable [Nougar, 2009].

### **I.2.7.2. Transport par gravité pure :**

C'est un mode de transport se trouvant dans les régions montagneuses et désertiques qui connaissent des différences d'altitude présentant des pentes, et distinguées de forte désagrégation mécanique des roches. Les éléments se déplacent sur une faible distance et s'accumulent en cônes d'éboulis. Ils sont non usés et de toute taille ; les plus gros descendent plus loin et forment la frange du cône. La porosité des éboulis est grande et la percolation des eaux. Suite à de fortes pluies, l'action de l'eau s'ajoute à la gravité. La phase fine d'argile devient des coulées boueuses qui glissent sur les pentes et peuvent causer des dégâts considérables. Les autres éléments anguleux d'en vrac se trouvent emballés dans ces coulées [Nougar, 2009].

### **I.2.7.3. Transport par la glace :**

La glace résulte de la transformation de la neige dans un climat froid et humide par compaction et fusion. Elle s'écoule comme un fluide visqueux et forme un glacier, Les matériaux transportés sont fortement hétérométriques. Les éléments ne s'usent pas quand ils se choquent comme dans le cas du transport éolien ou aquatique, mais ils peuvent être broyés entre eux ou contre les parois de la vallée sous l'effet de la pression de la glace. La distance de transport est de quelques dizaines de km pour les glaciers de montagne mais elle peut dépasser la centaine de Km pour les grands systèmes glaciaires (glaciers du Groenland) [Nougar, 2009].

### **I.2.7.4. Transport par l'eau :**

Le transport des sédiments par l'eau dépend du type d'écoulement selon qu'il s'agit d'eau sauvage ou canalisée. En générale l'eau transporte des matériaux par charriage, en suspension et en solution. Les matériaux détritiques sont transportés d'autant plus loin qu'ils sont plus petits en se choquant et s'usant au cours du transport en établissant un classement longitudinal.

On distingue deux types d'écoulement tels que l'écoulement canalisé des eaux qui coulent dans un ou plusieurs chenaux en fonction de la pente et de la vitesse. Et l'écoulement non canalisé des eaux sauvages qui correspondent au ruissellement suite à de fortes pluies sur une pente où l'érosion est importante mais la longueur du transport est faible. Les filets d'eau se rassemblent et forment un canal. Il est développé en montagne et en particulier dans les bassins de réception des torrents, il évolue en de véritables coulées boueuses [Nougar, 2009].

### **I.2.8. Dépôt des sédiments :**

Pour une taille donnée des grains, les sédiments transportés par charriage arrêtent de continuer leur déplacement et regagnent le fond dès que la contrainte tangentielle de dépôt critique est atteinte. Lorsque la contrainte tangentielle de dépôt critique est atteinte, les sédiments vont alors retomber sur le lit. Mais cette contrainte dépend de la taille du grain. Les gros grains retombent dès que la gravité est plus forte que la portance mais ils peuvent rester en suspension au niveau de la couche de charriage grâce à l'action des tourbillons. On en déduit que dans ce cas la contrainte tangentielle de dépôt critique est supérieure à la contrainte de cisaillement critique. Il apparaît alors un phénomène de retard de dépôt. Les grains de taille différente ne vont pas atteindre le fond au même moment [Nougar, 2009].

### **I.2.9. La contamination des sédiments**

D'après G. Schneider [Schneider, 2001], ces dernières années, le phénomène d'envasement s'est amplifié en raison de l'accroissement des apports anthropiques et de l'érosion (dû notamment à des opérations de remembrement qui ont entraîné la destruction des haies et des talus). La contamination a commencé à la fin du siècle dernier. Cette pollution est principalement due aux rejets industriels et urbains. Les contaminants à l'origine de cette pollution sont généralement classés en trois grands groupes.

#### **I.2.9.1. Les éléments nutritifs**

Il s'agit notamment du phosphore et des composés azotés comme l'ammoniaque. Ils proviennent des rejets d'eaux usées urbaines et d'effluents agricoles et industriels. Ils sont à l'origine de l'eutrophisation des milieux.

#### **I.2.9.2. Les métaux lourds**

Ils se retrouvent souvent à l'état de traces, indispensables au métabolisme pour la plupart (sauf le plomb, le mercure et le cadmium), une fois dépassé un seuil de tolérance, les métaux sont considérés comme toxiques. Ils sont alors incompatibles avec les phénomènes vitaux et certains d'entre eux ont des propriétés cancérigènes et mutagènes. Les principaux métaux lourds sont le cadmium, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel, le sélénium, l'arsenic (métalloïde) et d'autres éléments spécifiques au passé industriel (argent). Les métaux lourds peuvent être fixés sur les particules minérales et les matières organiques des sédiments.

Un autre mode d'immobilisation peut être lié aux phénomènes de précipitation. Les métaux précipitent alors sous des formes plus ou moins insolubles d'oxydes, d'hydroxydes, de carbonates, de phosphates, ou de sulfures. Les métaux piégés dans le sédiment sont en général

en équilibre avec l'eau interstitielle. Mais la moindre perturbation de l'environnement peut remobiliser les métaux. Différents mécanismes sont à l'origine de ce phénomène : réactions d'oxydo-réduction, activité biologique, présence de chélatants, ou les perturbations physicochimiques [Agostini, 2006].

<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Hg</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
Arsenic	Cadmium	Chrome	Cuivre	Mercure	Nickel	Plomb	Zinc

Tableau I. 2 : Métaux lourds présents dans les sédiments fluviaux [Scordia 2008]

### **I.2.9.3. Les micro-polluants organiques**

Ils représentent le troisième grand groupe de contaminants (les HAP: hydrocarbures polycycliques aromatiques, pesticides, solvants chlorés, PCB). Ces éléments sont souvent très toxiques, solubles ou adsorbés sur les matières en suspension.

En définitive, la sédimentation (donc l'envasement) est un phénomène naturel qui voue le plan d'eau à disparaître naturellement par comblement. Les problèmes que pose cette sédimentation à l'heure actuelle, viennent de l'augmentation de la vitesse d'envasement ainsi que de la toxicité accrue des sédiments [Agostini, 2006].

### **I.2.10 .Les techniques de dévasement**

Les techniques de dévasement des barrages peuvent être résumées globalement par les deux moyens suivants :

- Utilisation des moyens de vidange dont est équipé le barrage (les soutirages). Dans ce cas l'état avancé de consolidation des sédiments, ou bien celui où les vases sont encore en suspension ne permettent pas l'utilisation efficace de cette technique.
- Utilisation d'un moyen d'enlèvement des matériaux adapté à leur état de consolidation en place dans la cuvette de la retenue (les dragages) [Semcha, 2006].

#### **I.2.10.1. Etat des vases avant dragage**

Avant désenvasement, les sédiments se présentent à l'état consolidé sous forme de couches juxtaposées, emprisonnant des formations plus grossières. Dans cet état consolidé la vase aura des caractéristiques différentes selon ses propriétés et le milieu dans lequel s'effectue le tassement. Ce sont les paramètres suivants qui influent ces propriétés :

Les dimensions des particules : d'après Mignot, dans la formule du tassement en fonction du temps :

$$T_s = a \cdot \log t + b \quad (1)$$

Le coefficient « a » est une fonction décroissante avec le diamètre « d » des particules pour toutes les phases du tassement.

- Phase de décantation des flocons :  $a = 0,01 + 0,05d$
- Phase d'élimination des eaux interstitielles :  $a = 0,01 + 0,015d$
- Phase d'élimination des eaux fixées aux micelles :  $a = 0,01 + 0,001d$

Ces relations sont issues d'expériences dans des conditions idéales, vu qu'au préalable les particules gênantes ont été retirées. La nature minéralogique a aussi une influence sur le tassement, du fait que ce sont les minéraux constitutifs qui assurent la rétention de l'eau.

- Le milieu aqueux : les éléments chimiques dissous dans l'eau, ont une influence variable sur le tassement des particules en suspension.

- Les conditions initiales de sédimentation : pour apprécier l'influence des conditions initiales, les deux paramètres surveillés sont la vitesse de tassement et le tassement final. Les paramètres influents sont la hauteur et la concentration en particules à l'état initial. Plus ces deux paramètres sont élevés plus le tassement final est important, mais plus la vitesse est faible. Le mouvement ascendant de l'eau drainée permettant la consolidation, est gêné.

- Les matières organiques : leur présence est limitative du tassement, par la formation de gaz lors de leur décomposition qui perturbent la concentration des dépôts.

- La présence de sable : elle favorise de façon générale le tassement. Le drainage de l'eau se fait plus facilement lorsque des grains sont dispersés dans les sédiments. La perméabilité est augmentée par leur présence [Semcha, 2006].

### **I.2.10.2. Méthodes de dragage et de transport**

L'extraction et l'évacuation des sédiments sont deux phases importantes d'une opération de dragage. En effet, lors de ces phases, les sédiments subissent de nombreuses transformations pouvant modifier leurs caractéristiques et leurs comportements. Ces deux étapes peuvent aussi avoir un impact direct sur l'environnement par la remise en suspension de ces sédiments [Nguyen, 2008].

#### **a. Techniques de dragage**

Il y a quatre principales techniques de dragage : dragage en eau, dragage hydraulique, dragage mécanique et dragage pneumatique [AEAP, 2000].

Les dragages en eau consistent à la remise en suspension et la dispersion des sédiments par un courant naturel ou artificiellement entretenu et ils sont éparpillés ou transférés vers une zone définie. Les dragages hydrauliques utilisent des pompes centrifuges, aspirant à travers un

tube d'élinde, les sédiments sous forme de boues liquides de haute teneur en eau. Les dragages pneumatiques fonctionnent sur le même principe que les dragues hydrauliques mais avec une aspiration générée par des pompes à air comprimé. Les dragages mécaniques agissent par action mécanique d'un outil (benne, godet) directement sur les matériaux à draguer.

Les dragages mécaniques, hydrauliques ou pneumatiques évoqués ci-dessus peuvent être améliorés pour avoir une plus grande précision dans l'opération de dragage (le positionnement de la drague, le maintien des matériaux dragués à leur densité initiale, l'étancheification des godets, bennes, l'isolement de la zone de dragage, l'automatisation des phases de travail U). Ceci a pour objectif de limiter le volume à draguer, la remise en suspension des contaminants. Ils sont qualifiés de dragages environnementaux [Nguyen, 2008].

### **b. Equipements du dragage portuaire**

Les conditions écologiques, considérées aujourd'hui très pénibles, ne permettent plus de draguer les ports sans tenir compte des conditions attentives envers l'environnement. A cet effet plusieurs équipements de dragage ont été apparus dans les dix dernières années pour excaver les sédiments.

Le choix des outils de dragage dépend de plusieurs paramètres, à savoir l'épaisseur de la couche à excaver, l'éloignement du site de dépôt, la qualité tolérée de solides en suspension, la qualité des matériaux dragués, la hauteur d'eau dans les ports et la capacité de l'installation de traitement [Nguyen, 2008].

Les équipements de dragage des sédiments portuaires sont classés selon leurs méthodes d'excavation et de fonctionnement. Les dragues sont généralement regroupées dans trois catégories principales :

- **Les dragues mécaniques :**

Le principe de fonctionnement de ce type de drague se fait soit par action mécanique d'un godet soit par une benne qui enlève les matériaux, elles sont employées en général pour l'extraction des sédiments graveleux [Bekari, 2010].

Il en existe plusieurs types :

- Drague rétrocaveuse ou ponton grue
- Drague excavatrice sur ponton à chargement frontal
- Drague à benne traînante ou dragline
- Drague à godets (figure I.2)
- Drague à pelle (figure I.3)

· Drague à benne preneuse (figure I.4)

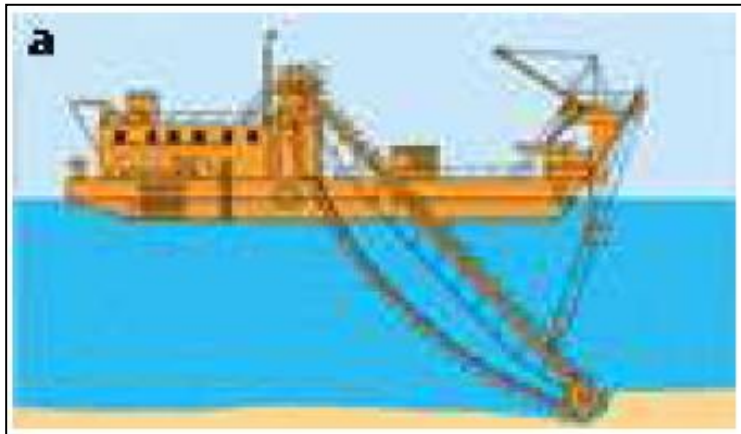


Figure I.2 : Drague à godets [source : IFREMER 2010]



Figure I.3: Drague à pelle [Ministère de l'Ecologie et de l'Energie ,2009]



Figure I.4 : Drague à benne [Ministère de l'Ecologie et de l'Energie, 2009]

- **Les dragues hydrauliques :**

Le fonctionnement de ce type de dragues est basé sur le principe de la pompe centrifuge à eau. Ce sont les dragues les plus fréquemment utilisées dans le dragage des ports. Les dragues hydrauliques présentent l'avantage de faible remise en suspension des sédiments et un rendement élevé par rapport aux autres dragues [Bekari, 2010].

On distingue trois familles de ce type de dragues :

- Aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement (figure I.5).
- Aspiratrice en marche (figure I.6).
- Dragues fondables (figure I.7).



Figure I.5: Aspiratrice stationnaire avec conduite de refoulement [Ministère de l'Ecologie et de l'Energie ,2009]



Figure I.6: Aspiratrice en marche [Ministère de l'Ecologie et de l'Energie, 2009]

- **Les dragues pneumatiques :**

Dans le cas d'extraire des matériaux non cohérents et en circulation ainsi qu'au traitement des sédiments contaminés, l'utilisation des dragues pneumatiques semble convenable, car elle permet :

- Un refoulement continu des boues
- Un contact réduit entre l'équipement et les sédiments contaminés
- Une remise en suspension minimum des sédiments



Figure I.8: Système "JETSED" [IFREMER, 2010]

La technique de dragage "jetsed" consiste à fluidiser le sol par application d'eau souspression ou d'air comprimé ; le sédiment est alors remis en suspension et peut être véhiculé par les courants [Bekari, 2010].

### **I.2.10.3. Evacuation des sédiments**

Le mode de transport des sédiments extraits est étroitement lié à la technique de dragage adoptée, la filière de destination des sédiments ainsi qu'à des contraintes environnementales. Il existe généralement les modes de transport suivants : conduites, tapis roulant, chalands, camions, trains, [AEAP, 2000].

Les conduites sont compatibles avec des dragues hydrauliques et pneumatiques du fait de la nécessaire fluidité du matériel transitant dans la conduite. Ces conduites transportent les matériaux sous l'action de pompes centrifuges ou de pompes à air comprimé. Les pompes à haute pression (système Putzmeister) peuvent être utilisées dans les cas des sédiments à teneur en eau faible pour leur transbordement via les conduites hydrauliques qui sont ensuite

déchargées a terre ou dans des camions. Par ailleurs, les tapis roulants sont employés pour des matériaux issus d'une drague mécanique ou assèches.

Les barges ou chalands peuvent être utilisés indifféremment à partir de dragues mécaniques ou hydrauliques. Ce mode de transport nécessite un tirant d'eau minimum dans le chenal de navigation pour le passage des barges.

Si la destination finale des matériaux de dragage n'est pas en bordure de port ou s'il s'agit d'une opération de dragage de petite envergure, les camions sont les moyens les plus adéquats. Ils sont plutôt conseillés pour des matériaux denses, donc issus d'une drague mécanique. Ce moyen de transport peut être très intéressant si les matériaux ont plusieurs destinations finales ou si le coût d'un traitement sur place est trop élevé. Le transport en grande quantité par train n'est retenu que dans des cas très particuliers car il nécessite une infrastructure lourde de réseau ferroviaire [Bekari, 2010].

#### **I.2.10.4. Stockage des sédiments.**

Dans un esprit de développement durable, la gestion de l'environnement doit prendre en compte tous les aspects liés à la mise en dépôt et au stockage des sédiments issus des opérations de dragage.

Grâce aux médias, le grand public est maintenant bien informé des dommages que court l'environnement du fait des « pollutions » dont les origines et les formes sont multiples. Mais le grand public est beaucoup moins sensible au rôle protecteur que le sol peut exercer à l'égard des pollutions si certaines conditions sont respectées.

L'efficacité du sol est moins évidente lorsque la pollution est provoquée par les composants même du sol, ou de sa constitution physique qui altère directement les équilibres des bassins versants vis-à-vis des ruissellements et des infiltrations alimentant les nappes souterraines.

Cependant, une attention particulière est attirée sur les désordres pouvant apparaître suite aux dépôts et stockages des matières de granulométrie fine. En effet, dans le cas de dragage du Fergoug, le dépôt des sédiments en aval de la digue a été à l'origine de la grande catastrophe écologique pour toute la plaine située en aval du barrage. (Les figures I.9 et I.10 illustrent le mode de rejet par écoulement vaseux à la sortie d'une vidange et celui par la drague suceuse)[Semcha, 2006].



Figure I.9: Ecoulement de la vase à sa sortie d'une vidange de fond.  
(Barrage de Fergoug)[Semcha, 2006].



Figure I.10: Zone de stockage des sédiments  
-Rejet en cours par drague suceuse-(Barrage de Fergoug) ][Semcha, 2006].

En réponse aux problèmes que suscite le devenir des quantités considérables de sédiments dragués et la non adaptation des solutions antérieures de leur mise en dépôt, des mesures nouvelles de protection de ces matières contre la lixiviation des dépôts par les eaux de pluie et de ruissellement, ont été prises.

Troalen [1998] propose des traitements préalables de densification des vases et la prévision d'aires de stockages aménagées. « La mise en dépôt en remblais (si non pollués) de mélanges vases-limons une fois densifiés, est tout à fait réalisable avec des caractéristiques physiques et mécaniques largement suffisantes ( $R_c > 350$  kPa,  $R_c$  étant la résistance à la

compression). De plus les mélanges vases-limon ont une composition minéralogique telle, qu'une fois liée à la fraction organique apportée par les vases, il est possible d'envisager une végétalisation immédiate dans le cas d'utilisation en remblais de ces mélanges. Dans le cas de la mise en dépôt, il s'agit cette fois de stocks de mélanges vases-limons pollués et en attente de dépollution avant leur valorisation et leur réutilisation éventuelle.

### **I.3. Évolution de l'envasement des barrages en Algérie**

#### **I.3.1. Avant l'indépendance (1962)**

Selon Rene [1980], l'érosion s'est développée du fait de la déforestation massive et du ruissellement généralisé durant l'époque coloniale. D'énormes quantités de terre arrivent annuellement dans les retenues. Par conséquent, la sédimentation dans les barrages pose des problèmes de maintenance et la réduction rapide de la capacité de stockage.

Le premier barrage construit en Algérie, en 1846, est le barrage de Sig. Il a été abandonné faute de son envasement rapide. En 1957, les barrages d'Algérie d'une capacité de 900 Mm<sup>3</sup> avaient accumulé près de 200 Mm<sup>3</sup> [Valembos et Migniot, 1975]. En 1962 (date de l'indépendance), l'Algérie comptait 16 grands barrages en exploitation d'une capacité de 1,3 milliards de m<sup>3</sup> (Figure I.11). Le suivi de l'évolution de l'envasement dans ces réservoirs depuis 1962 a montré que les dépôts sédimentaires s'accumulaient progressivement dans les 16 barrages pour atteindre en 2006 (derniers levés bathymétriques) un volume de 492 Mm<sup>3</sup> de vase, soit une perte de capacité de 38% .

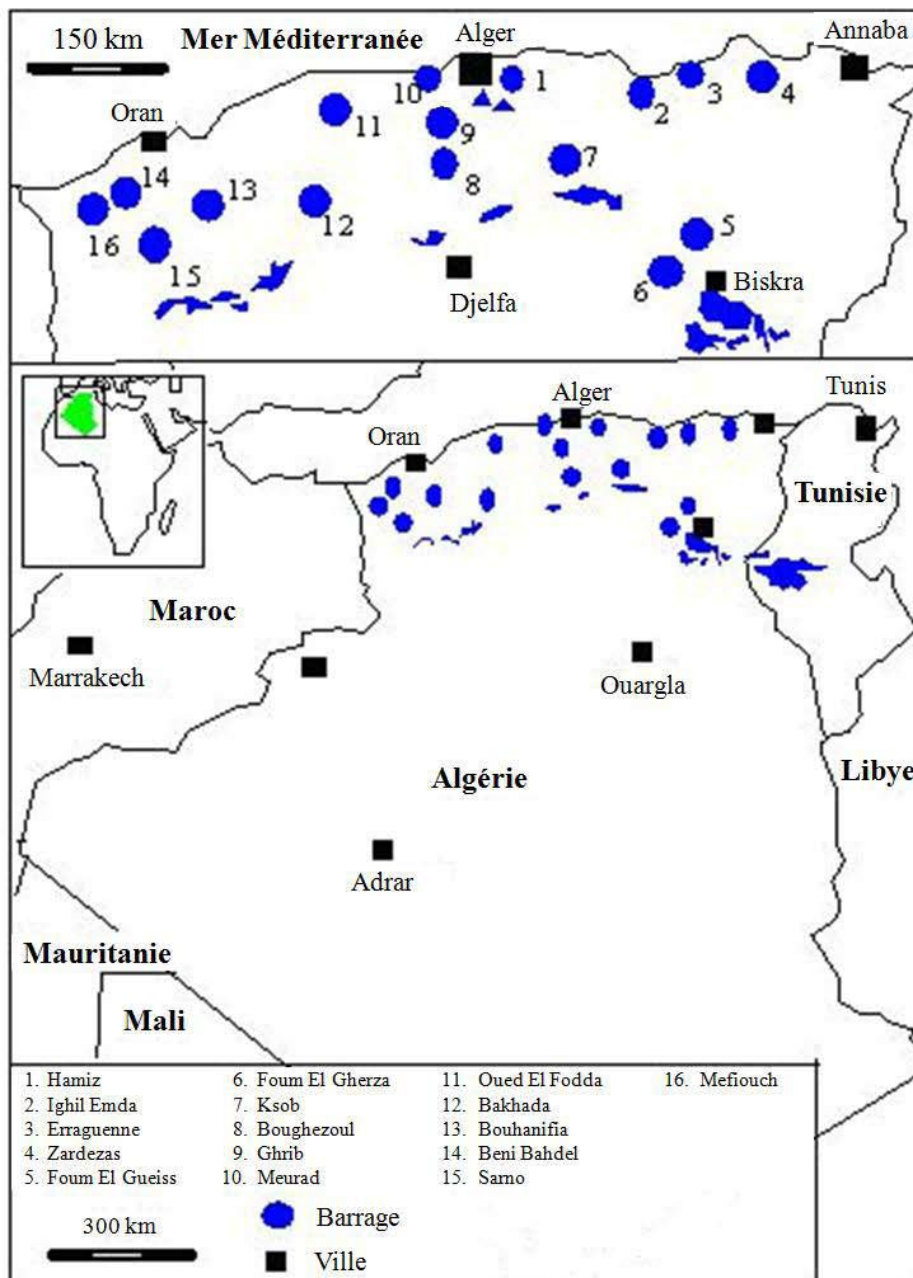


Figure I.11. Situation des premiers barrages en exploitation depuis 1962 [Remini et Hallouche, 2007]

### I.3.2. Après l'indépendance (après 1962)

En 1890, il existait en Algérie neuf barrages, d'une capacité de 61 Mm<sup>3</sup> et un volume de vase de 2,7 Mm<sup>3</sup>. Cette capacité a atteint 1 milliard de m<sup>3</sup> en 1962. A partir de cette date, le nombre de barrages a augmenté considérablement. Ainsi, en 2006, l'Algérie présentait une capacité de 6,8 milliards de m<sup>3</sup>. Le volume total a été multiplié par 7 en 45 ans. Le volume de vase a augmenté de 5,5 fois par rapport à celui de 1962, pour atteindre en 2006 le volume de 1,1 milliards de m<sup>3</sup> [Remini et Hallouche, 2007] (Figure I. 12).

Il existe actuellement 57 grands barrages en exploitation qui, tous a des degrés divers, s'ensavent progressivement chaque année de 45 Mm<sup>3</sup>, ce qui représente une perte de capacité annuelle égale a 0,65% de la capacité totale.

Il est donc constate que l'incidence de l'ensablement peut être importante, puisqu'un cumul de 1,1 milliards de m<sup>3</sup> s'est déposé en 2006 dans les réservoirs de ces barrages, l'équivalent d'une perte de 16% de la capacité totale. De plus, il est possible de remarquer qu'il ne faut pas exagérer l'importance du phénomène et que le taux d'ensablement de 0,65%/an signifie que les barrages peuvent durer 140 ans. Il faut donc bannir l'idée trop couramment admise que l'ensablement condamne les barrages en Algérie. C'est un phénomène important, mais il faut se garder de le considérer comme une donnée fondamentale de l'hydraulique en Algérie et que toute étude hydrotechnique doit prendre en considération ce paramètre. Il est a signaler que le taux d'ensablement a beaucoup augmente au début des années 2000, surtout du a la sécheresse qui a sévit l'Algérie durant les années 1990, suivie des années humides. Cette alternance d'années sèches et humides a provoqué une forte érosion des bassins versants. En effet, les années 1990 (sèches) ont été caractérisées par une faible couverture végétale et des sols dissèques et ameublés. Par contre, les années 2000 ont été caractérisées par des pluies intenses et dévastatrices pour les sols.

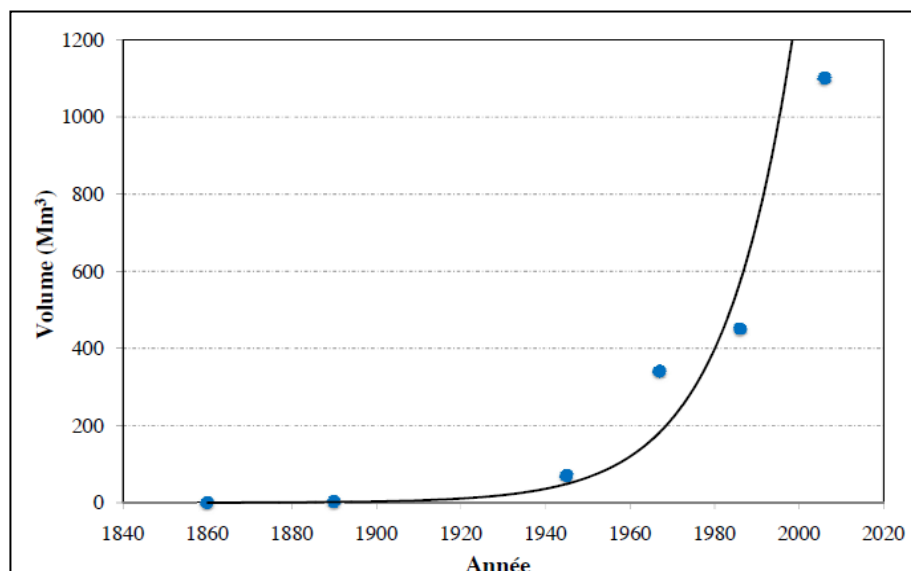


Figure I.12. Evolution dans le temps de l'ensablement des barrages en Algérie [Remini et Hallouche, 2007]

En conséquence, les crues de ces cinq dernières années, qui ont été violentes et brutales, sont la cause d'une forte ablation de la couche superficielle du sol. Il a été constaté que, d'après les derniers levés bathymétriques effectués en 2005 et 2006 par l'Agence

Nationale des Barrages (ANB) sur les grands barrages, le taux d'envasement de certains barrages a considérablement augmenté par rapport à celui de 1986 (Tableau I.3) .

Barrage	Taux d'envasement annuel 1986 (Mm <sup>3</sup> )	Taux d'envasement annuel 2004 (Mm <sup>3</sup> )
SMBA (Tiaret)	1	1,3
Djorf Torba (Bechar)	1,3	2,6
Ksob (Msila)	0,3	0,6

Tableau I.3. Taux d'envasement déduit par les levés de 1986 et 2004 (Source : données de l'Agence Nationale des Barrages)

Suite à la mise en exploitation de 26 nouveaux barrages, dont celui de Beni Haroun qui est le plus grand barrage de l'Algérie (capacité de 960 Mm<sup>3</sup>), la capacité de stockage a doublé en 20 ans, en passant de 3,2 milliards de m<sup>3</sup> en 1986 à 6,8 milliards de m<sup>3</sup> en 2006.

Cette augmentation de la capacité a forcément entraîné une augmentation du volume de vase. Pour le seul barrage de Beni Haroun, le dépôt annuel de sédiments a été estimé à 9 Mm<sup>3</sup>. Pour le moment, le taux d'envasement est évalué à 3,5 Mm<sup>3</sup> de vase par année, puisque sa capacité actuelle ne dépasse pas 350 Mm<sup>3</sup>.

Sur les 57 barrages en exploitation, 18 barrages sont fortement menacés par l'envasement, puisque le taux de comblement dépasse 55% de leur capacité totale (Figure I.13). Quatre barrages (Zardezas, Foug El Gherza, Fergoug et Ksob) sont en phase de dévasement par la technique de dragage (Remini et Hallouche, 2004). Les barrages Beni Amrane, Ghrib et Foug El Gueiss font actuellement l'objet d'une surélévation de leur digue dans le programme entamé depuis 2000 par l'ANB .

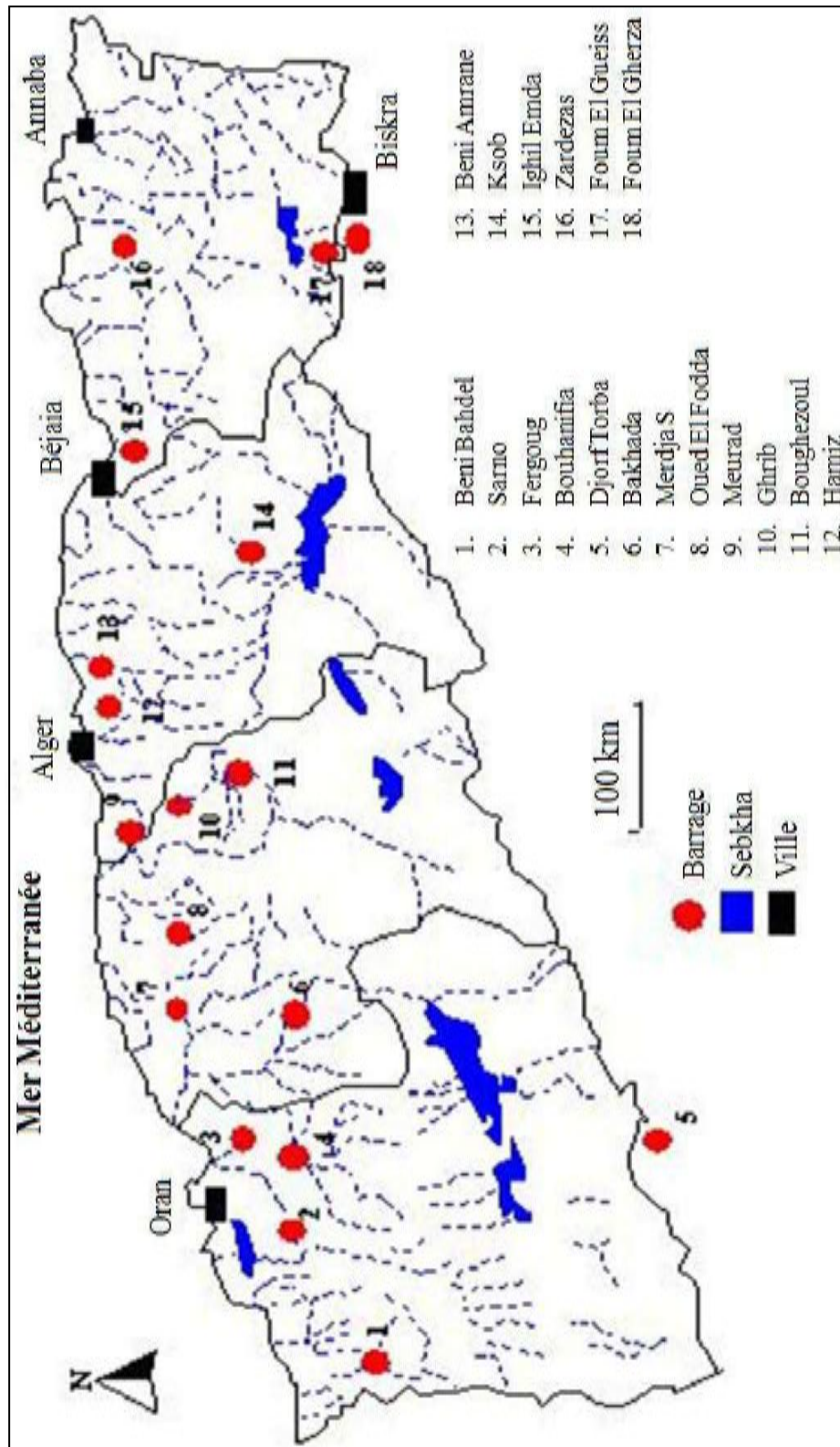


Figure I.13. Situation géographique des barrages les plus menacés par l'envasement [Remini et Hallouche, 2007]

### I.3.3. Les techniques de dévasement utilisées

Dans une région à un fort taux d'érosion, tel que l'Algérie, lorsque l'envasement d'un barrage atteint un seuil critique, trois choix se posent aux barragistes : le dévasement du barrage, l'abandon progressif de l'aménagement et la réalisation d'un nouveau barrage.

Le dévasement par dragage et la surélévation de la digue restent les meilleurs moyens pour faire face au comblement rapide des retenues. L'abandon d'un barrage est une mauvaise solution, surtout sur le plan social. Jusqu'à aujourd'hui, cinq barrages ont fait l'objet d'un déclassement (Tableau I.4). La réalisation d'un nouveau barrage de même taille que celui abandonné et sur le même cours d'eau pose généralement le problème de site.

En Algérie, deux barrages ont été remplacés (Tableau I.5).

Pour accroître la durée de vie des barrages en Algérie, les différentes techniques utilisées sont la surélévation de la digue, le dragage et l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidanges (chasses et soutirage des courants de densité).

Barrage	Année de mise en service	Capacity initiale (Mm <sup>3</sup> )
Fergoug II (Mascara)	1871	30
Sig (Mascara)	1846	1
Cheurfas I (Bel Abbes)	1882	14,4
Magoum (Mascara)	1887	1
Saint Lucien (Tlemcen)	1871	1
Tlelat (Bel Abbes)	1860	0,73
Djidiouia (Bejaia)	1877	0,70

Tableau I.4. Les barrages abandonnés en Algérie (données de l'Agence Nationale des Barrages)

Barrage)	Ancien Barrage	Année de mise en eau	Capacité (Mm3
Ancien	Fergoug II (Mascara)	1871	30
Nouveau	Fergoug III (Mascara)	1970	18
Ancien	Cheurfas I (Bel Abbes)	1882	14,4
Nouveau	Cheurfas II (Bel Abbes)	1992	82

Tableau I.5. Anciens barrages remplacés par un nouveau barrage (données de l'Agence Nationale des Barrages)

### I.3.3.1. Surélévation des barrages

L'une des techniques de lutte contre l'envasement, et par conséquent permettant de prolonger la durée de vie d'un barrage, est la surélévation de la digue. L'Algérie est parmi les premiers pays du monde à pratiquer cette technique. Cette méthode consiste, lorsque le taux de comblement est avancé, à élever la hauteur de la digue d'une taille variable, permettant la constitution d'une réserve complémentaire pour compenser la perte du volume occupé par la vase. Depuis 1946 (date de la réalisation du premier barrage), neuf barrages ont fait l'objet d'une surélévation (Figure I.14).

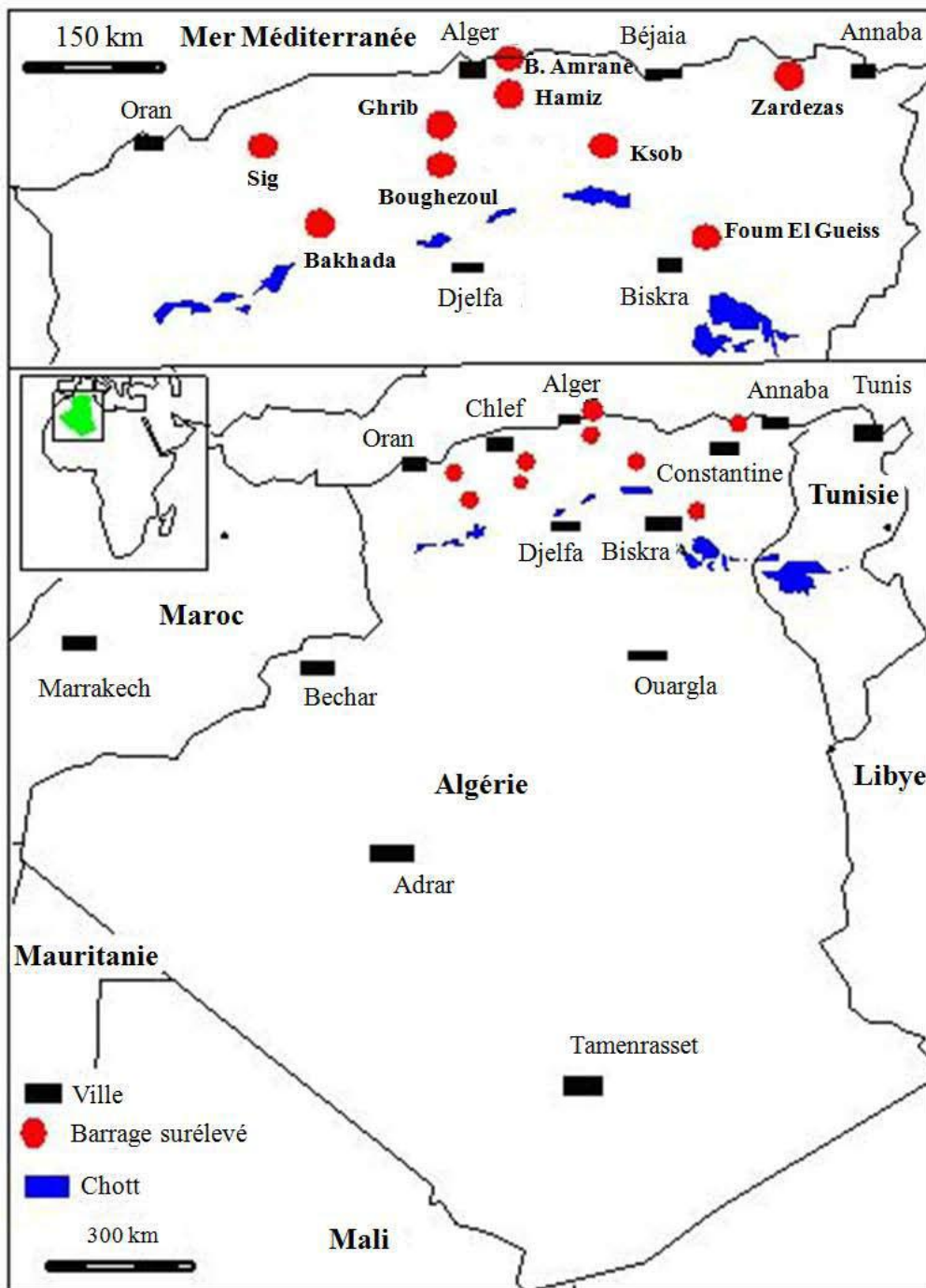


Figure I.14. Situation des barrages surélevés [Remini, 2008]. Chott est une zone humide située en bordure d'une sebkha

Durant 160 ans d'exploitation (1846-2006), environ 94 Mm<sup>3</sup> ont été récupérées par la surélévation des digues appliquées sur les neuf ouvrages. La surélévation des digues s'est accélérée à partir de 1962, à partir de quand environ 50 Mm<sup>3</sup> de capacité ont été récupérées (Figure I.15). Cette valeur reste encore minime par rapport au fort taux d'envasement.

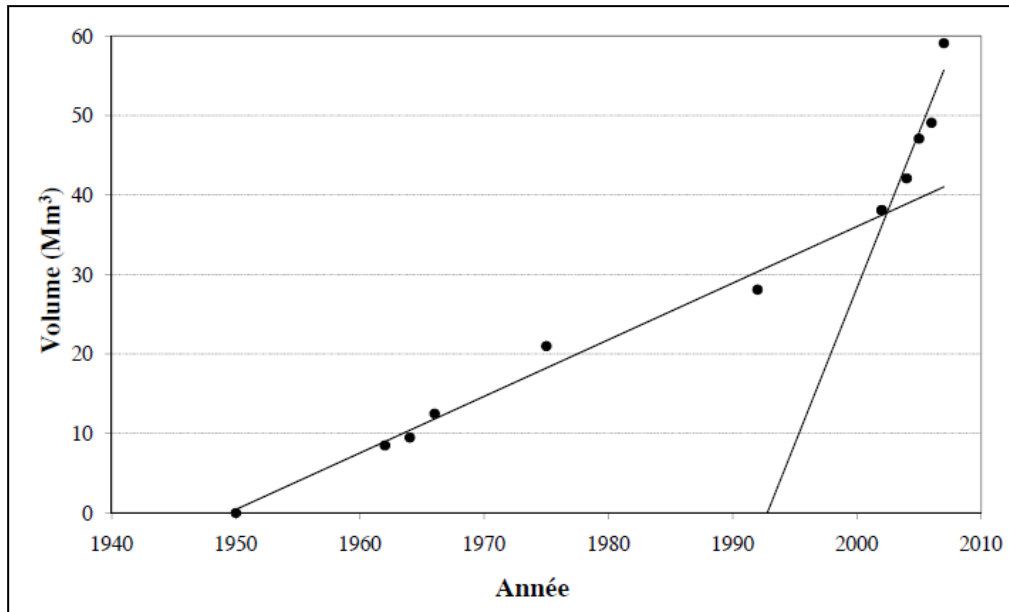


Figure I.15. Capacités récupérées par la surélévation des digues de barrages [Remini, 2008]

### I.3.3.2. Dragage des barrages

Lorsqu'un barrage est au stade avancé de l'envasement, le dragage de la retenue s'avère l'ultime recours, surtout lorsqu'il y a peu de sites favorables à la réalisation de nouveaux ouvrages. En Algérie, huit barrages ont fait l'objet d'un dévasement par dragage durant le demi-siècle dernier (Figure I.16).

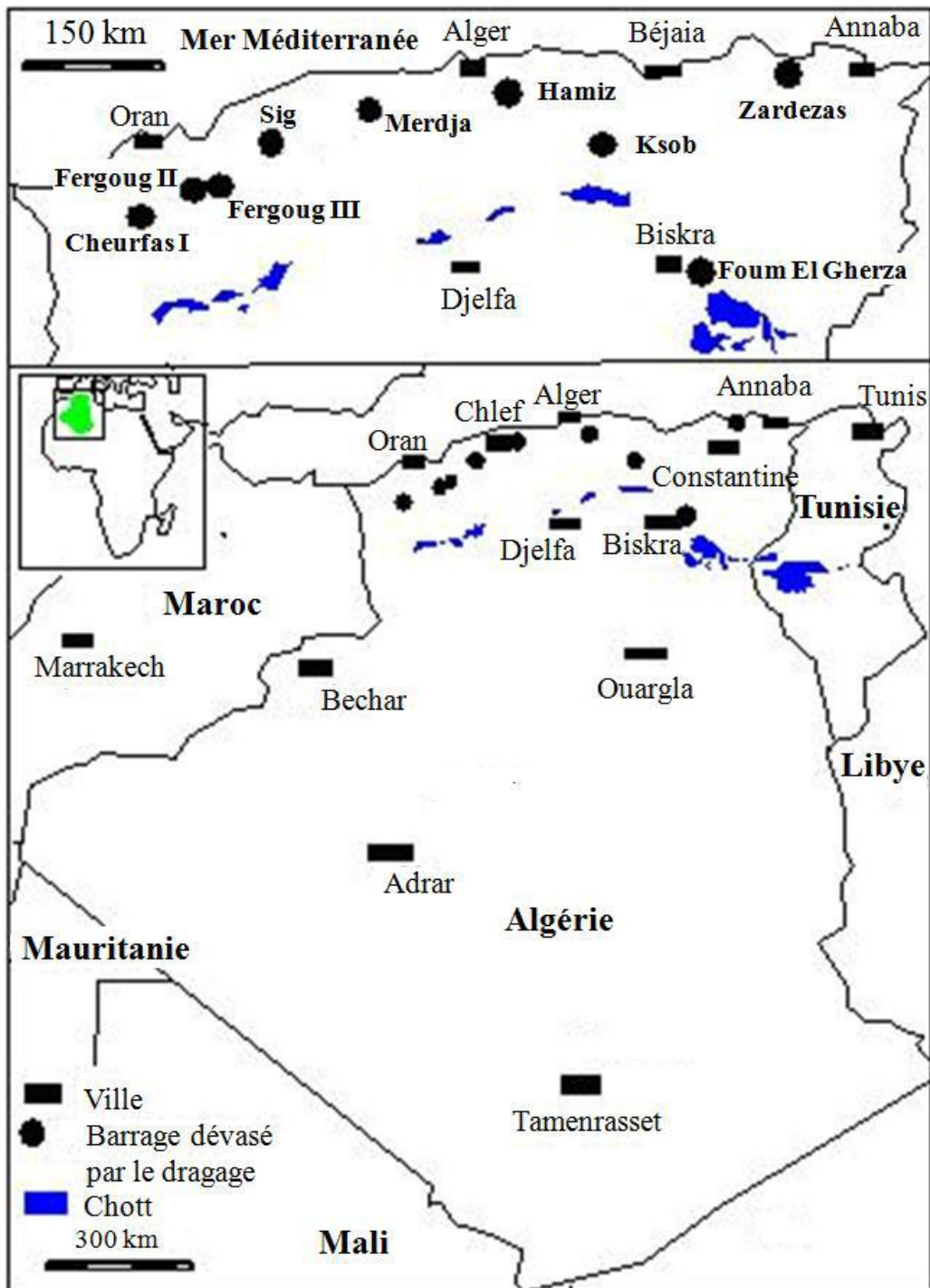


Figure I.16. Situation des barrages dévasés par le dragage [Remini et Hallouche, 2007]

La première drague refouleuse utilisée en Algérie est celle appelée " Lucien Dumay". Elle a été utilisée durant la période 1958-1969 pour le dragage des barrages de Cheurfas (10 Mm<sup>3</sup> de vase), de Sig (2 Mm<sup>3</sup> de vase), de Fergoug II (3,1 Mm<sup>3</sup> de vase) et de Hamiz (8 Mm<sup>3</sup> de vase). La deuxième drague refouleuse, baptisée " Rezoug Youcef", a été acquise en 1988 et utilisée durant la période 1989-1992 pour le dévasement du barrage

Fergoug III, d'un volume de 7 Mm<sup>3</sup> de vase. De 1993 à 2002, elle a servi pour extraire un volume de 10 Mm<sup>3</sup> de la retenue du barrage des Zardezas (Figure I.17). Actuellement, deux autres dragues ont participé au dévasement des barrages de Foum El Gherza (4 Mm<sup>3</sup> pour la première tranche) (Figure I.18), Merdja sidi Abed (5 Mm<sup>3</sup>), Ksob (4 Mm<sup>3</sup>) et Fergoug III (7 Mm<sup>3</sup>) (Figure I.19). La Figure I.20 présente l'évolution dans le temps des capacités récupérées par le dragage des barrages. Le volume cumulé dévasé depuis 1958 (date du premier dévasement) jusqu'en 2007 avoisine 60 Mm<sup>3</sup> de vase. Le désenvasement s'est seulement accéléré depuis 2001, année de forte sécheresse qui a frappé l'Algérie [Remini et Hallouche, 2007].

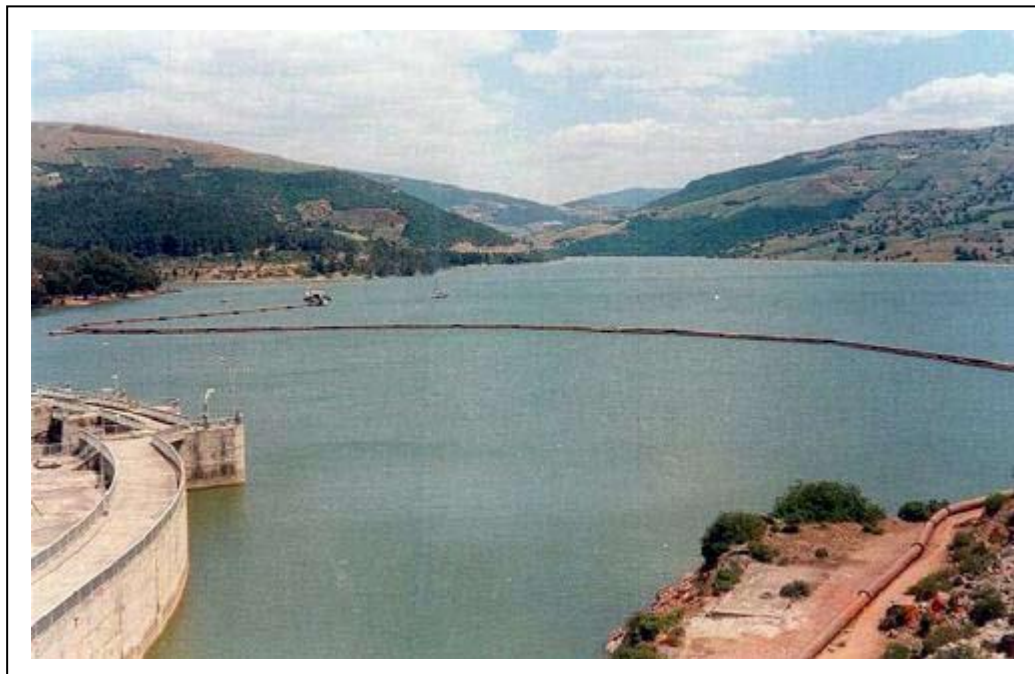


Figure I.17: Dragage de la retenue du barrage de Zardezas en 1993 (Cliché de l'Agence Nationale des Barrages, 2006)



Figure I.18 : Opération de dragage au niveau de la retenue de Fergoug en 2005 (Cliché de Benfetta – 2005)



Figure I.19 : Évacuation de 4 Mm<sup>3</sup> de vase de la retenue de Foum El Gherza pendant 18 mois (Cliché de l'Agence Nationale des Barrages de Biskra – 2006)

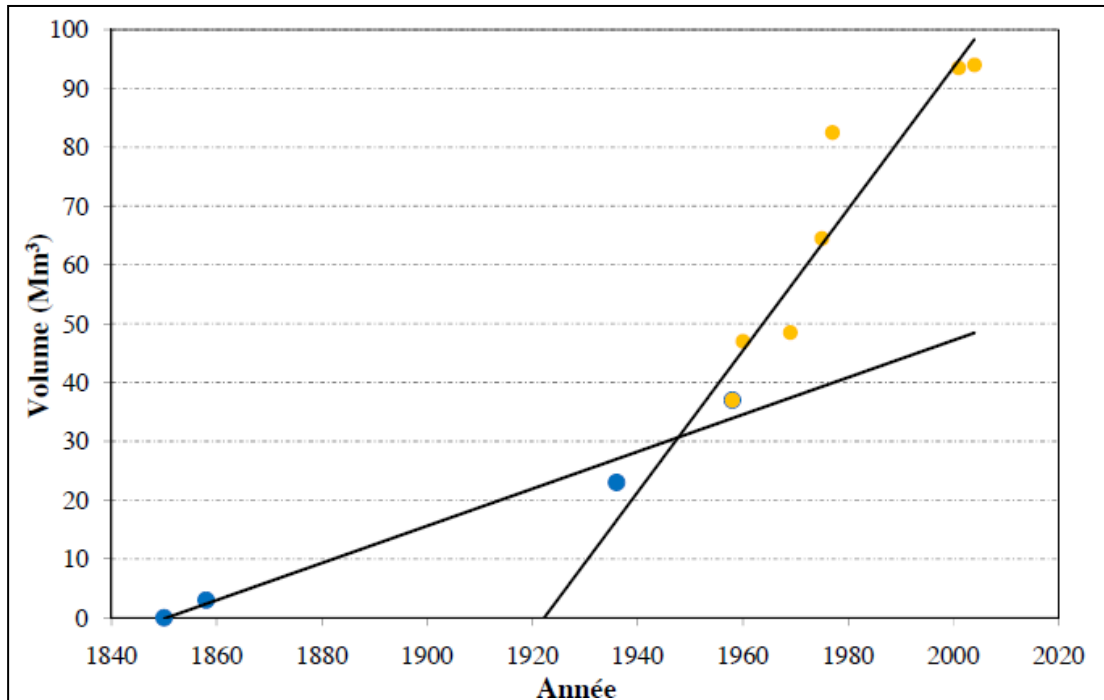


Figure I.20. Capacités récupérées par le dragage des barrages [données de l'Agence Nationale des Barrages]

### I.3.3.2. Le soutirage des courants de densité et les chasses périodiques

Il est possible de réduire le taux d'envasement par l'évacuation des sédiments par les pertuis de vidange. Seulement, pour avoir de très bons résultats, il faut maîtriser les mécanismes de la sédimentation dans les barrages. Il y a trois méthodes : la vidange annuelle du barrage plus connue sous le nom de "chasse à l'espagnole", l'ouverture périodique des vannes de fond, et le soutirage des courants de densité. La première technique n'est pas une solution efficace dans une région aride ou semi aride, puisqu'elle consiste à vider le barrage au début de l'automne (en laissant les vannes ouvertes) et attendre les premières crues qui enlèvent, sans difficulté, les vases non encore consolidées.

La deuxième technique, correspondant à l'ouverture périodique des vannes de fond, n'est pas efficace, mais elle est indispensable pour enlever les dépôts vaseux près des pertuis de vidange. Elle est pratiquée uniquement dans le barrage de Beni Amrane.

Enfin, le soutirage des courants de densité par les vannettes de dévasement reste le moyen le plus efficace dans une telle région, à condition que les courants de densité soient bien maîtrisés. Elle est actuellement appliquée dans les barrages d'Ighil Emda, de l'oued El Fodda et d'Erraguène (Figure I.21).

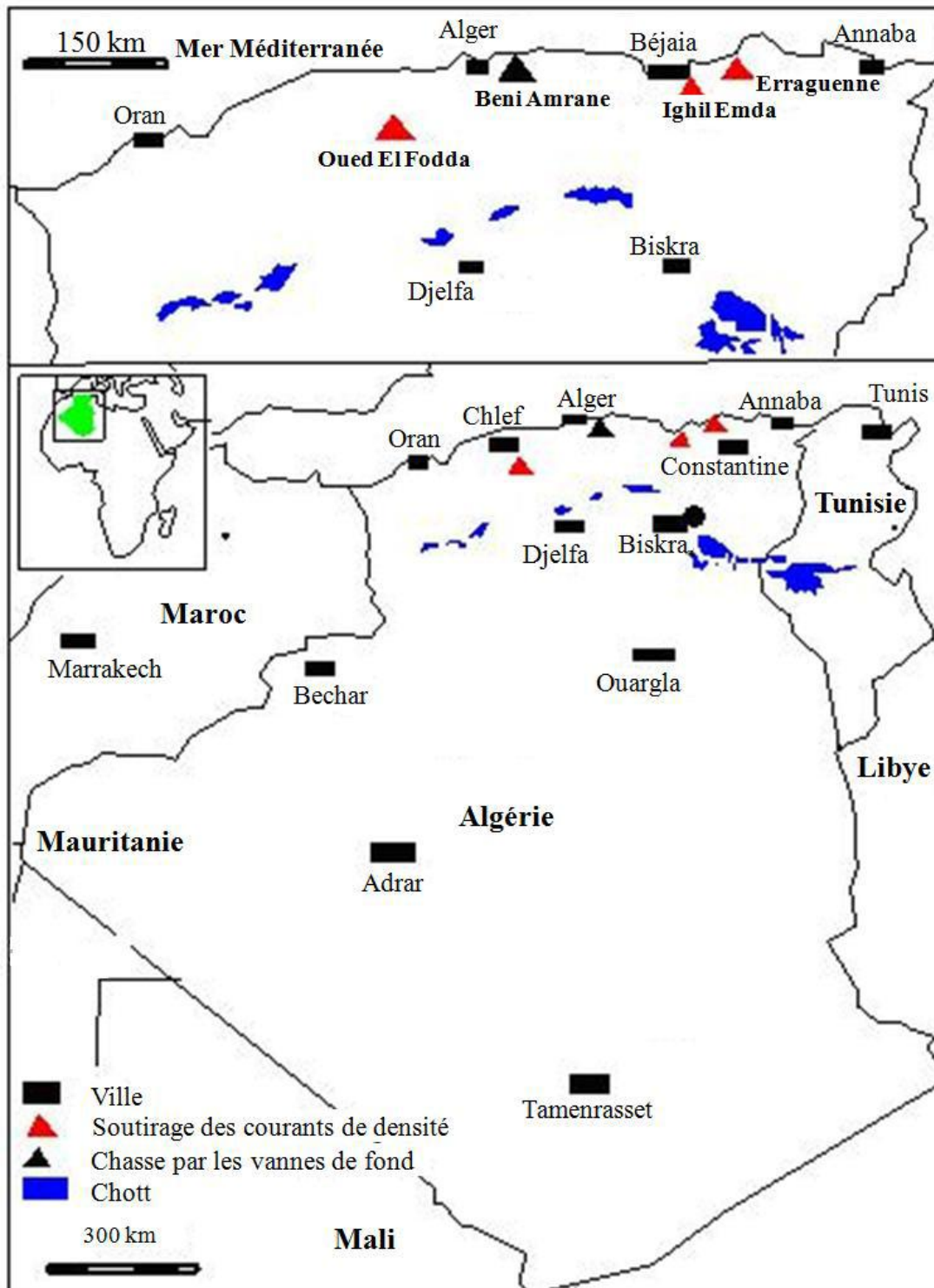


Figure I.21. Situation des barrages dans lesquels est pratiquée les chasses ou le soutirage des courants de densité [Remini et Hallouche, 2007].

**a. Les chasses a l'espagnole : cas du barrage de Beni Amrane**

La technique de "chasse a l'espagnole " est appliquée au barrage de Beni Amrane. Ce dernier d'une capacité de 15,6 Mm<sup>3</sup> a été dote de six vannes de fond (Figure I.22).

Environ 3 Mm<sup>3</sup> de vase ont été évacués durant la période 1988-2000 (Figure I.24), avec un rendement de 26% du total des sédiments entrants.



Figure I.22 : Six vannes de fond du barrage de Beni Amrane (Cliché de Remini – 2000)

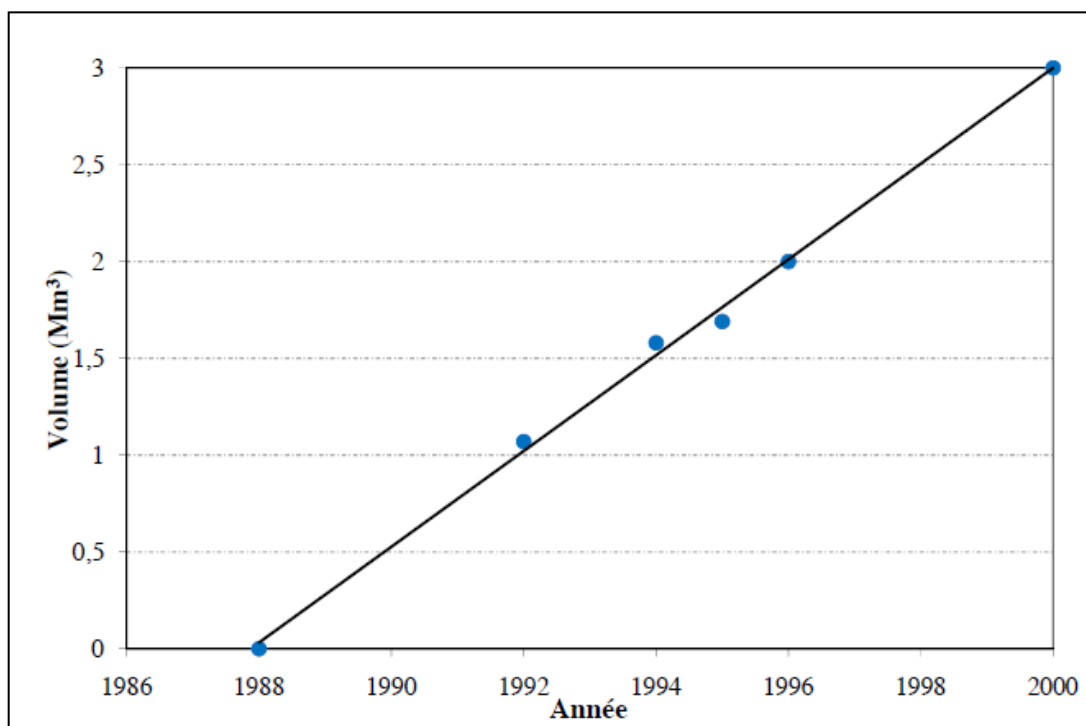


Figure I.23 : Barrage de Beni Amrane – Évolution de la quantité de vase chassée par les vannes de fond durant la période 1988-2000 (données de L'Agence Nationale des Barrages)

## **b. Soutirage des courants de densité**

La majorité des retenues en Algérie présentent les conditions favorables à l'apparition des courants de densité. En effet, la forte concentration en sédiments dans les cours d'eau, surtout en période de crues, et la forme géométrique (de type canal) donnent naissance aux courants de densité à l'entrée de la retenue et peuvent se propager jusqu'au pied du barrage [Remini et Hallouche, 2004]. L'ouverture des vannettes dans le moment opportun peut évacuer une forte quantité de sédiments.

Les premières tentatives d'évacuation des sédiments par la vanne de fond en utilisant les courants d'eau boueuse ont été effectuées, sans succès, dans le barrage de l'oued El Fodda en 1937 et en 1939, puisqu'en 1948 les vannes de fond ont été complètement obturées [Remini, 2007].

Pour tenter de résoudre le problème de l'obturation de la vanne de fond en 1948 (et qui se trouve actuellement sous 45 m de vase), cinq vannettes de dévasement ont été installées dans ce barrage en 1961 (Figure I.24). La retenue avait initialement une capacité de 228 Mm<sup>3</sup> en 1932, qui a été ramenée progressivement à 127 Mm<sup>3</sup> en 1994, mais en l'absence de soutirage cette capacité aurait été inférieure et réduite à 82 Mm<sup>3</sup>. Ainsi, une quantité de vase évaluée à 45 Mm<sup>3</sup> a été évacuée durant la période 1961-1994 [Remini, 2007].



Figure I.24 : Vannettes de dévasement du barrage de l'oued El Fodda (Cliché de Remini – 2006)

Le barrage d'Ighil Emda a été mis en service à partir de septembre 1953. Il est probablement parmi les premiers dans le monde à être équipé d'un dispositif approprié au soutirage, constitué de huit vannettes de faible diamètre et de trois vannes de dégrèvement [Duquennois, 1954 et 1955]. La retenue avait initialement une capacité de 156 Mm<sup>3</sup> en 1953, qui a été ramenée progressivement à 96 Mm<sup>3</sup> en 2000, mais en l'absence de soutirage cette capacité aurait été bien inférieure, soit 49 Mm<sup>3</sup>. Ainsi, une quantité importante évaluée à 47 Mm<sup>3</sup> a été évacuée en 44 ans d'exploitation.

Le barrage d'Erraguene a été équipé d'un système de soutirage composé de quatre vannettes de dévasement et de deux vannes de dégrèvement. Une quantité de vase évaluée à 9 Mm<sup>3</sup> a été évacuée en 30 années d'exploitation (1962-1992) [Remini, 1997].

La quantité de vase soutirée par les vannettes de dévasement en utilisant les courants de densité au niveau de ces trois barrages (Erraguene, oued El Fodda et Ighil Emda) a évolué, depuis 1953, pour atteindre un volume de 100 Mm<sup>3</sup> en 2000 (Figure I.25).

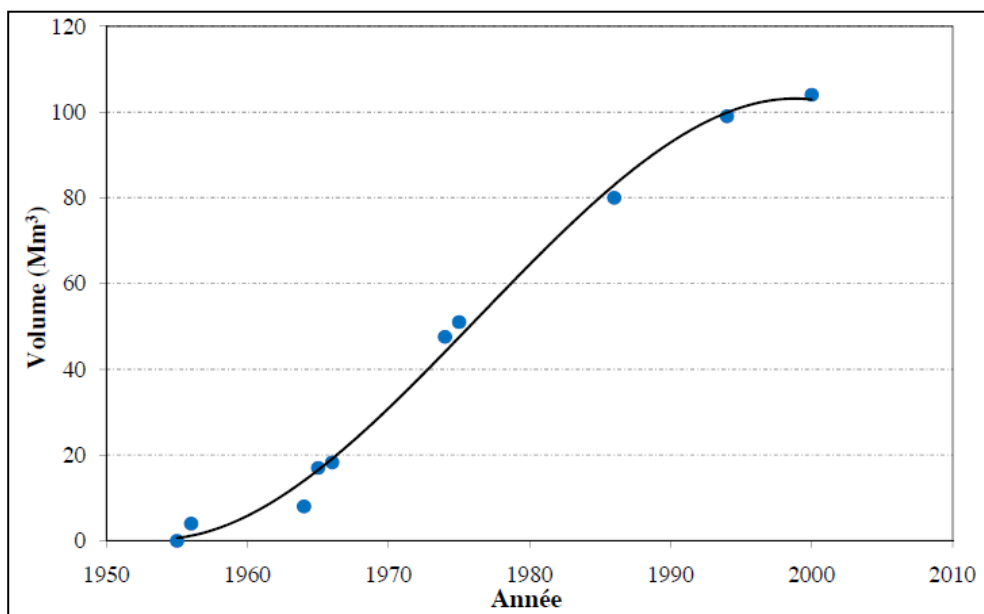


Figure I.25 : Évolution dans le temps de la quantité de vase soutirée par les vannettes de dévasement des barrages [Remini, 1997].

#### **I.4. Bilan**

Les matériaux dragués dès lors de leur extraction du site dragué, ils sont presque totalement en contact avec l'environnement, donc ce couplage doit être surveillé sévèrement et ne peut l'être que sur une telle maîtrise de stockage qui est un métier aussi bien noble que colossal. De plus on veut faire connaître à ce niveau que les matériaux dragués doivent recevoir une opération de décontamination quand ils sont contaminés et pouvant présenter un facteur prépondérant à la pollution de la nature ainsi que la nuisance à l'environnement de la faune et la flore, et la santé humaine. En substance, il s'agit des questions d'environnement, cette distinction fait appel à la sélection des différentes méthodes de traitement et de stockage appropriées par des études très diversifiées dépendant du site dragué, de la nature des matériaux, des contaminants et de l'environnement du lieu de stockage pour autant des essais de laboratoire in situ et ex situ sont exigibles pour pouvoir donner de plus amples détails et de précision qu'on désire avoir dans le but de bien citer et identifier le problème de stockage des matériaux du moment que la solution éventuelle qu'on tire, prévue convenable ne s'en écarte pas. En outre, les matériaux de dragage stockés tels qu'ils sont ou traités doivent s'intégrer à la nature et s'il y a lieu, on les valorise dans de différents domaines.

## **Chapitre II : Valorisation des sédiments**

### **II.1. Introduction**

Le traitement des vases est l'ensemble des processus utilisés pour améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques. Ce traitement peut se faire de deux façons différentes : soit par stabilisation de la vase en lui ajoutant d'autres produits qui améliorent certaines propriétés, soit par une dépollution. Dans tous les cas l'objectif du traitement est la valorisation de la vase.

### **II.2. Industrie du ciment et le BTP.**

La substitution d'une certaine quantité de vase calcinée (à caractère pouzzolanique), au ciment Portland dont l'hydratation libère de la chaux (sel de Candlot), permettrait d'obtenir des liants avec des caractéristiques similaires voire meilleures que celles du Portland seul (c'est-à-dire similaires à un CEM II) tout en économisant la même quantité de ciment. En effet la chaux libérée va être fixée par la pouzzolane ajoutée [Semcha, 2006].

A priori l'hydratation du CEM I libère de la chaux à raison de 20 à 25 % de son poids, la substitution de pouzzolane (vase calcinée), est envisagée dans les mêmes proportions.

La composition minéralogique de la vase de Fergoug permet d'envisager la transformation des structures argileuses stables en structures amorphes. Cette transformation lui assurant la réactivité pouzzolanique recherchée pour la substitution envisagée.

Sachant que les performances dues aux propriétés pouzzolaniques s'acquièrent progressivement dans le temps, des essais de rupture en compression simple, ont été effectués aux échéances suivantes : 7 jours, 15 jours, 28 jours, 60 jours, 90 jours et 120 jours [Semcha, 2006].

Les résultats obtenus sur le liant composé de 30% vase calcinée, jouant le rôle de pouzzolane artificielle, et de ciment Portland, sont intéressants. Ceci traduit que moyennant simplement un temps de conservation plus long, nous obtenons de meilleures performances que celles du ciment ordinairement utilisé, avec en plus une économie non négligeable : Substituer 30 % de constituant à moindre coût au ciment à une échelle industrielle constitue une économie certaine (figure II.1).

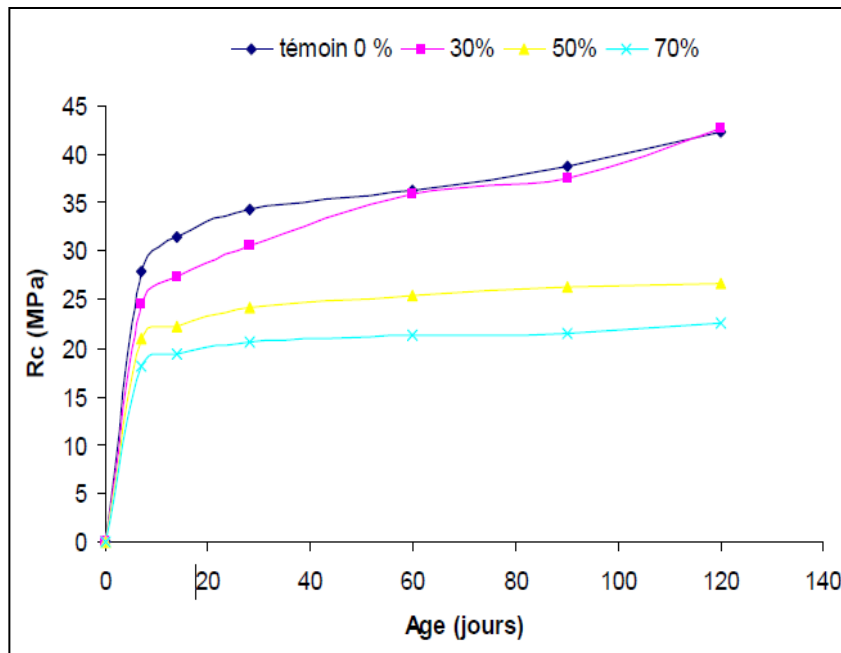


Figure II.1 : Résistances mécaniques des 4 mélanges étudiés [Semcha, 2006] .

Les cimenteries algériennes utilisent, pour la production d'un ciment composé de type CEM II de classe élevée, une pouzzolane naturelle. Celle-ci est extraite des carrières Fer-Phos dans la région de Béni-Saf (Nord-ouest Algérien).

D'après Semcha [2006], la comparaison des résultats obtenus (figure II.2) sur la pouzzolane artificielle à base de vase calcinée avec la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, a permis de retenir en conclusion les principaux éléments suivants :

- Ces deux matériaux peuvent trouver des applications aussi bien pour la production de ciment composé de type CEM II, que pour la fabrication de liants pouzzolaniques.
- Un meilleur comportement est observé pour la pouzzolane artificielle à base de vase de fergoug calcinée. Les résistances en compression des éprouvettes à base de vase calcinée ont dépassé celles obtenues avec la pouzzolane naturelle de Béni-saf; les deux procédés traduisent un véritable intérêt économique.
- La supériorité des résultats sur la vase calcinée s'explique par une meilleure protection de notre produit de synthèse par rapport au naturel. En effet, les conditions d'extraction à ciel ouvert du gisement de pouzzolane de Béni-Saf ne permettent pas une garantie suffisante vis-à-vis d'impuretés provenant du site même de l'exploitation [Semcha, 2006].

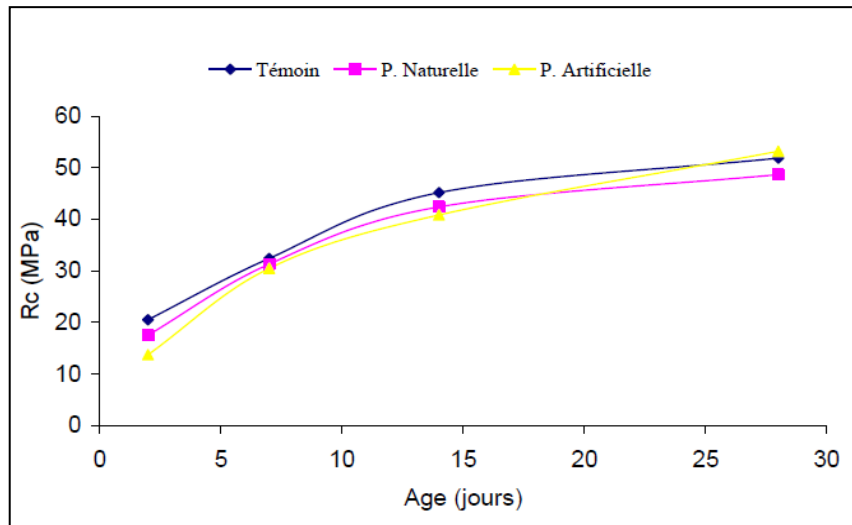


Figure II.2 : Résistance à la compression des mortiers [Semcha, 2006]

### II.3 .Valorisation dans la fabrication de la brique

Dans le domaine de la construction, l'Algérie connaît un déficit en matériaux qui s'élevait en 1990. L'exploitation de la vase pour la fabrication des matériaux de construction peut être donc s'avérer utile [Kenai et Remini, 1999].

En plus du Quartz, les vases sont composées du triédre argileux Smectite-Kaollinite-Illite. Cela permet de les classer comme étant des vases marines du climat tempéré ou bien comme des vases estuariennes des régions tempérées [Migniot, 1989]. La teneur en minéraux argileux (Kaolinite et Illite) est apte pour valoriser dans la fabrication de la brique (figure II.3).

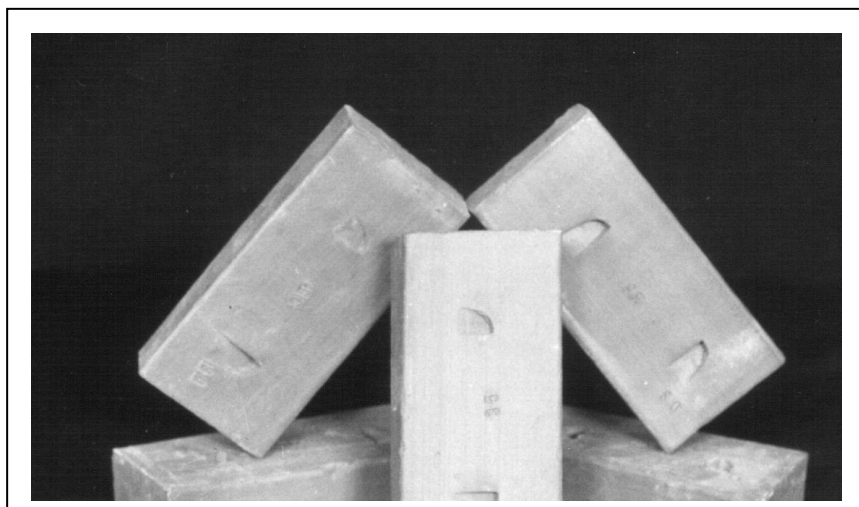


Figure II.3 : Briques à base de la vase du barrage de Oued Lelhel [Remini 2000]

Vase du barrage	Quartz (%)	Calcaire (%)	Dolomite (%)	Feldspate (%)	Minéraux Ferrigènes (%)	Kaolinite (%)	Illite (%)	Chronite (%)	Montmor—illonite (%)	Inter strates Ix (%)
Oued el Fodda	25	24	1.5	3	5.5	24.5	10	6	/	/
Ghrib	10	5	/	/	/	10	10	10	/	/
Boughezoul	8	18	1	/	/	20	30	5	/	/
Fergoug	/	12	/	/	/	/	/	/	/	/
Bouhanifia	4.2	/	2.9	3.2	/	7	10	14.3	/	/
Beni Amrane	30	3	5.5	3.5	4.5	16	11	1.5	/	/
Eghil Amda	15	28	tr	/	/	15	10	15	/	/
Hamiz	17	25	tr	/	/	30	25	20		/
Zerdezas	36	8	13	8	4.5	16	8	4	7	/
Foum el Gerza	7	13	26	/	/	13.5	6.7	3.35	23.5	20
Oued Lekhel	20	26	/	/	/	10	10	20	20	/

Tableau II 1. Résultats des analyses minéralogiques [Remini, 2006]

Comparativement aux résultats des analyses minéralogiques de l'argile jaune utilisée comme matière première pour la fabrication des produits rouges, il ressort que la composition minéralogique de ces vases ressemble bien à celle de l'argile jaune (tableau II.2).

Quartz (%)	Calcaire (%)	Dolomite (%)	Feldspate (%)	Minéraux Ferrigènes (%)	Kaolinite (%)	Illite (%)	Montmor—illonite (%)
42.5	21.5	/	3	4	14	10	/

Tableau II.2 : Composition minéralogique de l'argile jaune [Emile, 1978]

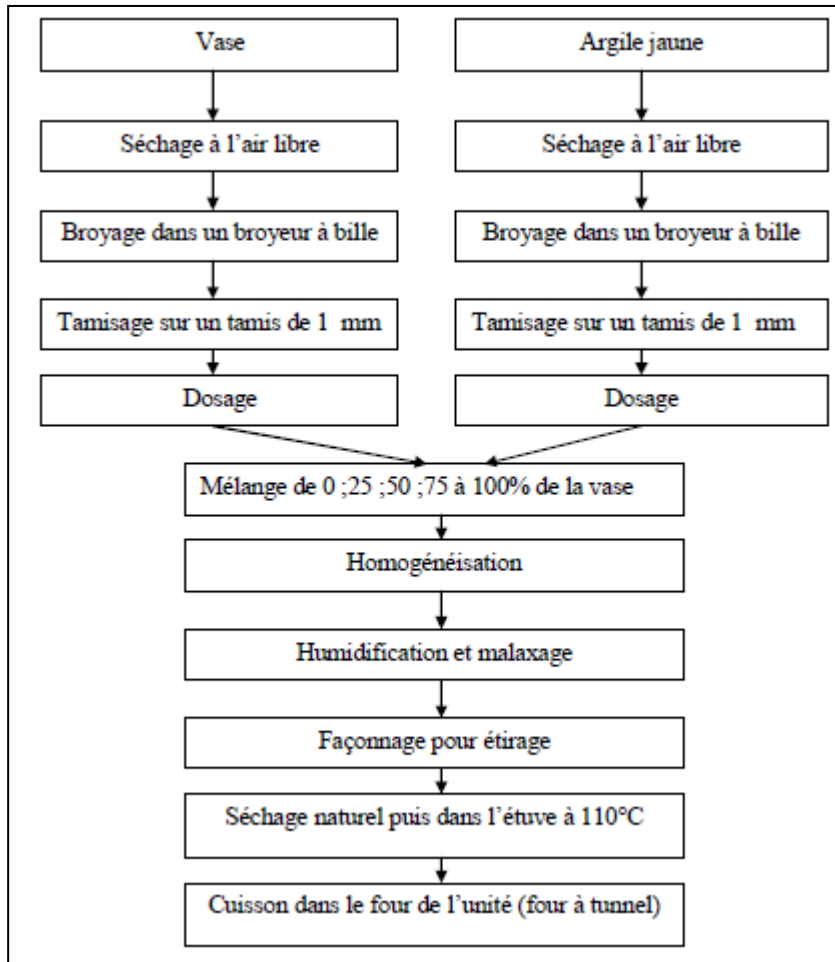


Figure II.4 : Organigramme général du processus de fabrication des briques [Remini, 2006]

Les oxydes formant chaque matière sont exprimés en pourcentage massique. Une analyse détaillée des résultats basée sur la comparaison des teneurs en différents oxydes montre que :

*i.* L'alumine ( $Al_2O_3$ ) est liée à la plasticité, et les teneurs en cet oxyde signalées dans nos échantillons de vase sont comprises entre les limites admissibles (tableau II.3). Ces vases sont utiles pour la fabrication de la brique.

*ii.* Les teneurs en Silice ( $SiO_2$ ) dans les vases sont plus au moins classées dans les normes (tableau II.4). Cet oxyde est donc en teneur suffisante pour jouer le rôle d'un dégraisseur sans avoir besoin d'ajout d'éléments inertes tels que le sable.

*iii.* La teneur en oxyde de Fer ( $Fe_2O_3$ ) est supérieur à 5%, cela permet de les considérer comme étant des argiles à grande teneur en oxyde colorant. Par contre, l'argile jaune (3,8% en  $FeO_3$ ) est considérée comme une argile à teneur moyenne.

iv. La teneur en chaux (CaO) est relativement faible pour les vases des barrages Ghrib, Ighil Emda, Hamiz, Zardezas. Elle n'a pas un effet indésirable parce qu'une forte teneur augmente le retrait au cuisson ainsi que la porosité et diminue la solidité des produits des cuits.

v. Les teneurs reçues sont acceptables pour la Magnésie (MgO).

Les analyses chimiques montrent qu'une argile est composée de plusieurs oxydes minéraux (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O,...) de l'eau, des sels solubles et des matières organiques.

Vase du barrage	OXIDES (%)										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF	TiO <sub>2</sub>	MnO
O Fodda	44.5	13.6	5.5	14	1.75	0.5	1.3	0.8	16.5	26.2	/
Ghrib	29.6	13.7	5	2.1	1.6	/	1.1	0.3	/	/	/
Boughezoul	31	13	4.75	1.4	1.9	/	1.7	0.7	/	/	0.03
Fergoug	42	9	4	16	1.8	/	/	/	/	/	/
Bouhanifia	52	10.6	4.8	10.6	0.5	/	/	/	15.2	/	/
Beni Amrane	44.8	9.3	4.7	17.3	1.5	0.4	1	0.9	18.5	/	/
Eghil Amda	48.5	14	6	7	1.4	/	1.1	0.7	18.7	/	/
Hamiz	49.5	16.5	6	6.5	1.4	0.01	2.2	0.7	/	0.6	0.06
Zerdezas	59	10	5	8	14.6	/	1.8	0.5	/	0.7	/
F Gerza	33	14	6.5	7	2	/	1.5	0.3	1.8	/	/

Tableau II.3 : Résultats des analyses chimiques [Remini, 2006]

Les produits finis sont des briques pleines de petites dimensions.

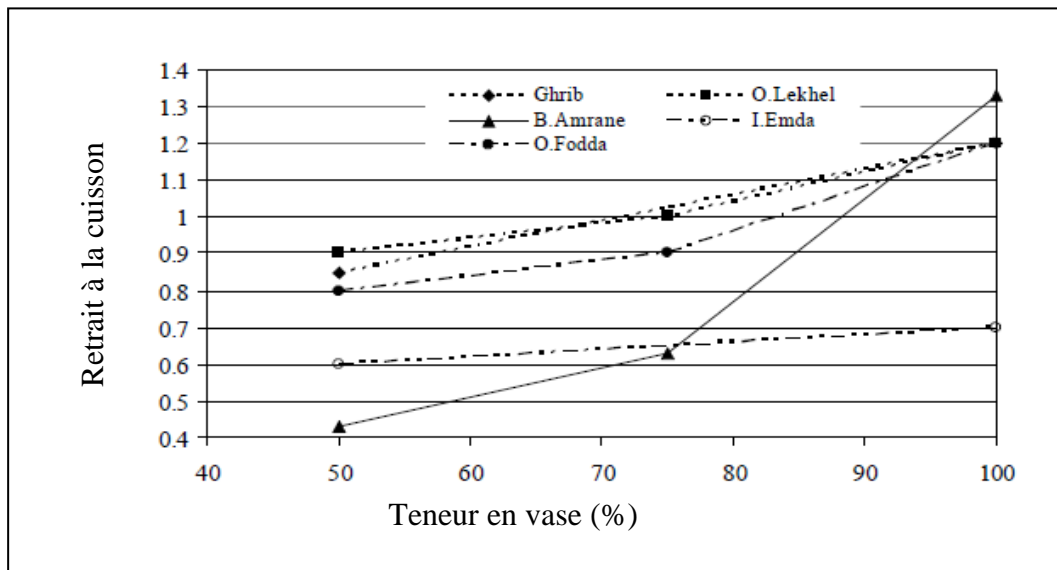
### ***II.3.1.Aspect général***

La couleur des briques obtenues varie comme suit :

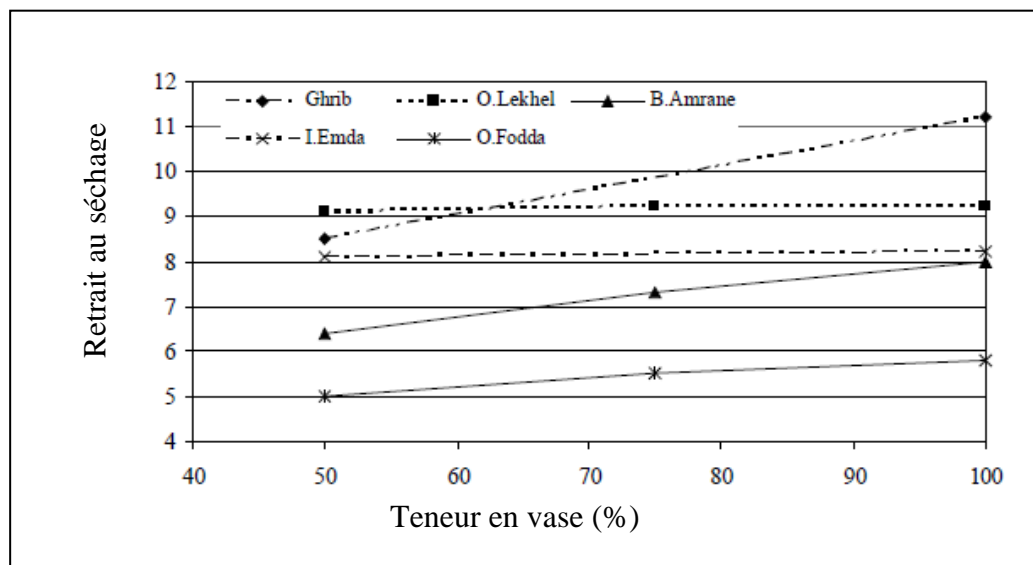
- i. Les briques fabriquées à partir de l'argile sont de couleur jaune.
- ii. Les briques fabriquées à partir d'un mélange d'argile et de vase sont d'une couleur dépendante de la mati.re majoritaire. La couleur rouge des briques à base de vase est due à l'oxyde de fer présent et à la teneur élevée dans chaque vase [Remini, 2006].

### II.3.2. Résultats des analyses dimensionnelles

Les résultats des analyses dimensionnelles obtenues sur cinq produits de différentes vases sont représentés sur les figures II.5.4.a et II.4.5.b.



II.5.4.a : Evolution du retrait à la cuisson en fonction de la teneur en vase [Remini, 2006]



II.5.4.b : Evolution du retrait au séchage en fonction de la teneur en vase [Remini, 2006]

Figure II.5 : Résultats des analyses dimensionnelles [Remini, 2006]

Le retrait est lié à la plasticité d'une manière générale. Plus la plasticité d'une argile est grande, plus le retrait sera important. Selon la figure 4 représentant la variation de retrait à la cuisson et de retrait au séchage en fonction de la teneur en vase. Nous constatons que

i. Plus la teneur en vase dans le mélange (argile jaune et vase) est élevée, plus les deux retraits sont élevés. Ce sens de variation de ces deux paramètres est dû à la plasticité de la vase qui est plus élevée que celle de l'argile jaune.

ii. Les deux retraits diminuent en fonction de la teneur croissante en vase. Cela est dû à la plasticité de la vase qui est faible par rapport à celle de l'argile jaune.

### II.3.3. Résultats des analyses physiques

La porosité apparente, la masse volumique absolue et la capacité d'absorption d'eau sont présentées sur la figure 4, tandis que le coefficient d'absorption d'eau est représenté sur les figures II.6.a, II.6.b et II.6.c.

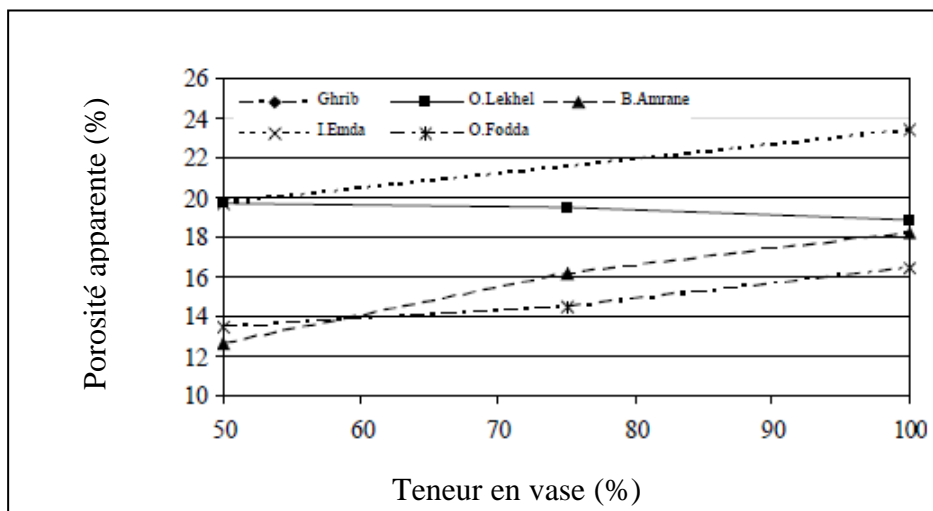


Figure II.6.a : Porosité apparente [Remini, 2006]

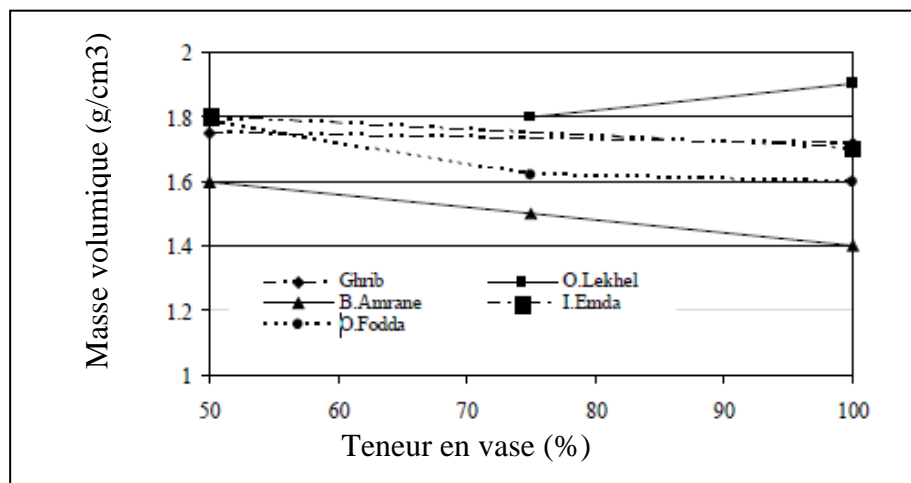


Figure II.6.b : Masse volumique (g/cm³) [Remini, 2006]

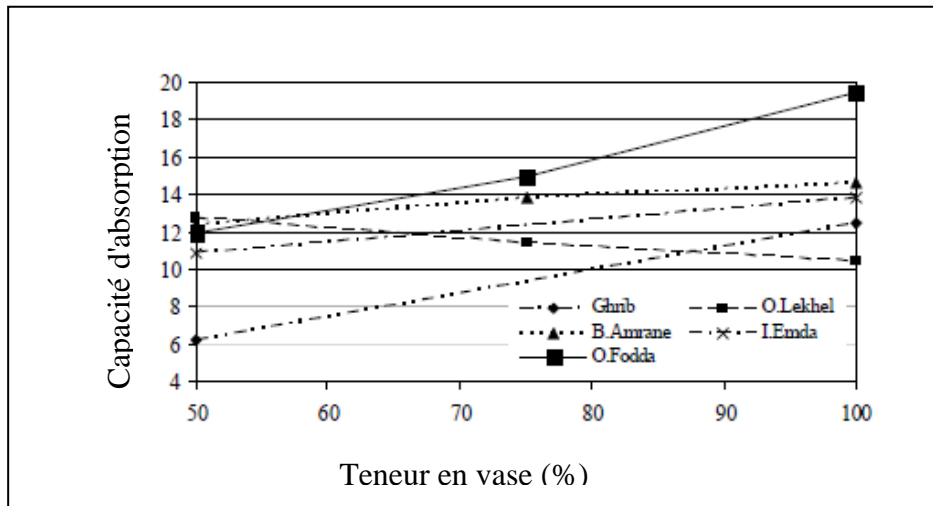
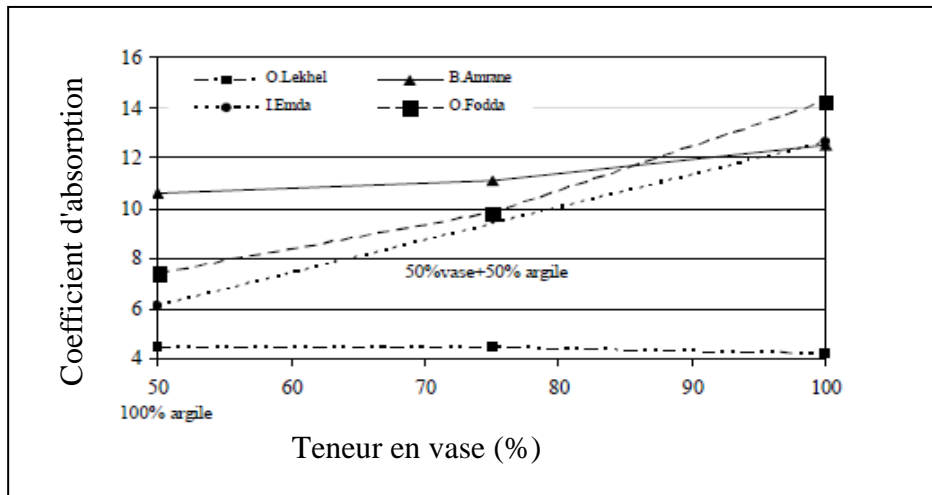


Figure II.6.c :Capacité d'adsorption (%) [Remini, 2006]

[Remini, 2006] Figure II.6 : Résultats des analyses physiques



[Remini, 2006] Figure II.7 : Coefficient d'absorption d'eau des produits finis

Plus la teneur en vase croit dans le mélange de base (argile jaune-vase), plus la porosité apparente, la capacité d'absorption d'eau et le coefficient d'absorption d'eau augmentent. Ceci est dû au fait que la granulométrie des vases est très fine. D'une manière générale, les résultats des essais physiques sont conformes aux normes en vigueur [AFNOR, 1983] (figure II.7) :

- i. 15% au maximum concernant le coefficient d'absorption
- ii. 10%. 15% pour la porosité apparente
- iii. plus de 1,4 g/cm<sup>3</sup> pour la masse volumique
- iv. pas moins de 8% pour la capacité d'absorption d'eau

### II.3.4. Résultats des essais mécaniques

Les résultats des essais d'écrasement effectués sur les échantillons de vase de 05 barrages sont représentés sur la figure II.8.

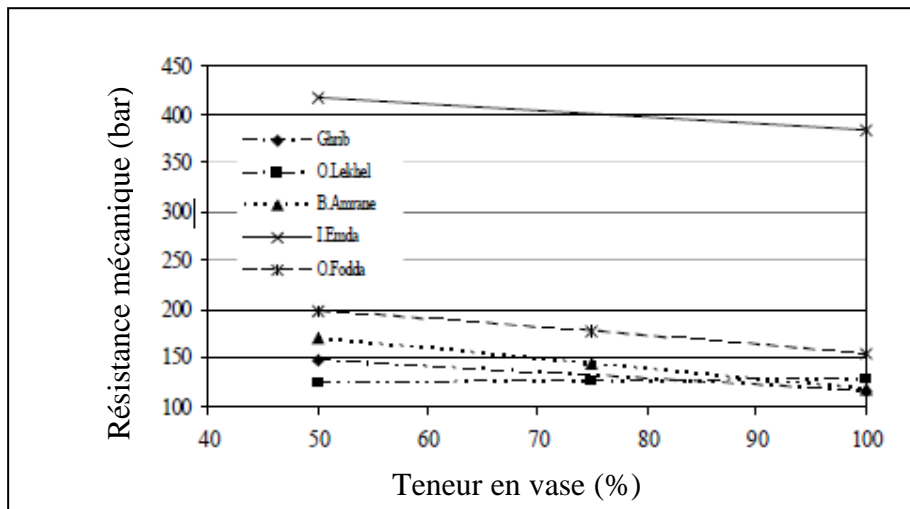


Figure II.8 : Résultats des essais mécaniques [Remini, 2006]

La résistance à la compression a le même sens de variation que la masse volumique absolue. Elle augmente dans tous les cas. Les valeurs obtenues de la résistance. Les résultats des essais d'écrasement sont acceptables car elles sont supérieures à la limite tolérée par les normes en vigueur qui est de 100 bars [Remini, 2006].

### .Valorisation en technique routière4II.

Selon Tran [2009] la possibilité d'utiliser des sédiments fins en couche de fondation et en couche de base d'une chaussée a été étudiée. De par la sensibilité à l'eau et la faible valeur de l'indice portant immédiat des sédiments bruts, des correcteurs granulaires (les sables de dragage et sables du Boulonnais) en combinaison avec un traitement par le ciment et/ou la chaux ont été proposés comme solution pour améliorer ces performances (figure II.9).

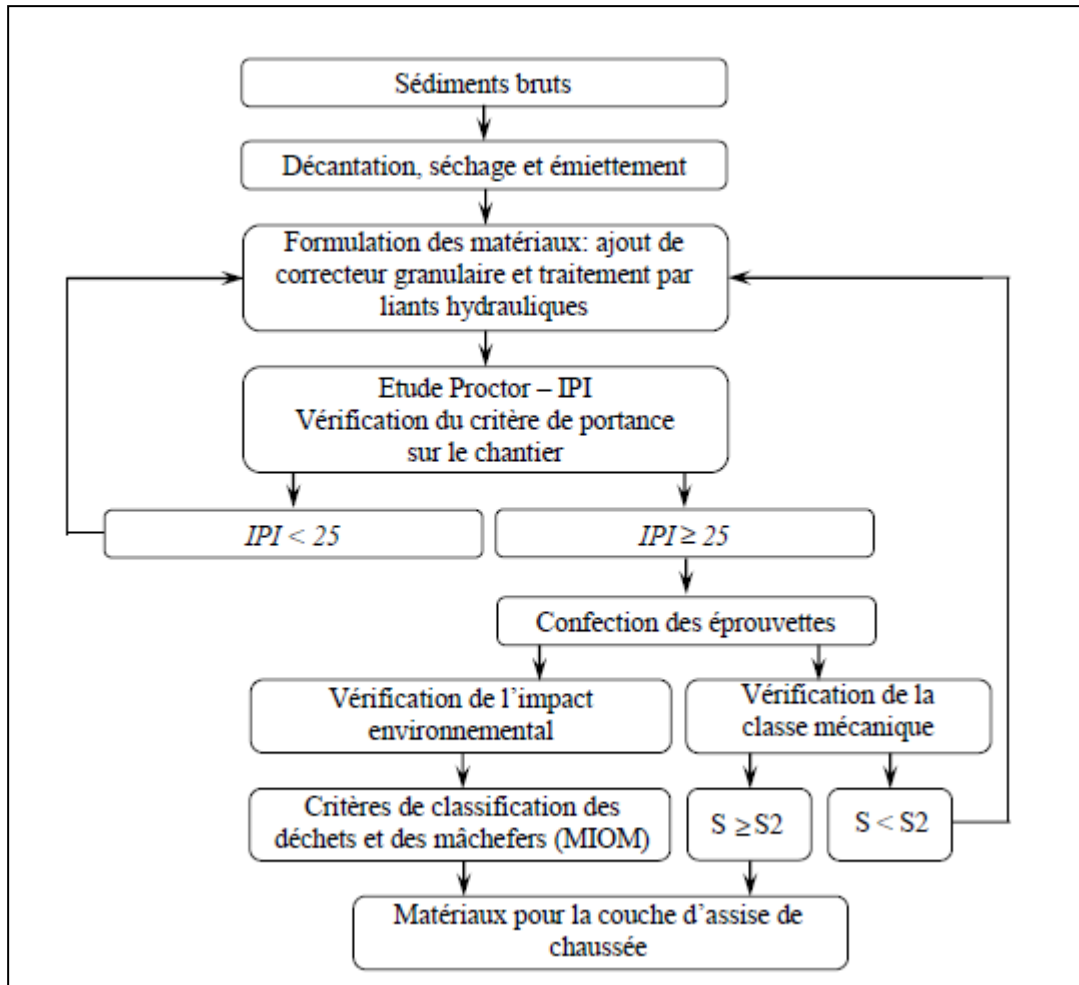


Figure II.9: Organigramme des étapes de valorisation des sédiments [Tran, 2009]

La performance mécanique évaluée à travers l'indice portant immédiat (IPI), la résistance en traction et le module d'élasticité indiquent que les composants ajoutés permettent d'augmenter significativement les caractéristiques mécaniques de sédiments fins.

Les formulations proposées peuvent être utilisées en couche d'assise de chaussée (couche de fondation et couche de base) (figure II.9).

Les études de sensibilité des formulations à des variations de la teneur en eau, du dosage en liant et de densité ont été effectuées à différentes périodes de cure (28 jours, 90 jours et 360 jours). Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques mesurées (résistance en traction et module d'élasticité) varient en fonction des paramètres étudiés. En terme de classification, pour les mesures à 28 jours et à 90 jours, les formulations proposées appartiennent toujours à la classe S2. Pour les mesures réalisées à 360 jours sur les mélanges à base de sédiments marins, les matériaux développés se classent en S3 au minimum. Les formulations peuvent donc être considérées comme aptes pour le secteur de valorisation visé.

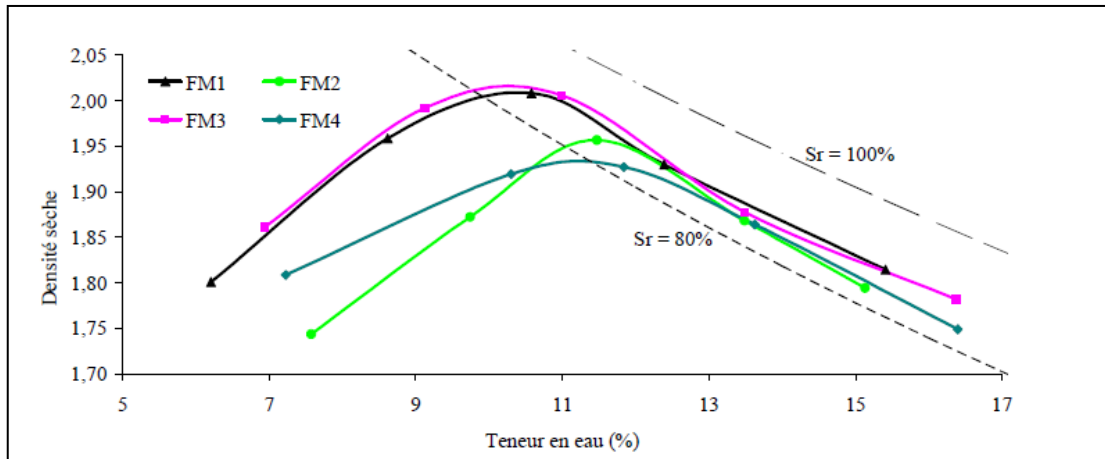


Figure II.10 : Evolution de la densité sèche en fonction de la teneur en eau pour les formulations issues de sédiments marins [Tran, 2009].

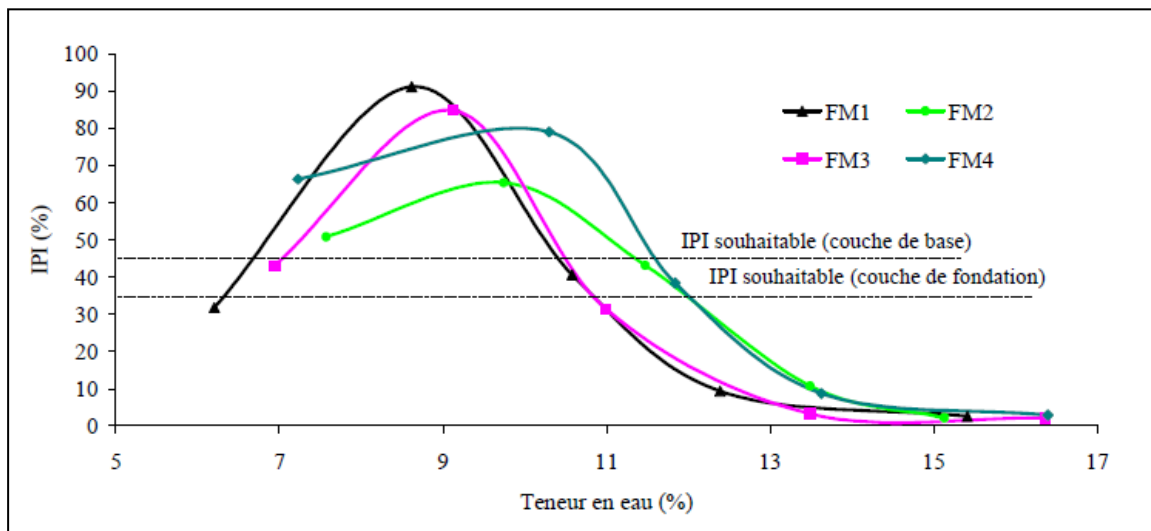


Figure II.11 : Evolution de l'indice portant immédiat en fonction de la teneur en eau pour les formulations issues de sédiments marins [Tran, 2009].

D'après les figures II.10 et II.11 on remarque que les formulations à base de sédiments marins présentent des IPI souhaitables pour une utilisation en couche de base (IPI souhaitable = 45%).

A travers cette étude, la vérification de la pertinence des coefficients empiriques utilisés pour passer des valeurs mesurées à 28 jours ou à 90 jours à celles utilisées pour la classification des matériaux, soit à 360 jours, a été également entreprise. On trouve que la plupart de ces coefficients sont inférieurs aux valeurs préconisées dans la norme française pour les matériaux standards.

L'impact environnemental des mélanges est vérifié à travers l'essai de lixiviation. Les résultats obtenus permettent de constater :

- La concentration en cations métalliques, en chlorures et sulfates ainsi que la teneur en polluants organiques dans les formulations de sédiments fluviaux permettent de les assimiler à la classe des déchets inertes. Leur utilisation dans le domaine routier est possible.
- Les résultats obtenus sur les éprouvettes broyées de sédiments marins indiquent également une teneur importante en cuivre, molybdène et chlorures. Selon la concentration de ces éléments, les mélanges dépassent le niveau des déchets inertes pour entrer dans la catégorie des déchets non dangereux. Selon la circulaire française relative à la valorisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, ces mélanges peuvent être utilisés dans le domaine routier [Tran, 2009].

## **II.5. L'argile et la calcination**

Du latin « argilla », l'argile se définit comme une terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines ( $<2\mu\text{m}$ ), constituées essentiellement de minéraux à structure en feuillets et présentant une plasticité à l'état humide.

Curieusement, les argiles sont les roches qui ont résistées le plus longtemps à l'analyse et à la compréhension des hommes. Ce ne sont que les outils modernes de la minéralogie qui ont permis de pénétrer les secrets de ces matériaux utilisés empiriquement depuis des millénaires. Les roches argileuses sont donc formées de mélanges de minéraux argileux auxquels viennent s'associer des minéraux allogènes : quartz, feldspaths, micas, minéraux lourds et parfois des minéraux authigènes : anatase, sulfates, etc

### **II.5.1. Les minéraux argileux :**

Pour en connaître la nature, la structure et la classification, il a fallu attendre le 20<sup>ème</sup> siècle. Ce furent la diffraction des rayons X, l'analyse thermique différentielle, la microscopie et la microdiffraction électronique, la spectroscopie infrarouge, qui ont contribué à cet essor. A cela s'ajoutent les diverses méthodes d'analyses chimiques qui peuvent s'effectuer sur des minéraux purs.

Les minéraux argileux sont en général en forme de feuilles, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas, au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal ou phyllite, dont l'épaisseur se mesure en micromètres, est composé de quelques centaines de feuillets empilés, qui se mesurent en nanomètres. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre

couches planes associées. De ses variations viennent les différentes espèces de minéraux argileux, parmi elles :

#### **II.5.1.1. Les illites :**

Ce minéral est le plus répandu des minéraux argileux dans les sédiments et les sols. Il est construit sur le modèle du mica blanc, mais avec une structure plus désordonnée et avec de potassium dans les espaces interfoliaires. Il est très fréquent dans une foule de roches détritiques comme matrice ou comme ciment. [Lucac et al, 1976]

#### **II.5.1.2. Les montmorillonites :**

Les montmorillonites peuvent être détritiques, par héritage des sols ou des sédiments plus anciens qui les contiennent. Elles peuvent être néoformées en milieu alcalin à partir des autres silicates ou à partir des verres volcaniques. Elles ont une foule d'applications économiques, dans les industries chimiques, les boues de forage, etc. [Lucac et al, 1976]

#### **II.5.1.3. La kaolinite :**

D'origine chinoise, « Kaoling », La kaolinite se forme comme produit résiduel météorologique ou comme minerai sédimentaire, dans les sols. Elle est formée dans les conditions de pression et de température de la surface de la terre (c.-à-d., 25–30°C et de pression atmosphérique).

Associe dans son feuillet, une couche de tétraèdres à coeur de silicium et une couche d'octaèdres à coeur d'aluminium. La distance de la surface d'un feuillet à l'autre est de 0,74 nm. Elle appartient au système triclinique [Soro, 2003].

#### **II.5.2. Les roches argileuses :**

Les argiles ou roches argileuses sont un mélange de minéraux argileux avec les divers autres minéraux présents dans la nature. On peut évoquer les argiles sableuses, les argiles calcaires ou marnes. Pour qu'une roche mérite le nom d'argile, il faut que la proportion de minéraux argileux soit assez grande pour communiquer au matériau ses propriétés communes principales : finesse, fragilité, plasticité, durcissement à la cuisson, etc.

La classification des roches argileuses est restée peu codifiée. Elle est souple et libérale.

La diversité du vocabulaire permet de cerner la réalité de très près [Millot, 2001].

### **II.5.3. Les argiles de la zone d'altération météorique :**

Les roches de toutes natures sont exposées à la surface de la terre, aux actions météorologiques comme la pluie, la neige, le froid, la chaleur et leurs alternances, l'humidité et la sécheresse, etc. Dans ses conditions les roches s'altèrent et sont très vite colonisées par les organismes vivants (végétations, occupation animale et bactérienne).

### **II.5.4. Les argiles de la zone de sédimentation :**

De la surface des continents, nous passons au fond des bassins sédimentaires : océans, mers intérieures et lacs. Là se déposent les sédiments : sables, argiles, calcaires, ou leur mélange,

auxquels s'ajoutent les débris ou reliques des organismes vivants. S'y mêlent, en maints endroits, les cendres et les tufs volcaniques.

Du côté des sédiments argileux vont à nouveau rivaliser les argiles venues du continent et c'est l'héritage, les argiles héritées mais modifiées par les transformations, et les argiles néoformées de toutes pièces.

### **II.5.5. Qu'est ce qu'une pouzzolane de synthèse :**

Les romains augmentaient la résistance de leur chaux en y ajoutant des fines prélevées sur les pentes du Vésuve (Vesuvius) non loin de Pouzzoles (Pozzuoli). De là découle par extension le terme de « Pouzzolane » donné à toute fine qui réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former un composé stable.

Les différentes définitions rencontrées présentent les produits à caractère pouzzolanique comme :

- Des composés minéraux pauvres en chaux, et une fois en présence de chaux et d'eau acquièrent des propriétés liantes.
- Les matériaux pouzzolaniques, sont des matériaux siliceux, n'ayant pas des propriétés liantes eux-mêmes, mais contenant un certain nombre de composants qui, à température ordinaire, peuvent se combiner avec la chaux en présence d'eau pour former des produits ayant une solubilité très faible et possédant des propriétés liantes.
- La réglementation ASTM 618-71 sur le ciment, indique qu'une pouzzolane est un matériau siliceux ou silico-alumineux, ne possédant pas ou peu de propriétés liantes en lui-même, mais qui, lorsqu'il est finement broyé et en présence d'eau, peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former un ciment.
- Les matériaux pouzzolaniques sont des matériaux siliceux, alumineux ou ferrugineux, n'ayant aucune propriété liante en eux-mêmes, mais qui, sous certains états de cristallinité et

de structure, peuvent réagir, en présence de chaux et d'eau à température et pression normales, pour donner un ciment.

La réaction peut s'écrire de façon très schématique comme suit :

(Silice, Alumine) + Chaux + Eau  $\rightarrow$  (Silicate Calcique Hydraté, Aluminate Calcique Hydraté)

Ces dernières définitions se limitent aux cendres volcaniques qui se forment naturellement ainsi aux argiles calcinées qui peuvent réagir avec la chaux, en présence d'eau et à température ambiante [Chahidi, 2005].

Récemment, ces termes ont été prolongés pour couvrir tous les matériaux silicoalumineux, qui en présence d'eau réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés « hydratés » possédant les propriétés des ciments [Sobolev et al, 2005].

### **II.5.6. La Calcination :**

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence.

Pour valoriser les argiles, comme substituant partiel du clinker, le traitement thermique appliqué doit assurer la déshydroxylation tout en

- Eliminant toutes les matières organiques incompatibles avec le ciment.
- Evitant la décarbonatation de la calcite néfaste pour la maniabilité des mortiers et bétons.

La calcination entre 550 et 800 °C des argiles permet le départ de l'eau de constitution (la déshydroxylation). La structure amorphe rend l'argile plus réactive que celle du départ à la chaux. Ce qui explique la forte diminution de la concentration en CaO de la solution. En présence de l'eau, la chaux réagit avec l'argile pour former des silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté qui dépendent de la minéralogie des pouzzolanes et la solubilité des phases cristallines et non- cristallines [Chinje, 2004].

#### **II.5.6.1. La calcination flash :**

La calcination flash, est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz. La représentation de l'évolution de la température en fonction du temps permet d'obtenir l'historique thermique des particules.

Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide

à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des transformations qui peuvent partiellement ne pas être terminées. Les changements sont cinétiquement bloqués et les produits incomplètement déshydroxylés si le temps d'exposition est trop court. Les propriétés des solides préparés sous ces procédés de chauffage flash, sont différentes de celles des matériaux traités dans des conditions de calcination où l'équilibre chimique et physique a pu être atteint [Bich, 2005].

#### II.5.6.2. La calcination lente :

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir mené lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 600°C et 1100°C) pendant

un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures), comme le montre la figure II.12 [Bich, 2005].

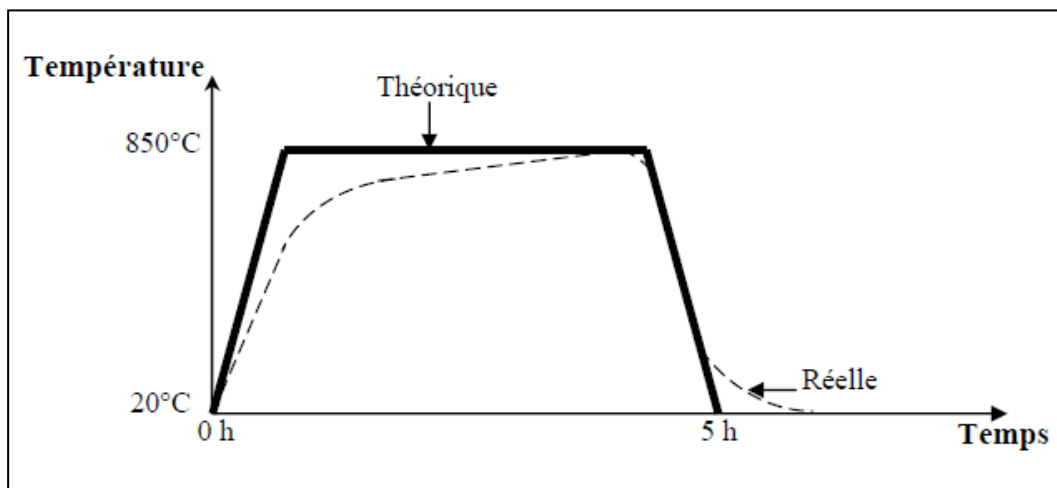


Figure II 12 : Température du four en fonction du temps [Bich, 2005].

#### II.5.7. Transformation des argiles pendant un traitement thermique :

En 1887, Le Chatelier, attira l'attention sur l'intérêt de l'analyse thermique lors de ses recherches sur les argiles, et montrera que l'on pouvait baser une classification de ces minéraux sur les anomalies thermiques qu'ils présentaient en cours d'échauffement. C'est ainsi que dans le cas du Kaolin, Le Chatelier mit le premier en évidence l'existence d'un phénomène exothermique à une température voisine de 1000°C.

L'analyse thermique et la calorimétrie regroupent différentes techniques qui sont généralement :

- L'analyse thermique différentielle (ATD) ; différence de la température.
- La calorimétrie à balayage différentielle (DSC) ; différence de la chaleur.

- La thermogravimétrie (ATG) ; différence de la masse.
- La dilatométrie, en particulier l'analyse thermomécanique (TMA) ; différence de la dimension.

Et en peut citer encore :

- Analyse Mécanique Dynamique (DMA) ; rigidité et atténuation mécaniques.
- Courant Thermiquement Stimulé ; alignement et relaxation de dipôle.
- Analyse Diélectrique (DEA) ; constante diélectrique et facteur de perte.
- Analyse Évoluée De Gaz (EGA) ; produits gazeux de décomposition.
- Analyse Thermo-optique (TOA) ; propriétés optiques.

Actuellement ces procédés sont très employer, car ils sont applicables à des argiles mal cristallisées qui sont difficilement étudiables aux rayons X [Berthios, 1974].

L'analyse thermique différentielle a été imaginée par Roberts-Austen en 1899. Le principe est le suivant : deux creusets sont positionnés dans un four de façon à être soumis au même programme de température. L'un contient l'échantillon à tester, et l'autre un matériau de référence n'ayant aucune transition sur la plage d'essai (figure 7). L'appareil mesure à chaque instant du programme la différence ( $\Delta T$ ) [Bourgeois, 2001] .

L'analyse thermique différentielle est basée sur les réactions thermiques qui se produisent lorsqu'un minéral est chauffé. Les variations de températures sont reportées en fonction du temps et de la température. La courbe enregistre l'absorption de chaleur (réactions endothermiques généralement), et aussi les recristallisations et les recombinaisons ou encore le dégagement de chaleur (réactions exothermiques) (figure II.13) [Parlour et al, 2005].

Le dispositif d'appareillage peut être extrêmement varié, mais le principe est toujours identique ; il s'agit d'élever la température du produit à analyser et d'une substance témoin. Le chauffage doit être réalisé rapidement, c'est-à-dire que la température doit s'élever de 400 à 600°C par heure aussi régulièrement que possible. Les analyses sont réalisées sous balayage d'un gaz inerte (l'argon) pour éviter toute réaction du matériau à étudier avec l'atmosphère du four.

L'oxyde d'aluminium ou saphir et le matériau de référence le plus connu pour la détermination de la chaleur spécifique, il est certifié sur la gamme de température 10 à 2250 K.

Parmi d'autres métaux, des travaux ont été réalisés sur le platine ( 298,15 à 1500 K), le cuivre (1 à 300 K), le molybdène (jusqu'à 2800 K), et même le tungstène.

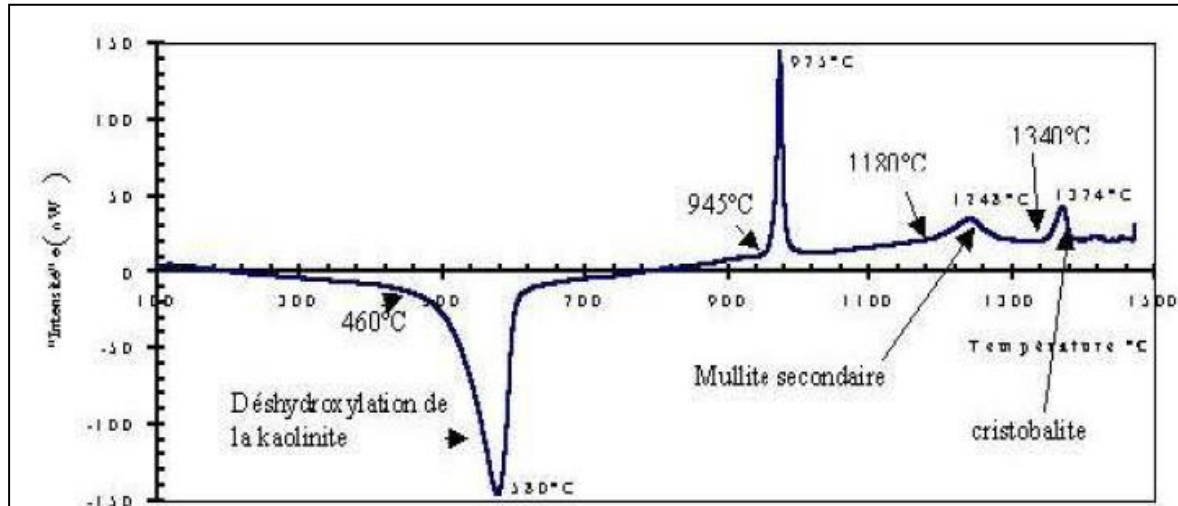


Figure II.13 : Exemple d'analyse thermique différentielle d'un kaolin [Soro, 2003] .

L'ATD identifie les régions de la température et l'importance des événements critiques pendant un séchage, mais en plus l'oxydation de carbone ou de soufre, l'effondrement structural d'argile, l'alpha et la bêta transition de quartz, les décompositions de carbonate, les recristallisations, les transitions de cristobalite, la température de solidification ou de solidus, la température de transition de verre (Tg), l'énergie de la réaction, capacité de chaleur, et d'autres.

La courbe ATD met en évidence 3 phénomènes :

### II.5.7.1. La déshydratation (pic endothermique de faible amplitude vers 100°C)

Cette étape ne constitue pas une transformation majeure. Il s'agit d'eau physiosorbée dont le départ ne modifie pas la structure cristalline de l'argile. Le transport de la vapeur est un phénomène qui se produit lors de tout procédé de séchage. Le mouvement de la vapeur se fait soit par diffusion au sein du matériau même, soit par échange au niveau de la surface entre le matériau et son environnement. Si un produit peu humide de nature hygroscopique se trouve en contact avec de la vapeur d'eau, il fixe celle-ci jusqu'à atteindre un état d'équilibre ; ce phénomène est connu sous le nom d'adsorption. Le volume spécifique varie linéairement avec la teneur en eau jusqu'à une limite définie du type d'argile, au-dessous de cette valeur le volume spécifique reste constant, en plus le séchage évoque des fissurations produisant un retrait maximal en surface alors que le cœur du produit, encore humide, garde ses dimensions [Mihoubi, 2004] .

### **II.5.7.2. La déshydroxylation :** (pic endothermique de grande amplitude vers 500°C)

Il s'agit de la réaction au cours de laquelle les hydroxyles structuraux sont éliminés, il se forme d'autres phases.

Lorsque l'argile est calcinée, elle se transforme. Les hydroxyles du réseau se réorganisent et peuvent favorablement modifier les propriétés de l'élasticité, l'opacité et le caractère diélectrique, même la couleur peut changer ce qui est dû aux minérales et impuretés inorganiques et aux changements de l'état d'oxydation des éléments lourds, comme le fer, ou à la perte d'une partie du fer structural.

H.W.Taylor et ses collègues ont constaté que dans certains minéraux argileux la migration des protons d'un oxygène à l'autre dérange la neutralité électrique. Pour compenser cette perte de charge positive, une contre-migration aura lieu vers cette région. Pendant la déshydroxylation aucun oxygène n'est perdu, ce mécanisme est dit « non homogène » [Nakahira, 1963].

Dans d'autres cas le mécanisme est appelé « homogène », où la perte d'oxygènes comme molécules d'eau est d'avantage ou moins uniforme dans tout un cristal.

Dans l'espèce cristalline, comme la kaolinite et la montmorillonite, le taux de ce processus de délocalisation devient appréciable à 200-300°C. Dans la majeure partie du cristal, les constituants hydroxyles appartiennent aux cellules octaédriques puisque la force du lien électrostatique d'oxygène-cation est toujours partielle, alors que dans la couche tétraédrique, la force électrostatique du lien entre les oxygènes liant les coins adjacents de tétraédrique est égale à 1. Il suit que la délocalisation implique les cellules octaédriques seulement [Fripiat, 1963].

## **Chapitre III : Etat de connaissance sur les BAP**

### **III.1. Introduction**

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés au Japon à la fin des années 80. Leur origine semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus « performants » pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place du matériau [Okamura et Ouchi, 2003]. La mise en oeuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier.

La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces matériaux initialement appelés Bétons Hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons autocompactants, ou bétons autonivellants, selon les applications [Okamura et Ouchi, 2003]. Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable en Europe et aux Etats Unis et prendront dans les années à venir une place de plus en plus importante. Les domaines d'application des BAP sont nombreux, mais leur utilisation implique une évolution ou une adaptation des moyens et des techniques traditionnellement employés.

### **III.2. Définition**

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'Association Française de Génie-Civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stables » [AFGC, 2000].

La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité.

### **III.3. Mise en œuvre**

En terme de mise en œuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Un des avantages majeurs des BAP, est

la réduction de la durée de la phase de coulage : le vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arase supérieure est plus facile à réaliser. [Bethmont, 2005]

La méthode traditionnelle de remplissage par le haut du coffrage peut être utilisée avec une hauteur de chute plus importante. Il convient cependant de la limiter à 5m, pour éviter des problèmes de ségrégation dus à la chute du béton dans le coffrage [AFGC, 2002]. L'utilisation d'un tube plongeur peut être une alternative pour limiter la hauteur de chute du matériau. La fluidité des BAP permet par ailleurs l'injection du matériau en pied de coffrage, même pour des éléments verticaux.

D'après les recommandations de l'AFGC [2002], quel que soit le mode de remplissage retenu, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages. Une perte d'homogénéité peut en effet se manifester lorsque ce cheminement est trop important. Ainsi, la longueur de cheminement maximale préconisée est de 10 m. (Dans certains cas, elle peut être limitée à 5 m). Toujours d'après les recommandations provisoires de l'AFGC [2002], les données relatives à la poussée exercée par le béton frais sur le coffrage ne sont pas suffisantes pour fixer des règles précises sur ce point. Différentes études ont été menées depuis sur le sujet. Billberg [2003], déclare que lorsque les BAP ont été développés, il était généralement admis qu'ils génèreraient une pression hydrostatique. Or différentes études ont montré que la pression exercée par les BAP sur les coffrages était plus faible que celle attendue, et dépendait de la vitesse de remplissage du coffrage [Billberg, Lehmann et Hoffman, 2003]. Ceci proviendrait du caractère thixotrope du matériau, c'est à dire de sa capacité de structuration au repos [Ovarlez et Roussel, 2006]. La pression exercée par le BAP sur le coffrage dépendrait non seulement de la vitesse à laquelle il est mis en place mais également du mode de remplissage choisi. Lorsque le remplissage est effectué rapidement ou lorsqu'il est effectué en pied de coffrage, la pression latérale exercée sur le coffrage serait de l'ordre de la pression hydrostatique car le matériau n'a pas le temps de se structurer. En revanche, un remplissage plus lent et effectué par le haut du coffrage permet au matériau de se structurer [Ovarlez et Roussel, 2006].

Concernant la préparation des coffrages, notamment vis à vis de l'étanchéité et de l'absence de débris, les précautions à prendre sont similaires à celles pratiquées pour les bétons traditionnels [AFGC, 2002]. Les recommandations de la FFB [FFB, 2003] précisent cependant que l'étanchéité en pied de coffrage est essentielle et que la propreté des coffrages est à vérifier tout particulièrement. En effet, l'aspect de surface des BAP étant un de leurs principaux atouts, il convient d'apporter un soin particulier à la préparation des coffrages. Ce

temps de préparation supplémentaire n'est cependant pas pénalisant pour l'avancement du chantier et reste négligeable face au gain de temps apporté par la suppression de la phase de vibration.

L'absence de vibration simplifie par ailleurs le calage des armatures et des réservations. Comme pour les bétons traditionnels, il convient de vérifier les conditions atmosphériques avant coulage. En dehors de la gamme 5-25°C, des dispositions particulières sont à prendre [FFB, 2003] et [Projet National BAP, 2005].

Une attention particulière doit être portée à la cure des BAP, i.e. à la protection mise en œuvre pour éviter l'évaporation, et particulièrement dans le cas d'applications horizontales. Le faible ressuage des BAP les rend en effet plus sensibles au retrait plastique [AFGC, 2002] et [Turcry, 2004]. D'une manière générale, il est recommandé d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après mise en œuvre [AFGC, 2002].

D'après les recommandations de la FFB [2003], comme pour tous les bétons ayant reçu un produit de cure, le ponçage ou le grenailage est obligatoire avant la pose de tout revêtement solidaire au support. Cette préparation doit être réalisée le plus tard possible dans le cas des bétons autonivellants (applications horizontales), au minimum après 28 jours. La mise en œuvre d'un BAP est plus simple que celle d'un béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration. Certaines précautions supplémentaires sont à prendre, lors de la préparation des coffrages par exemple (propreté, étanchéité...), mais globalement les consignes restent similaires à celles définies pour les bétons traditionnels.

#### **III.4. Impacts socio-économiques**

Nous avons vu que la fluidité des BAP est telle qu'il n'est plus nécessaire de les vibrer pour les mettre en œuvre. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en place, puisque cela implique :

- une diminution du bruit sur site
- une diminution de la pénibilité des tâches
- une réduction des risques d'accident

En effet, le bruit engendré pendant la phase de vibration est particulièrement désagréable puisqu'il est d'une intensité élevée sur des périodes relativement longues. Dans le cas des usines de préfabrication, où la réverbération du bruit sur les parois peut augmenter le niveau sonore de manière très importante, toutes les personnes présentes dans l'atelier sont concernées par la réduction du niveau sonore ambiant. Cette réduction des nuisances sonores peut éventuellement permettre une meilleure implantation des usines dans leur

environnement, puisqu'il est plus facile de respecter les réglementations en matière d'insonorisation. Dans le cas d'un chantier en extérieur, ce sont principalement les personnes chargées de la mise en place et de la vibration qui bénéficient de la réduction du bruit, mais également les riverains lorsqu'il s'agit d'un site urbain.

Par ailleurs, les BAP sont mis en place par des opérations simplifiées donc par des agents plus rapidement formés. Ils peuvent donc se concentrer sur la préparation des coffrages sans avoir à assimiler ou mettre en pratique les recommandations sur la vibration. Mais compte tenu des objectifs exigeants des BAP, les techniciens du béton (formulateurs, agents de laboratoires et responsables de chantier) sont plus sollicités sur leurs connaissances des matériaux. Ils doivent donc se familiariser avec ces nouvelles formules de béton, les constituants utilisés, mais aussi avec les matériels et procédures nécessaires à leur préparation. [Projet National BAP, 2005].

L'utilisation d'un BAP peut s'avérer plus économique que celle d'un béton ordinaire, et ce malgré un surcoût de formulation. Ce surcoût est principalement lié à l'adjuvantation puisque la fluidité doit être instantanée, mais également se maintenir dans le temps, dans le cas où les lieux de fabrication et de coulage ne seraient pas les mêmes. Cependant, ces frais supplémentaires peuvent rapidement être compensés par la diminution des coûts de main d'œuvre (réduction du nombre d'intervenants pendant la mise en place du béton), du temps de coulage, des délais de fabrication, etc. Les BAP montrent en effet tout leur potentiel lorsque le chantier est considéré dans son ensemble, frais direct et indirect, donc par « l'approche globale » suggérée par Malier [2000].

Même si l'utilisation des BAP nécessite certaines précautions en matière de formulation ou de préparation du matériel, l'évaluation de leurs avantages techniques mais également socioéconomiques montre que ces bétons devraient être de plus en plus utilisés à l'avenir.

### **III.5. Caractérisation du béton à l'état**

#### **III.5.1. Caractérisation rhéologiques fondamentales des BAP**

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

Le comportement rhéologique d'un matériau (figure III.1) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement,  $\tau_0$ .

Le fluide est considéré comme binghamien si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma \quad (1)$$

avec  $\tau$  la contrainte de cisaillement (Pa),  $\tau_0$  le seuil de cisaillement (Pa),  $\eta_p$  la viscosité plastique ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) et  $\gamma$  la vitesse de déformation ( $\text{s}^{-1}$ ).

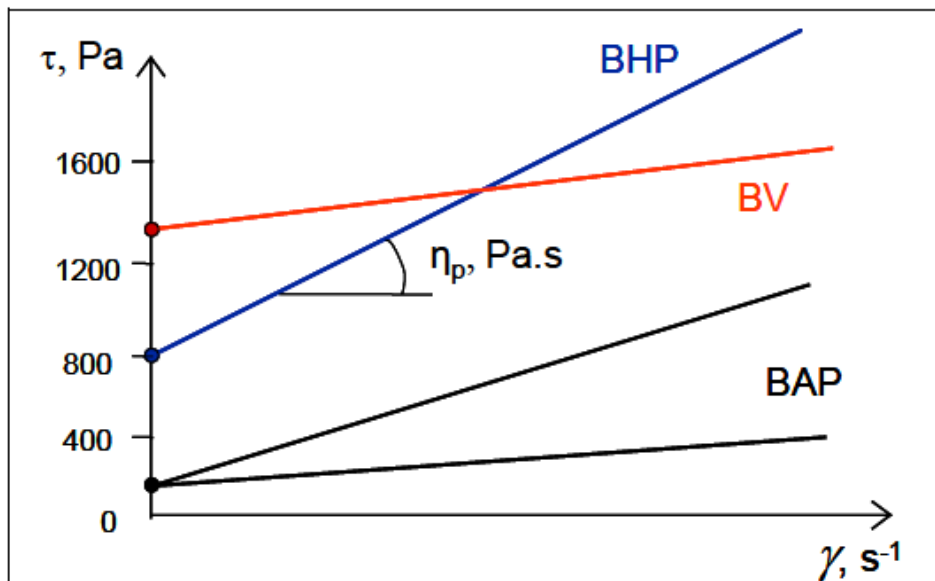


Figure III.1 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, des auteurs [De Larrard, 1996] ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a\gamma^b \quad (2)$$

où  $a$  et  $b$  sont des constantes de comportement.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique) permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres. A ce jour, les principaux dispositifs expérimentaux utilisés pour des mesures sur béton frais sont :

- le viscosimètre à plaque parallèle BML (utilisé en Islande [Wallevik, 1990]),
- le rhéomètre coaxial BTRhéom (employé en France [De Larrard, 1996]),
- le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG (utilisé en France [Hu, 1995])
- le rhéomètre coaxial RhéoCAD (mis au point par la société CAD Instrumentation avec l'aide de M. Vernet, ingénieur au CTG, et employé au LMDC [Mouret, 2003]).

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Cependant, la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres qui servirait de référence à toutes les mesures. Par conséquent, étant donné les caractéristiques inhérentes à chaque rhéomètre, les comparaisons de résultats d'un appareil à l'autre ne sont pas forcément évidentes.

### **III.5. 2. Essais de Caractérisations technologiques des BAP**

Des essais de caractérisation spécifiques des BAP ont été mis au point. Cependant, ces essais, que l'on peut qualifier de technologiques, ne permettent pas de déterminer les propriétés rhéologiques intrinsèques des bétons testés même si les grandeurs mesurées en dépendent.

En France, des recommandations nationales [AFGC 00] prévoient de caractériser les BAP à l'état frais en prenant en compte les trois caractéristiques principales demandées :

- la mobilité en milieu non confiné,
- la mobilité en milieu confiné,
- la stabilité c'est-à-dire la résistance à la ségrégation et au ressuage.

### III.5.2.1 Mobilité en milieu non confiné

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en oeuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné est l'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams (voir figure III.2) (le cône DIN peut aussi être utilisé). En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement.

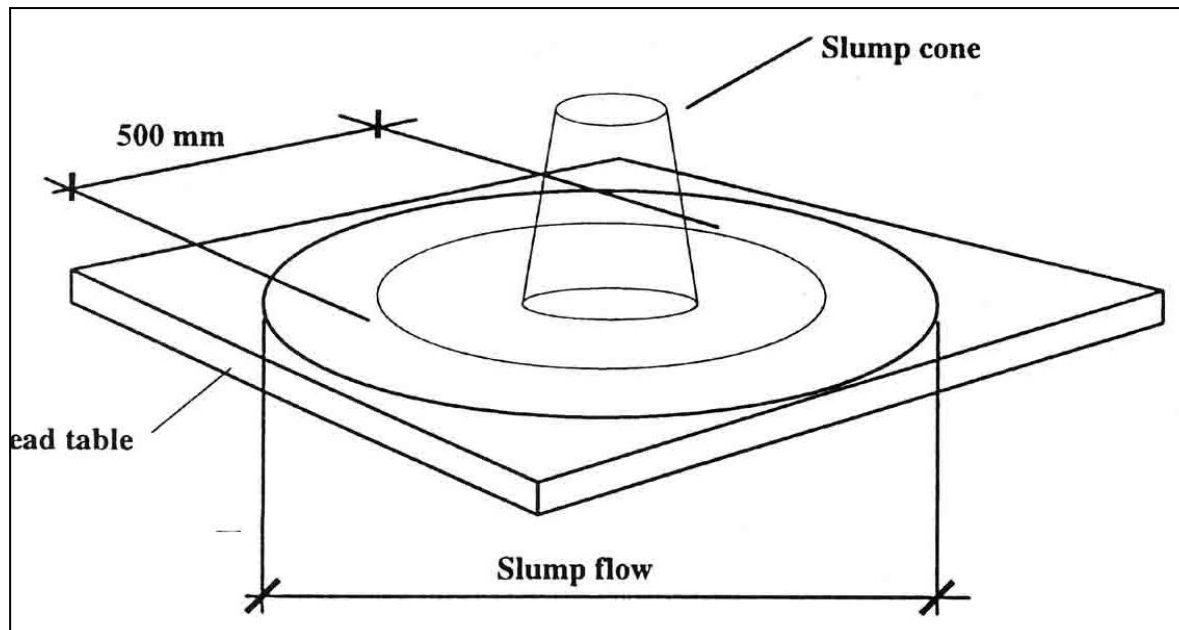


Figure III.2 : Essai d'étalement au cône (slump flow)

Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm, sans auréole de laitance ou d'amoncellement de gros granulats au centre en fin d'essai [AFGC, 2000]. La vitesse d'étalement du béton est également une indication souvent prise en compte ( $t_{50}$  par exemple : temps pour atteindre une galette de diamètre 50 cm).

D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (V funnel) [Osawa, 1995].

### I.5. 2.2 Mobilité en milieu confiné

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

L'essai de la boîte en L (figure III.3) fait partie de ces essais. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres  $\phi 14$ ) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) [AFGC, 2000].

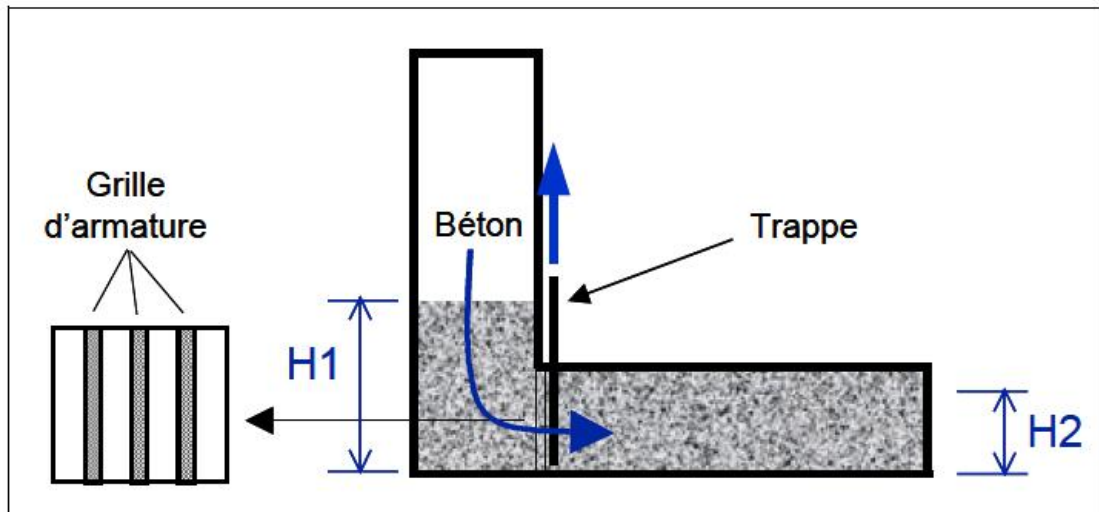


Figure III.3 : Essai de la boîte en L (L-box test)

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs  $H2/H1$ , doit être supérieur à 0,8 [AFGC, 2000]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

Les essais du tube en U, du caisson et de la passoire permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP (figure III.4) [Sedran, 1995].

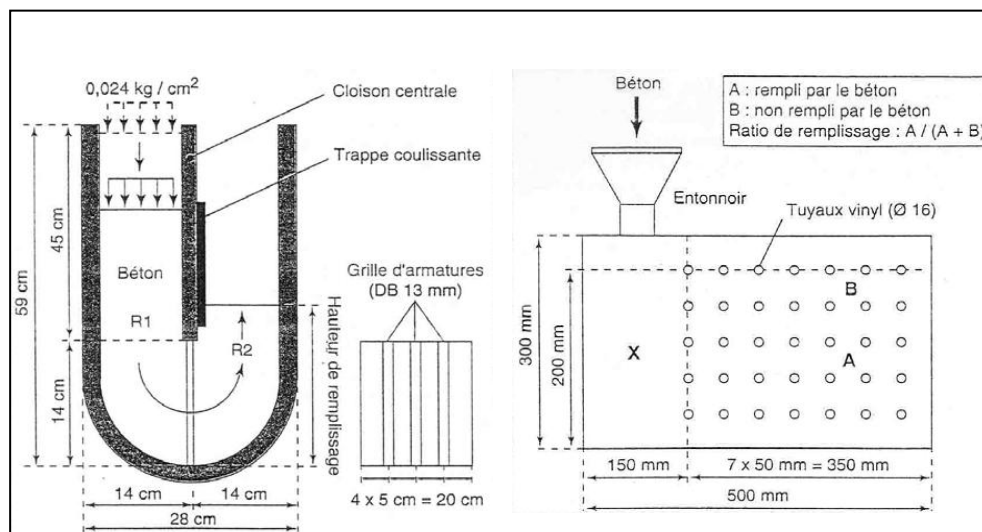


Figure III.4 : Essai du tube en U (à gauche) et du caisson (à droite)

### III.5.2.3 Stabilité

L'aptitude d'un BAP à rester homogène une fois coulé est aussi importante que celle durant la mise en place. L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée.

#### a. Résistance à la ségrégation

L'essai de stabilité de référence n'existe pas encore mais la résistance à la ségrégation statique d'un BAP doit impérativement être caractérisée. Différents tests peuvent être utilisés pour caractériser cette capacité d'un BAP à rester homogène après sa mise en place jusqu'au début de prise.

Un de ces essais est celui dit de « stabilité au tamis », développé par GTM (figure III.5) [AFGC 2000], qui consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (noté  $P_{\text{LAITANCE}}$  par la suite) d'un échantillon de béton ( $4,8 \pm 0,2$  kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$  : stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{\text{LAITANCE}} < 30\%$  : stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- $P_{\text{LAITANCE}} > 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).

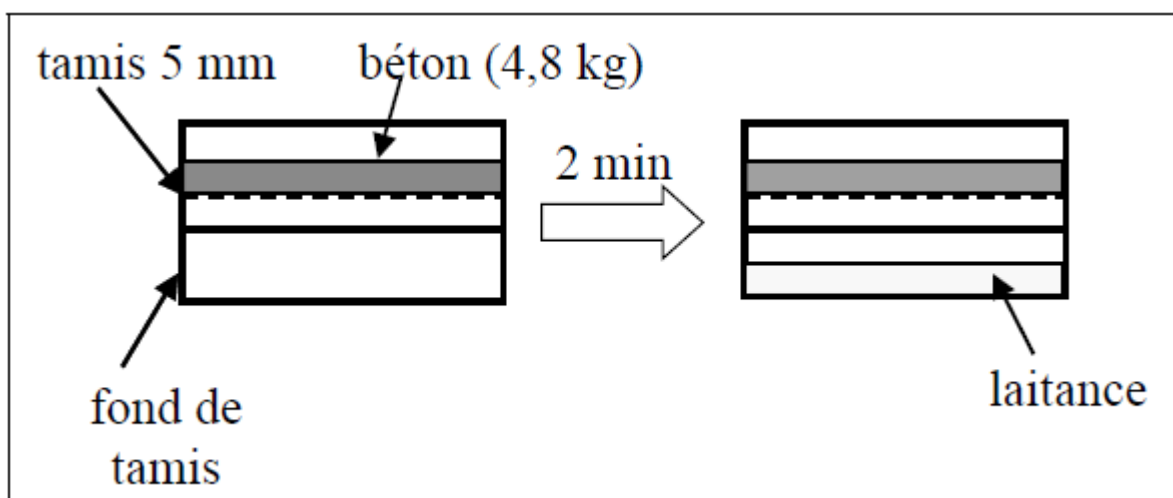


Figure III.5 : Essai de stabilité au tamis

## b. Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure III.6) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [AFGC, 2000]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.

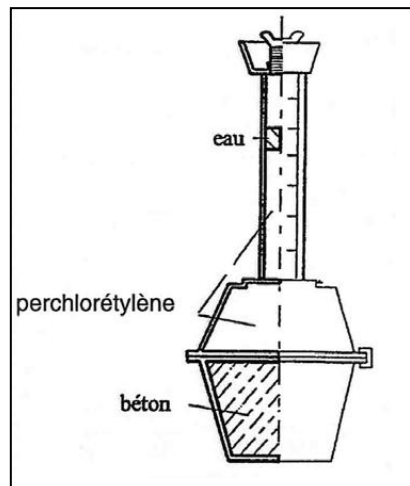


Figure III.6 : Essai de ressuage à l'aéromètre

## III.6. Modes de formulations des BAP

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- la première [Hayakawa, 1995], [Nagataki, 1995] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante ( $450 \text{ à } 600 \text{ kg/m}^3$ ) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.

- une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [Petersson, 1996]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

### III.6. 1 Cahier des charges minimum à l'état frais

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches.

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure III.7). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée.

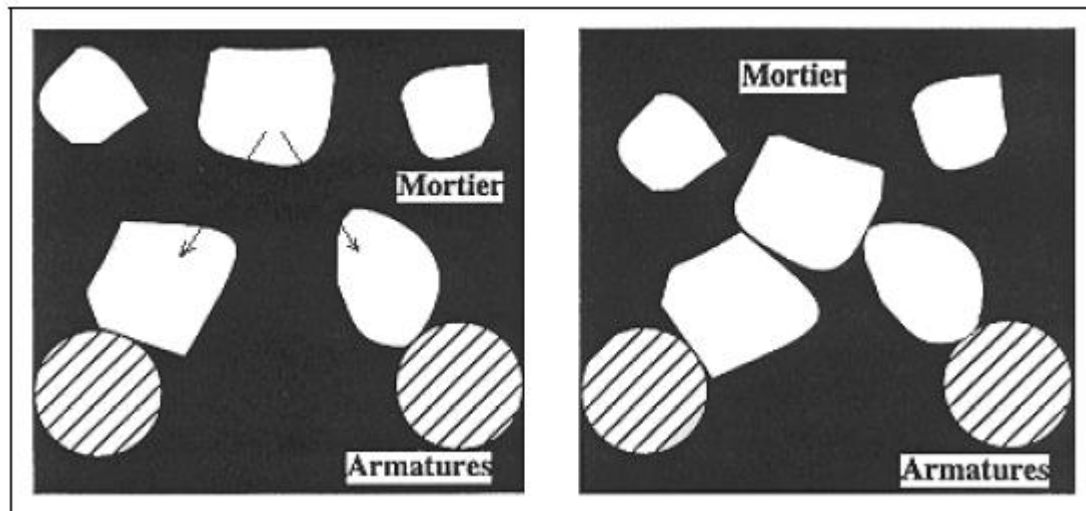


Figure III.7 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [Sedran, 1995]

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.

- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures [AFGC, 2000].

En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

### **III.6.2. Les différents constituants d'un BAP**

Formuler un BAP, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondants à un cahier des charges donné. Ce cahier des charges concerne la résistance à la compression du BAP à 28 jours, sa classe d'exposition, son ouvrabilité, c'est-à-dire l'étalement obtenu au cône d'Abrams, le rapport  $H_2/H_1$ , et sa stabilité au tamis. Pour des chantiers d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix.

#### **a. Squelette granulaire**

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en milieu confiné, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, le dosage en gravillons doit être suffisant pour contribuer à la compacité du squelette granulaire. Sur la base, ceci conduit à adapter en général un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1.

#### **b. Superplastifiants**

L'apparition des bétons autoplaçant [BAP] est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants [SP] [Bury et Christensen 2002] et [Aitcin et al, 2001]. Les superplastifiants sont des polymères à chaînes macro-moléculaires très longues. Ils permettent de défloculer les grains de la poudre [ciment+additions fines] au contact de l'eau en agissant par la combinaison d'effets de répulsion électrostatiques et stériques [Baron, 1996]. L'effet électrostatique permet de neutraliser les charges électriques présentes à la surface des grains alors que l'effet stérique engendre l'écartement des grains les uns des autres. Il en découle que l'eau initialement piégée se trouve de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (figure III.8)

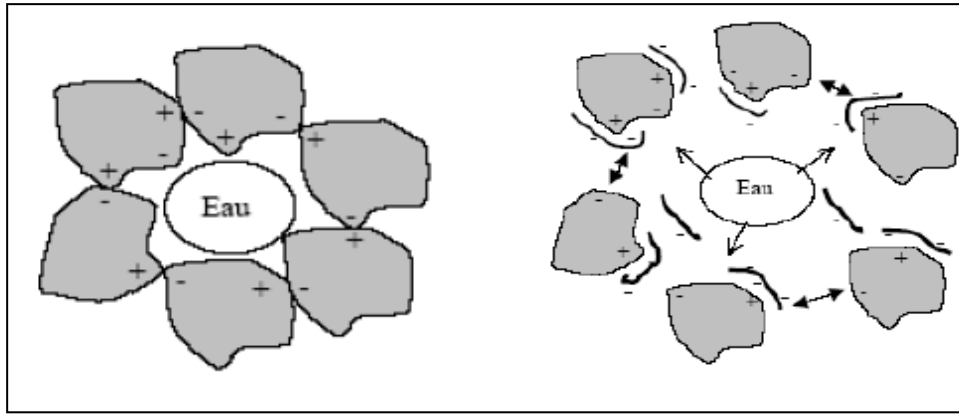


Figure III.8 : Action des superplastifiants- Défloculation des grains de ciment

Une des conséquences de ces deux effets est la diminution des frottements intergranulaires. Ainsi, l'ajout de superplastifiants va engendrer une diminution de  $\tau_0$  ce qui se traduit par une augmentation de l'étalement (figure III.9) alors que la viscosité du mélange n'est réduite que dans une moindre mesure puisque la fraction volumique des suspensions solides reste invariable.

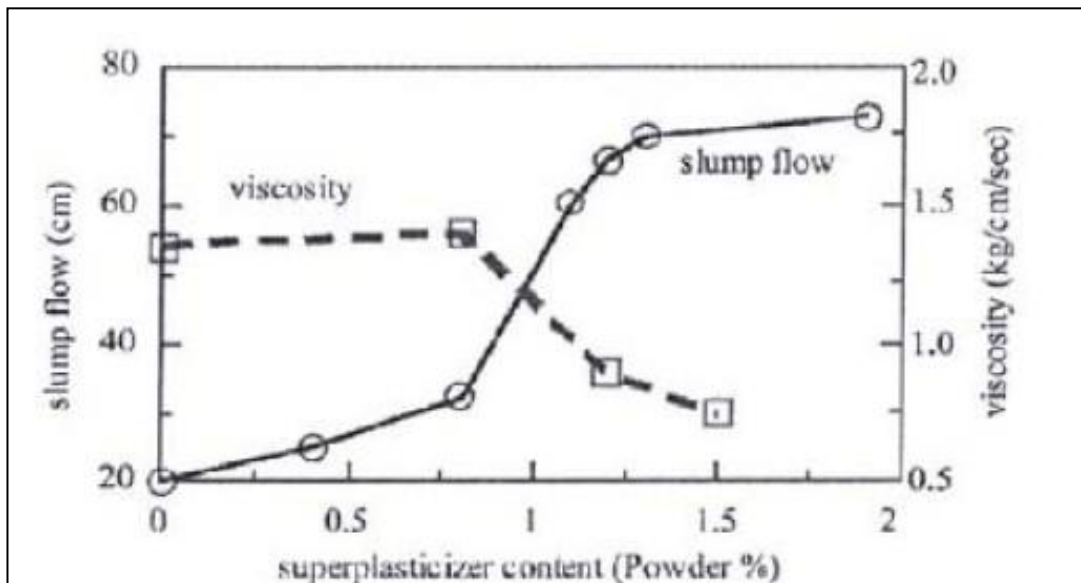


Figure III.9 : Influence de la qualité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [Chindaprasirt et Matsuoka, 2003].

Les superplastifiants peuvent réagir, également, avec les hydrates du ciment. Ainsi, l'action d'un superplastifiant lorsqu'il est introduit dans un mélange est décomposée comme suit : une partie, en excès, reste en solution.

Par ailleurs, le degré de compatibilité d'une combinaison ciment / superplastifiant se mesure à travers le maintien dans le temps de l'étalement que plus le dosage en superplastifiant et le rapport E/C sont élevée, plus le comportement rhéologique se maintient dans le temps [Yen et al 1999], [Golaszewski et Swabowski, 2004].

Sugamata et al. [1999] ont montré que l'augmentation du dosage du superplastifiant n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur caractéristique connue comme étant le dosage à saturation, c'est –à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la rhéologie du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc introduits dans la composition des BAP à un dosage proche du superplastifiant lors du malaxage [Jin, 2002], [Sugamata et al, 1999], [Hus et al, 1999]. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible car l'hydratation du ciment est amorcée ce qui implique une consommation du superplastifiant par les hydrates moins importante [Bury et Christensen, 2002]. Ainsi, en retardant son introduction, on permet au superplastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides.

### **c. Agent de viscosité**

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet de réduire la viscosité des BAP, l'introduction d'un agent de viscosité dans sa composition atténue cet effet. Les agents de viscosité sont généralement de dérivés cellulosiques, de polysaccharides ou de suspensions colloïdales. Ces produits empêchent le ressuage et limitent les risques des différents constituants granulaires. Leur emploi est particulièrement justifié dans les compositions de BAP avec un rapport  $E/L_{\text{équivalent}}$  élevé ( $E/L_{\text{équivalent}} > 0.4$ ) pour améliorer la capacité de rétention d'eau dans la pâte.

L'introduction d'un agent de viscosité a pour effet d'assurer une meilleure stabilité du BAP et de rendre moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats [Turcry, 2004] mais génère la sélection d'un couple agent de viscosité- superplastifiant compatible.

### **d. Additions fines**

Afin d'assurer une fluidité importante, une faible ségrégation, un ressuage négligeable et un meilleur arrangement granulaire, il faut introduire dans la formulation des BAP de fortes teneur en fines minérales ( $\varphi_{\text{moyen}} \leq 63\mu\text{m}$ ) : fumées de silice, laitier, cendre volante, fillers calcaire [Khayat, 1995]. Les ajouts minéraux sont moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet de disposer d'un temps prolongé d'ouvrabilité. Certains ont aussi pour effet de réduire la chaleur d'hydratation.

Billberg [2001] montre que diminuer la taille des fillers a pour effet de réduire le seuil de cisaillement des BAP et de rendre la pate plus épaisse (Figure III.10). Les résultats obtenus par Chindaprasirt et al [Chindaprasirt et al, 2007] indiquent que diminuer la taille des cendre volantes incorporées dans la formulation des BAP améliore leur durabilité vis-à-vis de la diffusion des ions de chlorures.

Les travaux révèlent que l'ajout des fillers calcaires conduit à des BAP plus résistants que les BAP additionnés avec des cendre volantes mais moins durable notamment vis-à-vis de leur tenue au gel/dégel [Mnahoncakova et al, 2008], et de leur capacité à empêcher l'infiltration de gaz ( $\text{CO}_2$ ) ou liquides corrosifs [Zhu et Bartos, 2003].

Le choix d'une addition minérale et de sa teneur dépend, donc, des exigences de résistance à la compression à 28 jours, d'ouvrabilité et des conditions d'exposition du BAP [Assie 2004].

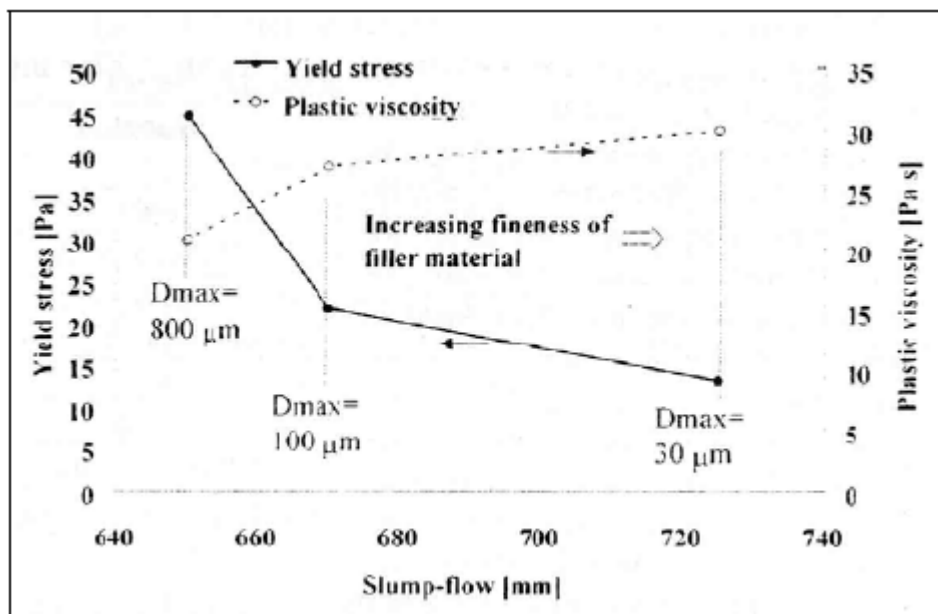


Figure III.10: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [Billbergm, 2001]

L'analyse de 51 études effectuées cette dernière décennie [Domone, 2006] révèle que les fines les plus utilisées dans la formulation des BAP sont les fillers calcaires [28 cas sur 51].

Les fillers calcaires sont, généralement, utilisés pour limiter le dégagement de chaleur, réduire le ressuage et augmenter la résistance à la compression notamment au jeune âge [Lechemi, 2003]. En effet, lorsque les particules calcaires sont bien défloculées par les superplastifiants, l'hydratation du ciment s'en trouve facilitée et l'obtention d'une matrice

cimentaire de structure plus dense est compression [Billbergm, 2001], [Gibbs, 1999] et [Sonebi, 1999].

Certains auteurs [Zhu et Gibbs, 2005] ont introduit différents types de fillers calcaires dans la formulation des BAP. Ils montrent que quel que soit le type de fillers utilisé, l'augmentation du dosage des fillers en remplacement du ciment conduit à un dosage en superplastifiant plus faible pour un étalement donné.

### **III.7. Méthodes de formulation**

Lors de la présentation des principales caractéristiques des BAP, nous avons mis en évidence l'influence des différents constituants et établi certains critères permettant d'obtenir les propriétés visées. Les gammes de valeurs généralement employées sont issues des recommandations provisoires de l'AFGC et présentées ci-dessous [AFGC, 2000] :

- une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total)
- une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/ m<sup>3</sup>)
- utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation)
- un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1)
- un diamètre maximal réduit
- éventuellement utilisation d'un agent viscosant

Les auteurs [Jin, 2002] et [Edamatsu et al, 1999] s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays.

Quelques méthodes de formulation sont cependant présentées ci-dessous.

#### **III.7.1 Optimisation du mortier**

Okamura et Ozawa sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné. Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants [Okamura et Ouchi, 2003]:

- Une quantité de gravillons limitée
- Un rapport eau/poudre faible
- Utilisation d'un superplastifiant

Les quantités de gravillons et de sable sont fixées de manière à obtenir facilement les caractéristiques des BAP en n'ajustant que le rapport eau/poudre et le dosage en superplastifiant. Ainsi, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (qui est le

rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains+vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire [Turcry, 2004] et, [Sedran, 1999]. La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier. Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de superplastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers. Un étalement relatif ( $\Gamma m$ ) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et une vitesse d'écoulement relative ( $R m$ ) est déterminée par un essai au

V-funnel pour mortier :

$$\Gamma m = (d^2 - d_0^2) / d_0^2 \quad (3)$$

$$R m = 10/t \quad (4)$$

$d^2$  est le diamètre de la galette de mortier,  $d_0$  est le diamètre inférieur du cône, et  $t$  est le temps d'écoulement du mortier.

Les auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire entre  $\Gamma m$  et  $R m$  pour un dosage en superplastifiant donné et quand le rapport eau/poudre varie. Pour formuler un BAP acceptable, il faut obtenir simultanément  $\Gamma m = 5$  et  $R m = 1$  [Sedran, 1999] et [Jin, 2002].

Edamatsu et al. [1999] proposent une méthode pour évaluer les interactions entre le sable ou les poudres du mortier et les gros granulats. Ils montrent qu'en faisant varier les paramètres  $\Gamma m$  et  $R m$  dans une certaine gamme, le rapport  $R_{mb}/R_m$  est constant.  $R_{mb}$  est la vitesse d'écoulement relative du béton modèle composé du mortier étudié ainsi que 20% de billes de verre de 10 mm de diamètre. A partir de ce rapport, les auteurs déclarent qu'il est possible d'évaluer les interactions entre les gravillons et les particules du mortier (sable ou poudre).

### III.7.1 Optimisation de la quantité de pâte

Van Bui et Montgomery [1999] présentent une méthode de formulation basée sur l'optimisation de la quantité de pâte. Ils montrent que :

- il existe une quantité de pâte minimum pour éviter les blocages lors de l'écoulement
- il existe une quantité de pâte minimum pour assurer la maniabilité du mélange.

La quantité de pâte minimum pour éviter les risques de blocage, soit la quantité de granulat maximum est calculée selon l'expression :

$$(5) \quad V_{ab \max} = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) Nga}{\sum \frac{Pvg_m \cdot Nga \cdot \rho_s}{Vab_m} + \sum \frac{Pvs_n \cdot (1 - Nga) \cdot \rho_g}{Vab_n}}$$

avec  $\rho_g$  masse volumique des gravillons,  $\rho_s$  masse volumique du sable,  $N_{gm}$  pourcentage de gros gravillons,  $P_{vgm}$  et  $P_{vgn}$  rapport entre le volume des gros granulats de classe  $m$  (respectivement des granulats fins de classe  $n$ ) sur le volume total de granulats,  $V_{abm}$  et  $V_{abn}$  respectivement les volumes bloqués des granulats de classe  $m$  et  $n$ .

Ils prennent en compte la distance entre armatures ( $c$ ) et le diamètre d'une fraction granulaire  $d_i$  tel que :

$$d_i/Dca = c \quad (6)$$

avec 
$$d_i = M_{i-1} + 3/4 (M_i - M_{i-1}) \quad (7)$$

$M_i$  et  $M_{i-1}$  sont les dimensions des tamis encadrant la classe granulaire.

### III.7.3 Optimisation du squelette

Le principe de formulation proposé par de Larrard [1998] se base sur le fait que la rhéologie du béton dépend de l'arrangement de son squelette granulaire. L'optimisation de la compacité du béton permet de réduire la teneur en eau à ouvrabilité constante. Les modèles développés permettent d'étudier des mélanges de grande étendue granulaire et ainsi de prendre en compte la contribution des différents constituants des bétons.

Dans un empilement, si tous les grains sont arrangés de manière optimale, la compacité maximale ( $\gamma_i$ ) est atteinte (paramètre également appelé compacité virtuelle dont nous ne donnerons pas l'équation ici). Or dans la pratique, un empilement ne peut pas atteindre cette compacité virtuelle. Un paramètre a été calculé afin de rendre compte de la compactabilité des mélanges, c'est à dire la capacité des bétons à se mettre en place dans un moule donné, selon un procédé donné. Il est exprimé selon la forme :

$$K' = \sum K'_i = \sum (\gamma_i / \beta_i) / (1/\varphi - 1/\gamma_i) \quad (9)$$

avec  $K'_i$  indice de serrage de chacune des classes granulaires,  $\gamma_i$  est la proportion volumique des grains de diamètre  $d_i$ ,  $\beta_i$  est la compacité virtuelle des grains de classe  $i$ ,  $\varphi$  est la compacité réelle du mélange,  $\gamma_i$  est la compacité virtuelle lorsque la classe  $i$  est dominante.

En se basant sur ce concept et après validation expérimentale, de Larrard et Ferraris [Ferraris, de Larrard, 1998], proposent également des modèles pour décrire le seuil d'écoulement et la viscosité des bétons. Dans le cas d'un dosage en superplastifiant au dosage à saturation, les expressions obtenues sont les suivantes :

$$\tau_0 = \exp(2.537 + 0.540K'_g + 0.854K'_s + 0.224K'_c) \quad (10)$$

$$\mu = \exp\left(26.75\left(\frac{\varphi}{\varphi^*} - 0.7448\right)\right) \quad (11)$$

Où  $\varphi^*$  est la compacité maximale du mélange et les indices g, s et c correspondent respectivement au granulat, au sable, et au ciment.

Sedran [1999] obtient des constantes légèrement différentes donnant une meilleure description des faibles viscosités :

$$\mu = \exp\left(45.88\left(\frac{\varphi}{\varphi^*} - 0.8512\right)\right) \quad (12)$$

Les différentes données sont ensuite insérées dans un logiciel calculant les différentes propriétés du béton. Ce logiciel permet également d'optimiser la formule de béton à partir d'un cahier des charges précis.

Bien qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique, quelques auteurs ont proposé des approches se basant sur une optimisation du mortier, une optimisation de la quantité de pâte ou une approche granulaire.

#### **III.7.4. Méthode basée sur un plan d'expérience :**

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al (Cité par [Coussot et Ancy, 1999]) ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

#### **III.8. Propriété du béton durci**

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

### III.8.1. Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [De Larrard, 1992], [Le Roy, 1996].

Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

#### III.8.1.1 Résistance mécanique

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [De Larrard, 1999], [Pera, 1999]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Différentes données ont été publiées [Gibbs, 1999], [Sonebi, 1999] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes (voir figure III.11).

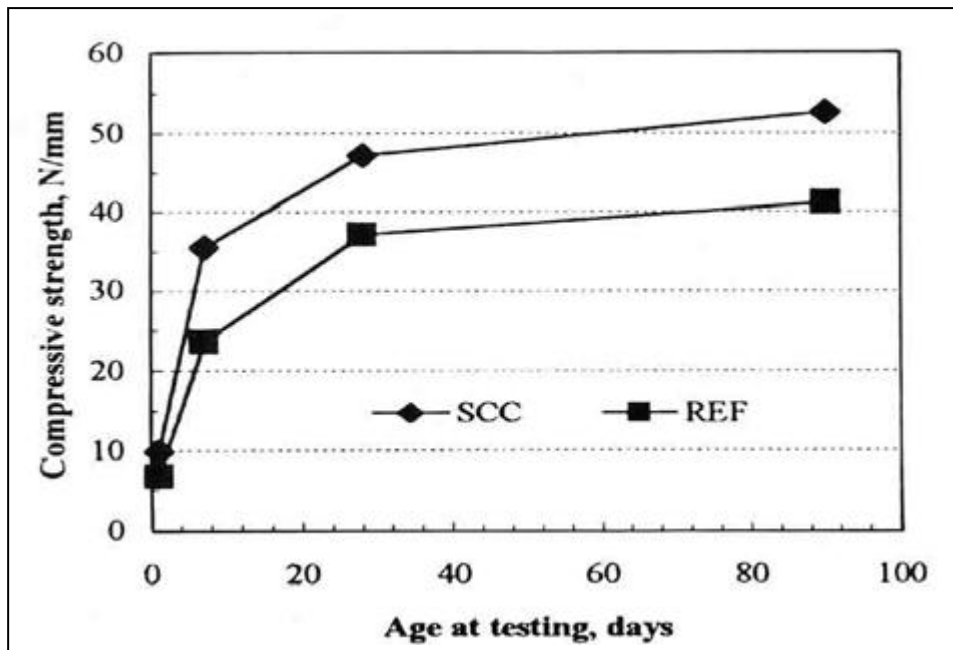


Figure III.11 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs, 1999]

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [Felekoglu, 2003].

De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique [Shindoh, 2002]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

### III.8.1.2 Module d'élasticité (en compression)

Si on se réfère à la formule réglementaire du module ( $E_{ij} = 11000 f_{cJ}^{1/3}$ ), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré.

Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près [Persson, 2000],[Pons 2003] (voir figure III.12), d'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [AFGC, 2000], [Klug, 2003].

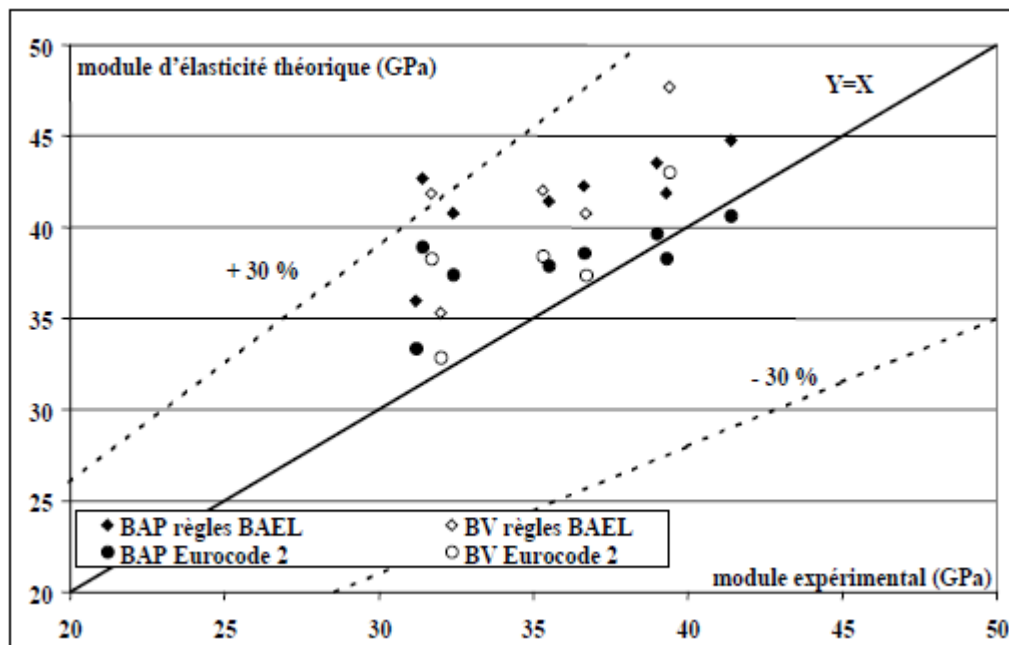


Figure III.12 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [Pons, 2003]

Leur volume de pâte plus élevé peut expliquer ce phénomène. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats  $E_g$  (60000 à 100000 MPa). A partir d'un calcul prenant en compte le volume respectif des différentes phases (pâte, granulats), les modules résultants peuvent être comparés aux prévisions réglementaires [De Larrard, 1992] (figure III.13).

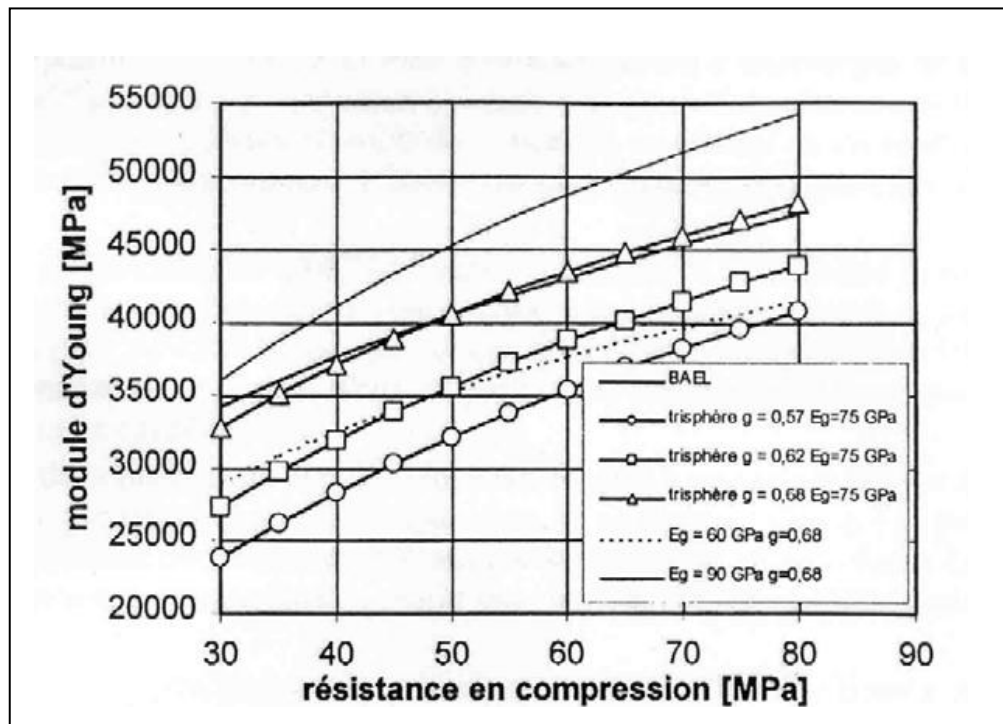


Figure III.13: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [De Larrard, 1992]

Ainsi, pour des caractéristiques représentatives des bétons courants, à savoir un module  $E_g$  de 75000 MPa et une proportion de granulats ( $g$ ) de 68%, les résultats sont très proches des valeurs prédites par le BAEL.

Par contre, lorsque les proportions granulaires sont plus faibles (57%), ce qui est le cas pour les BAP, le module calculé est plus faible de 7000 à 9000 MPa que celui prévu par le règlement, soit une diminution relative de 15 à 30%. Ces écarts deviennent deux fois moins importants pour une proportion moyenne de granulats ( $g = 62\%$ ) puisque les modules sont inférieurs aux prévisions du règlement de 7 à 20% [Le Roy, 1996] (figure III.14).

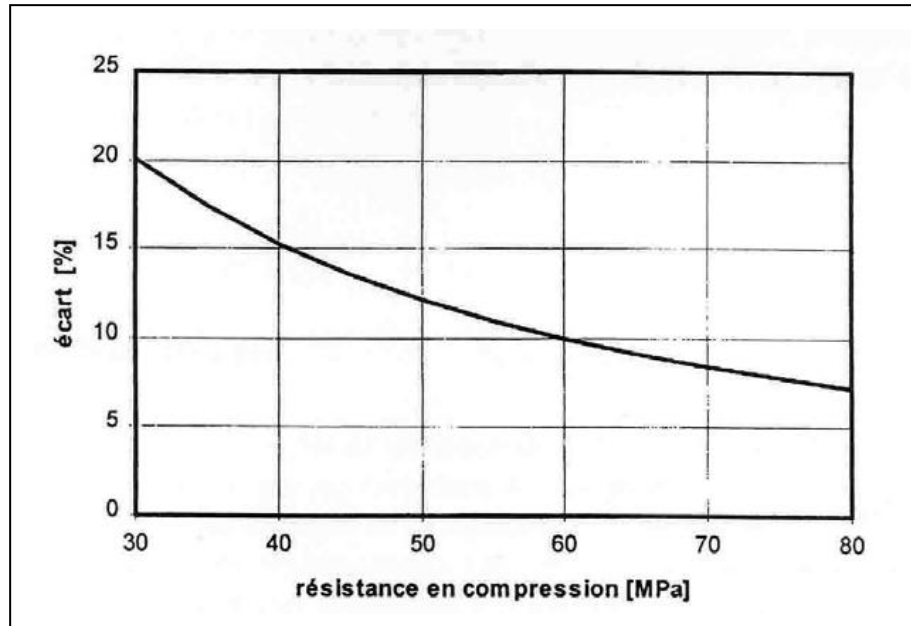


Figure III.14: Ecart relatif du module des BAP ( $g = 62\%$ ,  $E_g = 75 \text{ GPa}$ ) par rapport aux prévisions du BAEL [Le Roy, 1996]

### III.8.1.3. Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction [Konig et al 2001]. Ils montrent que l'augmentation de la quantité de sable ou/et du volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction.

En effet, la résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

Pour certains auteurs [Klug et Holschemcher, 2003] , [Konig et al, 2001], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV, Donc la résistance en traction des BAP supérieure à celle des BV ( de l'ordre de 10 % ). Ces résultats sont repris par Pineaud [2007]. Il suggère que la qualité de l'interfaces pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

### III.8.2. Retrait (état frais, état durci)

#### a. Retrait plastique

Pour les déformations au jeune âge, autrement dit le retrait plastique, plusieurs travaux se sont attachés à les expliciter en étudiant notamment les différences potentielles de comportement entre BAP et béton vibré [Gram et Pilparinen 1999], [Turcry 2004]. Les premiers auteurs observent des retraits plastiques deux à trois plus grands pour les BAP que pour les bétons vibrés (voir figure III.15). L'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons vibrés [Turcry 2004] (figure III.16).

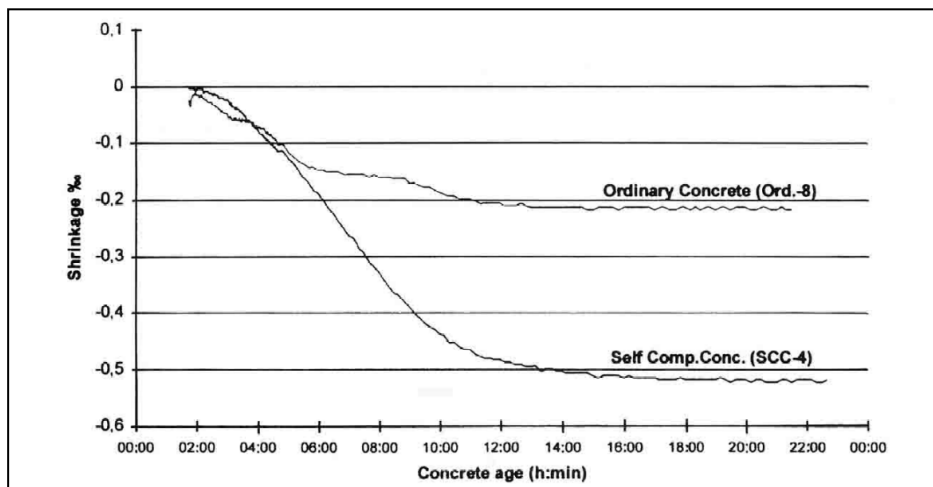


Figure III.15 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ , 50% HR) [Gram, 1999]

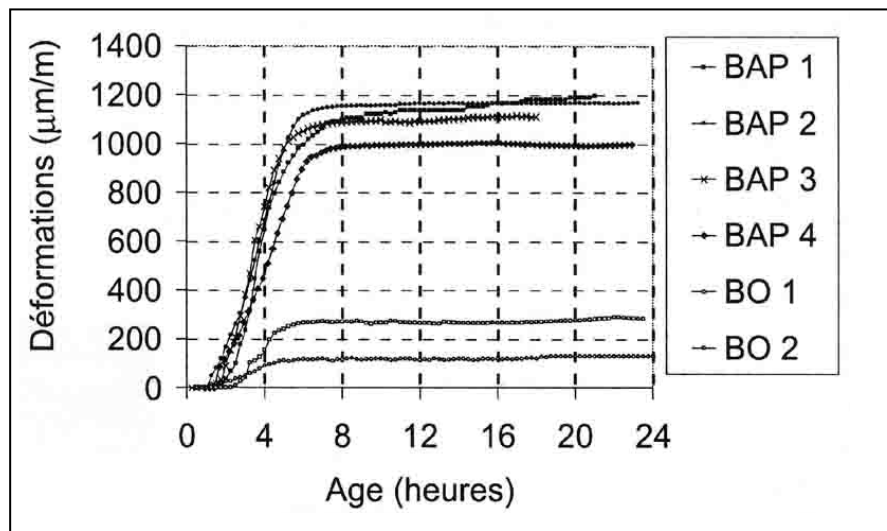


Figure III.16: Retrait plastique des formules de BAP et de bétons vibrés dérivés [Turcry, 2004]

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport eau/fines (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon ces mêmes données, les fillers calcaires employés dans certaines proportions n'ont presque pas d'effet sur le retrait plastique. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la protection du séchage des BAP pour des applications horizontales (produit de cure, etc.) afin de contrôler la fissuration plastique qui peut en résulter. Celle-ci est souvent peu nuisible en elle-même mais fournit des amorces de fissures au retrait d'après prise et peut ainsi menacer la durabilité de la structure concernée.

### b. Retrait endogène

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs [Hu et Barbieri 1998] attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés (voir figure III.17), d'autres contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton.

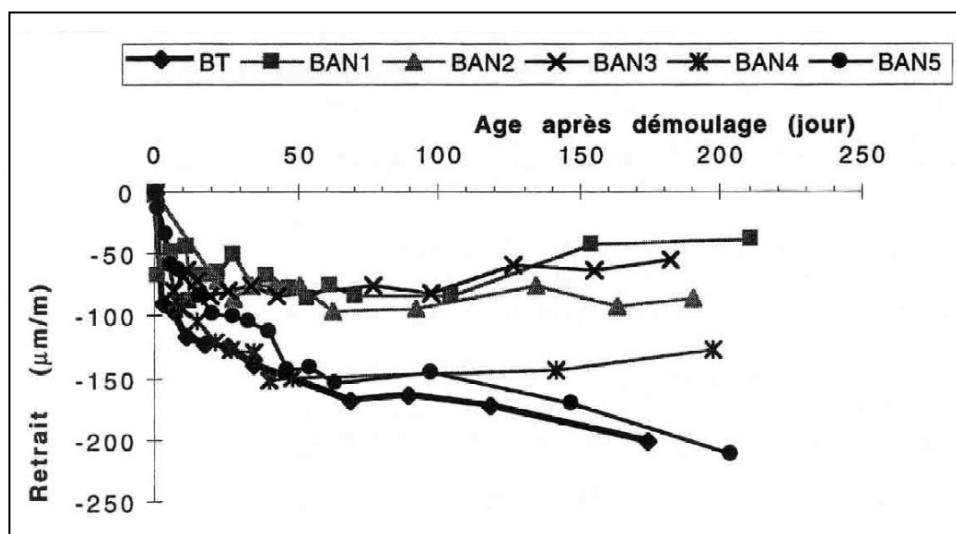


Figure III.17 : Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [Hu, 1998]

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus

fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés [AFGC, 2000].

Persson [1999] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance (voir figure III.18).

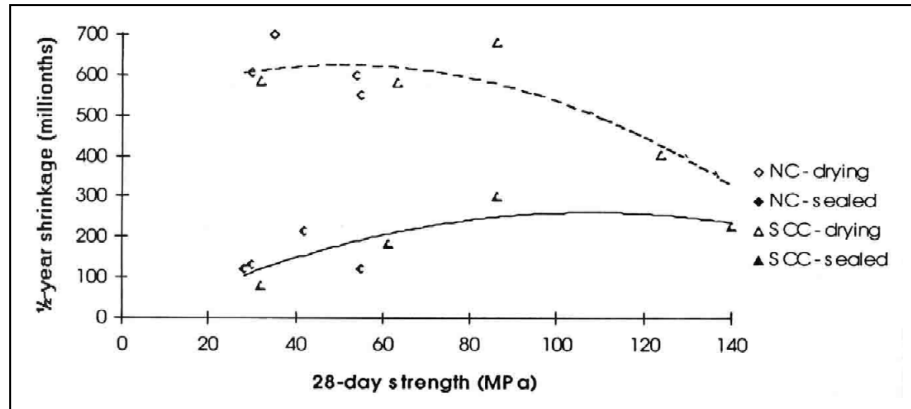


Figure I.18: Retraits endogènes et de dessiccation (à 180 jours) de divers bétons vibrés (NC) et BAP (SCC) en fonction de la résistance mécanique à 28 jours [Persson, 1999]

### c. Retrait de dessiccation

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires.

Certains auteurs [Hu et Barbieri, 1998] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (voir figure III.19). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

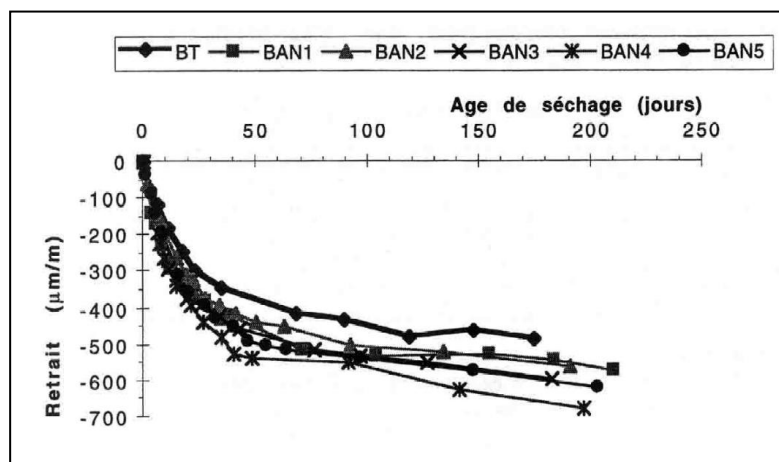


Figure III.19: Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP

[Hu, 1998]

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [Persson, 1999], [Sakata, 1998]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700  $\mu\text{m/m}$  (à 180 jours).

Enfin, d'autres auteurs [Pettersson, 2001] observent des retraits de séchage des BAP moins importants (voir figure III.20) que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, l'augmentation de volume de pâte pour une même quantité d'eau et la diminution de rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage. [Neville 2000]

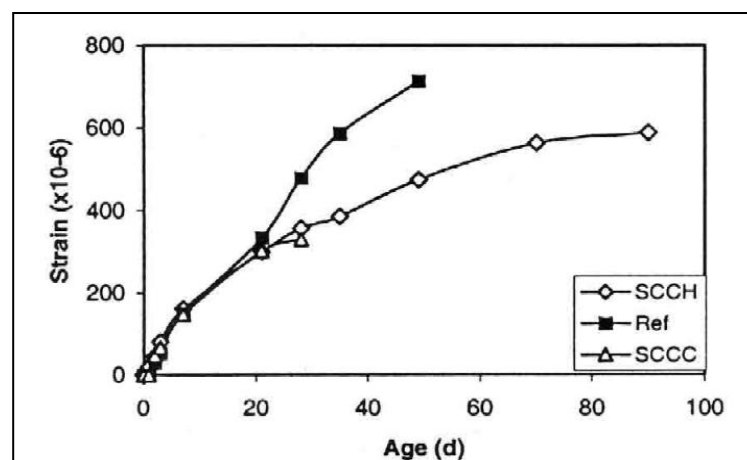


Figure III.20: Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [Sonebi, 1999]

Le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également. Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle (voir figure III.21).

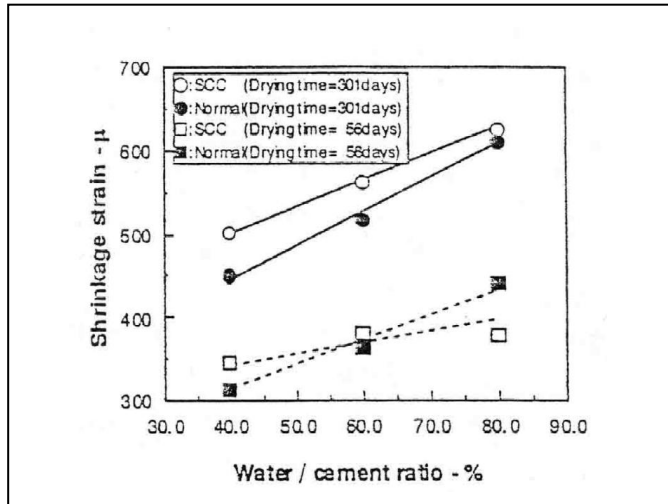


Figure III.21: Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C [Sakata, 1998]

### III.9.Bilan:

La lecture de la littérature nous a permis de se familiariser avec le BAP qui présente de nombreux avantages tels que la mécanisation de la production, de l'exécution sur chantier, l'amélioration des conditions environnementales,...etc. Ces avantages doivent faire du BAP le matériau d'avenir dans le bâtiment et les travaux publics.

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport des vibration et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, entraîneurs d'air, agents de viscosité...) et des additions minérales (fumée de silice, fillers calcaires...). Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des méthodes de formulation et d'essais simples afin de mieux caractériser ce béton.

## **Problématique et objectifs de la recherche**

Le développement économique et social demeure tributaire pour une grande part d'une utilisation rationnelle de deux principales ressources, l'eau dont la mobilisation insuffisante actuellement demandée à être d'avantage maîtrisée et étendue, et le sol dont la mise en valeur est plus que jamais impérative. Or, ces deux potentialités sont menacées par l'érosion hydrique qui en a fait des facteurs limitants.

L'Algérie consacre un effort considérable pour alimenter en eau potable sa population et vivifier par l'irrigation certaines parties de son territoire. Cela pour pallier l'insuffisance et l'irrégularité de la pluviométrie.

Les incidences financières et écologiques sont de plus en plus décriées par les experts internationaux en hydraulique. Le même constat s'applique évidemment aux barrages nationaux.

L'un des ennemis pervers de ses barrages est l'envasement ou ce que les experts appellent « l'ennemi silencieux » et qui cause annuellement, selon la banque mondiale, un préjudice avoisinant le 1% du coût global de l'investissement. En effet, toutes les études ont montrées que ce phénomène produit un dépôt de vase de l'ordre de 4,5 milliards de mètres cubes, ce qui réduit les capacités de stockage des barrages d'environ 11%. Cependant, ce taux est encore plus important concernant les barrages algériens.

Les matières solides issues du dragage, sont juste larguées en aval ou stoker dans des énormes digues, ont causées de nombreux dégâts à l'environnement. Leur valorisation contribue certainement à l'amortissement des coûts liés au dévasement ainsi qu'à préserver un environnement qui dans un passé proche, a été le reflet d'une prospérité remarquable [Pimienta et al 1973].

La fabrication de matériaux de construction est une nécessité pour l'économie, principalement au profit du développement des infrastructures immobilières. L'utilisation de matériaux de construction importés (équipements et produits de transformation) engendre des coûts prohibitifs au détriment de la croissance économique nationale.

Il est donc nécessaire que des mesures incitatives à la promotion des matériaux locaux de construction soient encouragées pour favoriser la valorisation des ressources locales et le développement de l'esprit d'initiative.

Ainsi, ces matériaux ont l'avantage d'être compétitifs, disponibles à des prix défiant toute concurrence et en parfaite harmonie avec notre milieu ainsi que nos conditions de vie.

En plus, ils ont l'avantage de contribuer à l'économie créant des emplois et des sources de revenu aux citoyens. Mais plus encore une diminution des coûts de transport, l'indépendance par rapport aux fluctuations de prix ou à d'éventuels problèmes politiques, la création d'une industrie locale donc d'emplois.

De cette recherche bibliographique nous pouvons retenir que la littérature reste assez pauvre en résultats concernant la valorisation et l'exploitation de la vase des barrages. Afin de combler certaines lacunes dans l'étude bibliographique, nous allons tenter d'apporter des connaissances en expliquant le comportement à l'état frais et durci du BAP à base des vases des barrages de Fergoug et Chorfa.

Ainsi par cette recherche, il nous sera possible de répondre à plusieurs objectifs :

- Ecologiques : notre premier objectif est de procéder à la diminution des quantités de vases stockées en aval des barrages de Chorfa et Fergoug. Cette opération permettra de préserver l'environnement.
- Economiques : comme toutes les additions minérales, les vases calcinées de Fergoug et Chorfa peuvent constituer un composant essentiel du béton. Comme liant, la vase peut assurer une économie dans la consommation du ciment dont le prix ne cesse d'augmenter et une réduction de sa fabrication portant préjudice à la qualité de l'air.
- Technologique : les bétons autoplaçant présentent plusieurs avantages tant au niveau environnemental, humain, technologique qu'économique qui intéressent de plus en plus les industries.

Nous allons tenter par cette étude d'apporter des connaissances en expliquant le comportement du BAP vis-à-vis des résistances mécaniques. Les manipulations de notre recherche aideront à se faire une idée plus précise sur la possibilité d'élaborer des bétons autoplaçants à base de vase possédant les mêmes performances voir meilleures que les bétons ordinaires, au BAP à base d'autres additions.

## **Chapitre IV : Matériaux et procédures**

### **IV.1. Introduction**

Dans le but d'étudier le comportement des BAP à base de vases calcinées à 750°C, ainsi que son influence sur l'évolution des propriétés mécaniques de ces béton ; nous avons effectués une série d'essais physique, minéralogiques et chimiques sur les matériaux utilisés et sur les bétons formulés.

### **IV.2. Les essais de caractérisations**

#### **IV2.1. Caractéristiques de ciment et vases**

Les essais de caractérisation physique sont importants à savoir :

- La surface spécifique du ciment, qui détermine sa finesse de mouture exprimé en  $\text{cm}^2/\text{g}$  (selon la norme : NF.EN.196-6).
- Masse volumique absolue.
- la consistance normale (E/C) (selon la norme : NF.P.358).
- début et fin de prise (selon la norme : NF.EN.196-3).

#### **➤ Finesse de ciment**

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse est une caractéristique importante : lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en  $\text{cm}^2$  de surface des grains de ciment par gramme de poudre. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface.

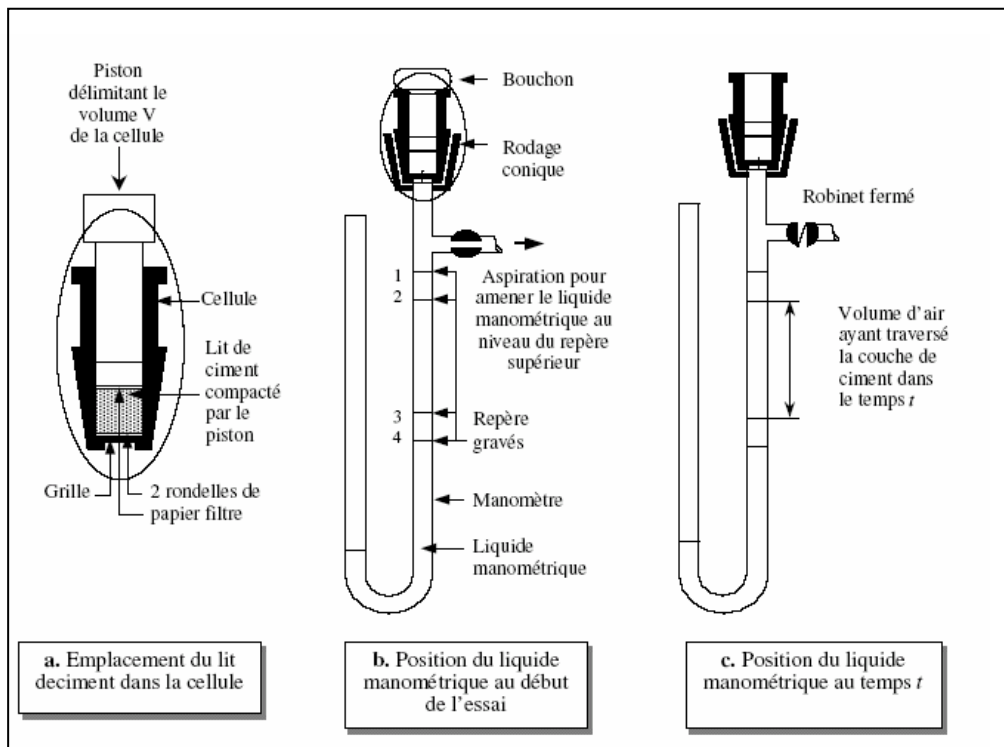


Figure IV.1 : Principe de fonctionnement du perméabilimètre de *Blaine*

### ➤ Masse volumique absolue

Il s'agit de calculer la masse volumique absolue du ciment et des vases en utilisant la méthode du volumétre " Le Chatelier ".



Figure IV.2 : Mesure de la masse volumique absolue de la vase calcinée par l'appareil " Le Chatelier ".

### ➤ *Consistance normale*

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée « CONSISTANCE VICAT».

La distance (d) caractérise la consistance de la pâte étudiée.

- Si  $(d) = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$ , on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée. (Consistance normalisée).
- Si (d) n'atteint pas cette valeur (c.à.d.  $d > 7\text{ mm}$  ou  $d < 5\text{mm}$ ), il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

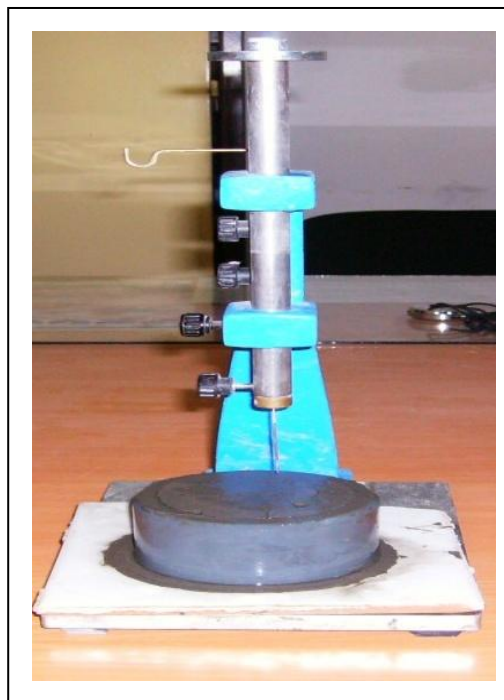


Figure IV.3 : Appareil de VICAT munie de la sonde de consistance.

Nous avons utilisé les notations suivantes pour les différentes pâtes étudiées :

PT : Pâte de ciment témoin CPA.

PVF10 : Pâte de ciment CPA+10% de vase de Fergoug.

PVF15 : Pâte de ciment CPA+15 %de vase de Fergoug.

PVF20 : Pâte de ciment CPA+20 %de vase de Fergoug.

PVC10 : Pate de ciment CPA+10% de vase de Chorfa.

PVC15 : Pate de ciment CPA+15 % de vase de Chorfa.

PVC20 : Pate de ciment CPA+20 % de vase de Chorfa.

➤ *Début et fin de prise*

Il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat qui donne deux repères pratiques : Le début de prise et la fin de prise.

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée ; l'appareil utilisé est appareil de VICAT équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Quand sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance  $d$  du fond du moule telle que  $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$  on dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage, est appelé « TEMPS DE DEBUT DE PRISE ». Le « TEMPS DE FIN DE PRISE » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm.

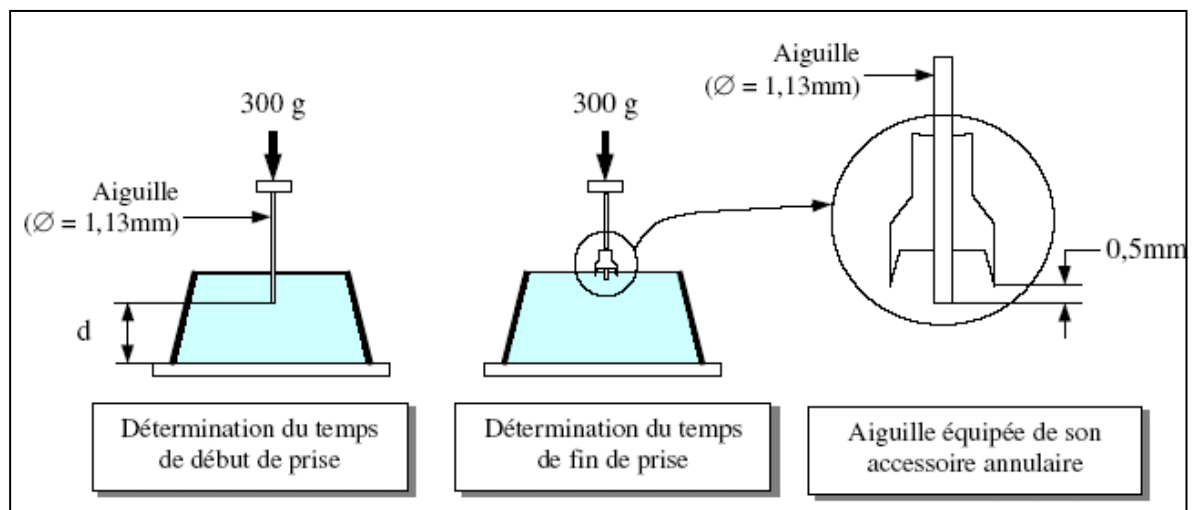


Figure IV.4 : L'appareil de VICAT minu d'aiguille.

### IV.2.2. Caractéristiques des granulats

Pour l'utilisation dans le perfectionnement des éprouvettes du mortier le sable doit être soumis à des essais de laboratoire à savoir : l'analyse granulométrique, l'essai équivalent de sable, la masse volumique apparente et absolue.

#### ➤ *Analyse granulométrique par voie sèche*

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

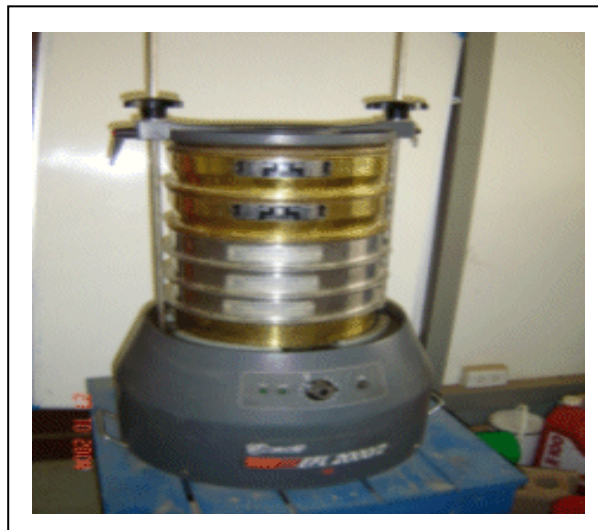


Figure IV.5 : Tamiseuse électrique

#### ➤ *Détermination de la masse volumique absolue*

Le but de la mesure de la masse volumique apparente et absolue est nécessaire pour contrôler la qualité des granulats et pour calculer la composition des mortiers. Il faut préférer les granulats avec le minimum qui forme ossature compacte de mortier.

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons.

Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

La méthode est très simple et très rapide. Elle utilise du matériel très courant de laboratoire. Toutefois sa précision est faible.

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume  $V_1$  d'eau.
- Peser un échantillon sec  $M$  de granulats (environ 300g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume  $V_2$ .

Pour opérer dans de bonnes conditions, utiliser une éprouvette graduée en verre de 500  $\text{cm}^3$  de volume. La lecture des niveaux  $V_1$  et  $V_2$  doit se faire en bas du ménisque formé par l'eau. En effet, celle-ci a tendance à remonter sur les bords de l'éprouvette sur une hauteur de 1 à 2 mm, ce qui fausse bien sûr la lecture des volumes si la lecture est effectuée en haut du ménisque.

Essais de la masse volumique apparente et la masse volumique absolu est réalisé selon la norme : NF 18- 555 :

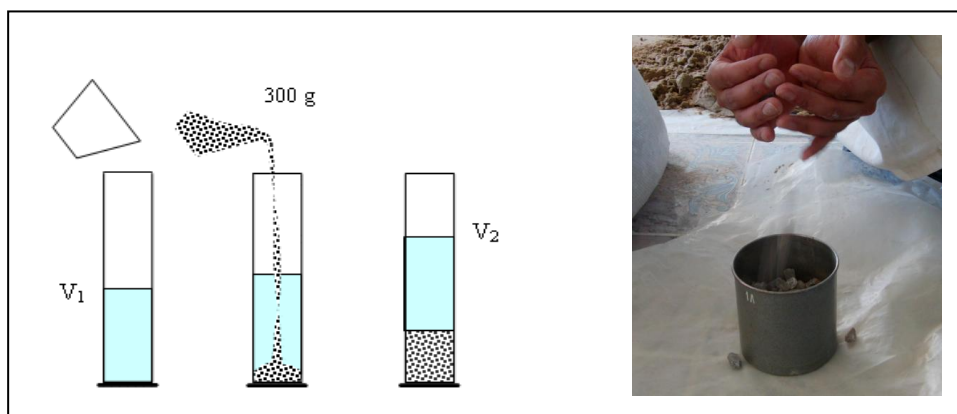


Figure IV.6 : Méthode de l'éprouvette

### ➤ *Equivalent de sable*

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

Les granulats employés pour le béton doivent être propres, car les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des adhérences entre les granulats et la pâte. La propreté désigne: d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains, d'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

Essai équivalent de sable est réalisé selon la norme : NF P 18-598.

### IV.3. Les essais sur mortier

#### - Résistance mécanique (EN 196-1)

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm conservés dans l'eau à 20° C.

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours)(figure IV.7 et IV.8) [Raymond 2004].

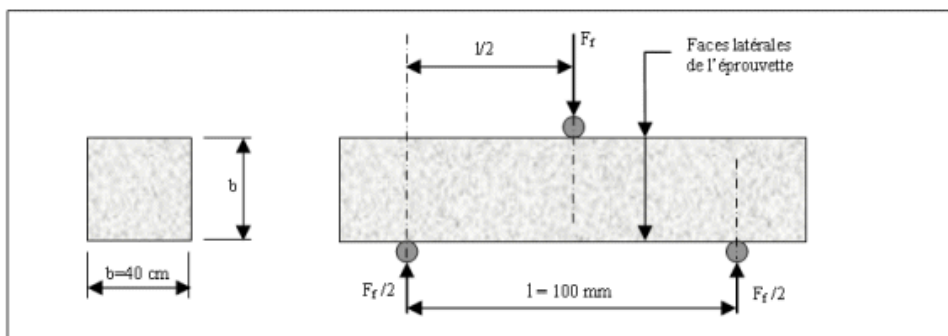


Figure IV.7 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

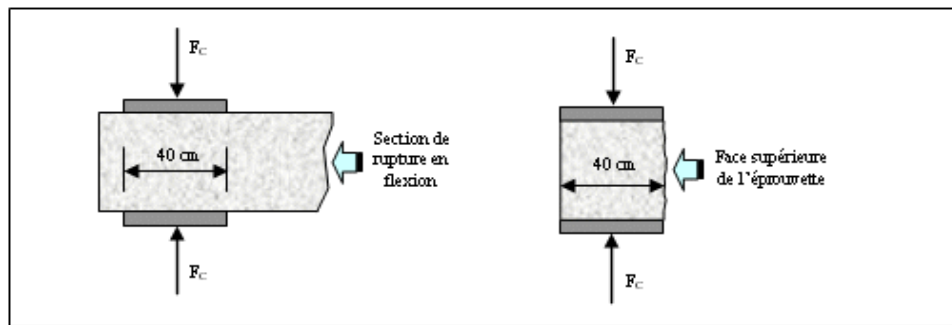


Figure IV.8 : Dispositif de rupture en compression

#### IV.4. Les essais sur BAP à l'état frais

Une liste exhaustive des essais de caractérisation des propriétés des bétons à l'état frais à été présentée dans la synthèse bibliographique (§III.5.2). Cependant la caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC [2000] : étalement au cône, écoulement à la boîte en L, Stabilité au tamis, ressuage et l'essai de colonnes.

- **L'essai d'étalement**

Il s'agit de démouler un cône normalisé DIN (ou cône d'Abrams) de béton frais et de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue (figure IV.9). Il faut rappeler qu'est considéré comme autoplçant, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 60 et 75 centimètres. Pour les BAP, des temps d'écoulement intermédiaires ont été mesurés. Il s'agit du temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 50 cm, noté  $t_{50}$ .



Figure IV.9 : Essai d'étalement

### • L'essai de la boîte en L

Il consiste à mesurer le temps d'écoulement du béton à travers une ouverture obstruée par des barres d'aciers. On remplit la partie verticale de la boîte en L en amont des armatures (figure IV.10). Le temps de passage du béton est décompté à partir du soulèvement de la trappe. Deux mesures sont effectuées lorsque le béton franchit 2 repères visuels à 20 et 40 cm des armatures. Après stabilisation, le ratio des hauteurs  $H_2$  et  $H_1$  est calculé ( $H_2/H_1 \geq 0,80$ ). Toutes ces données permettent de contrôler le caractère autoplaçant.



Figure IV.10 : Essai de la boîte en L

### • L'essai de stabilité au tamis

Il consiste à mesurer la proportion d'éléments fins de béton (laitance) passant au travers d'un tamis d'ouverture 5 mm (figure IV.11) pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes [AFGC, 2000] :

- $0\% < \pi \text{ Laitance} < 15\%$  : stabilité satisfaisante,
- $15\% < \pi \text{ Laitance} < 30\%$  : stabilité critique,
- $\pi \text{ Laitance} > 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).



Figure IV.11 : Essai de stabilité au tamis

- **L'essai de ressuage**

Pour l'essai de ressuage, il s'agit de mesurer la quantité de liquide remonté à la surface d'une éprouvette 15 x 30 cm au bout de 3h (figure IV.12).

Un ressuage important est le signe d'une dégradation de la qualité esthétique des parements et de la durabilité. La valeur limite de ressuage conseillée doit être  $\leq 3$  ‰ en volume.

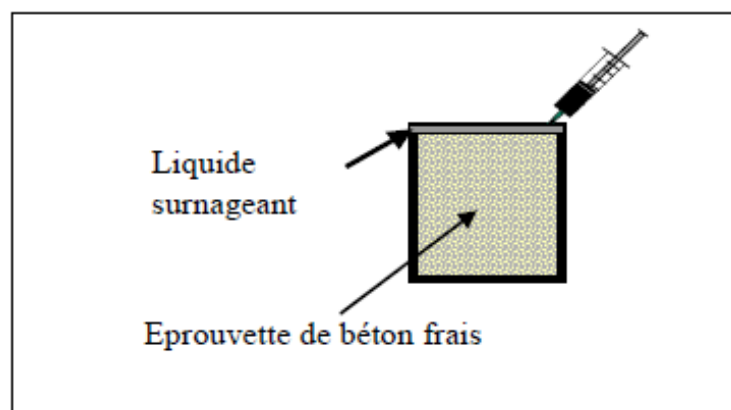


Figure IV.12 : Essai de ressuage.

### • L'essai de colonne

L'intérêt de cet essai réside que l'opération de séparation des différentes couches de béton se fait après la stabilisation complète du système (au moment de fin de prise). Ceci offre une grande facilité à l'opérateur étant donné que le béton ne risque pas de s'écouler. Les erreurs dues aux pertes de matériaux lors des opérations de séparation, de pesage sont donc relativement très minimales.

Les différentes étapes de l'essai proposé sont présentées dans ce qui suit et sont illustrées par la figure IV.13

- le moule utilisé est un cylindre de dimension 110 x 400 mm
- le béton est coulé dans le moule en une seule opération, puis le temps d'attente est proche du temps de fin de prise,
- le moule est séparé en trois parties plus ou moins égales (partie supérieure, partie du milieu et partie inférieure)
- Pour chaque partie, après pesage puis lavage, on détermine le rapport de la masse granulats secs (>5mm) sur la masse totale de la partie considérée,
- Les teneurs en granulats de chaque partie ( $G_{supérieure}$ ,  $G_{milieu}$  et  $G_{inférieure}$ ) sont calculées : c'est le rapport de la masse des granulats secs sur la masse totale de la partie considérée.
- L'indice de ségrégation statique « ISS » est défini comme suit :

$$ISS = (G_{inf} - G_{sup}).100 \quad (2)$$

Avec :

$G_{inf}$  : Teneur en gros granulats dans la partie inférieure,

$G_{sup}$  : Teneur en gros granulats dans la partie supérieure.



Figure IV.13 : L'essai de colonne

## IV.5. Les essais sur BAP à l'état durci

### IV.5.1. Cure et conservation des éprouvettes

Une fois coulées, les échantillons sont couverts avec un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le démoulage est effectué à un jour et les éprouvettes sont ensuite conservées en cure correspondante jusqu'au démarrage des essais respectifs. Les éprouvettes destinées à l'écrasement pour la détermination des propriétés mécaniques sont conservées dans un milieu de 100% d'humidité relative et à une température de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Les échéances de rupture sont : 3, 7, 14, 28, 60 et 90 jours.

### IV.5.2 Le surfaçage au soufre

Le surfaçage au soufre est décrit dans la norme NF P 18-416. Il consiste à munir chaque extrémité de l'éprouvette d'une galette à base de soufre respectant le mélange soufre, porté à une température de  $125^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ , est liquéfié et versé sur une platine dont le fond a été rectifié. L'éprouvette maintenue par le dispositif de guidage est descendue sur le soufre liquéfié. Quand, après refroidissement, le soufre s'est solidifié, l'éprouvette (à laquelle adhère alors la galette de soufre) est désolidarisée de la platine et il a procédé au surfaçage de la deuxième extrémité. Pour les éprouvettes dont la résistance à la compression ne dépasse pas 50Mpa, le surfaçage peut se faire avec un mélange de 60% (en masse) de fleur de soufre et 40% de sable fin de granularité inférieure à 0,5mm (figure IV.14).



Figure IV.14 : Le surfaçage au soufre

### IV.5.3. Essai de la résistance à la compression

Il s'agit de déterminer la contrainte de compression  $f_c$  conduisant à l'écrasement d'une éprouvette de béton. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques 11x22cm et 16x32cm. La résistance à la compression correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (\text{KN/cm}^2) \quad (4)$$

-P : la charge appliquée ;

-S : la surface écrasée de l'éprouvette cylindrique.

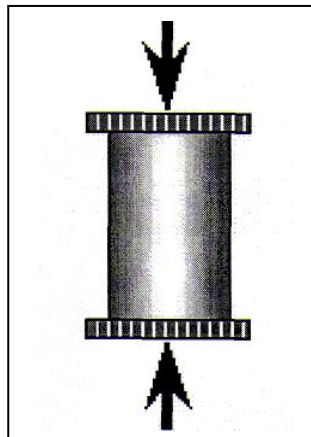


Figure IV.15 : Essai de compression

### IV.5.4. Essai de la résistance à la traction par flexion :

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques 7 x 7 x 28 cm.

La résistance à la traction (par flexion) trois points correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{3pl}{2bh^2} \quad (\text{KN/cm}^2) \quad (5)$$

-P : La charge appliquée ;

-b : Le coté de l'éprouvette prismatique.

-h : hauteur de l'éprouvette prismatique

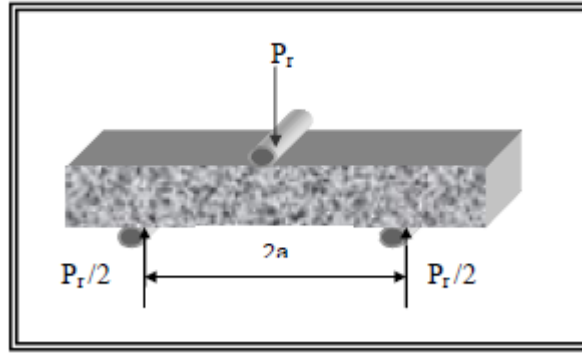


Figure IV.16 : Essais de traction par flexion 3 points

## IV.6. Description des matériaux utilisés :

### IV.6.1. Le ciment :

Selon la norme NFP 15 301, Le ciment utilisé est un CEM I 42.5 (cimenterie de ZAHANA) Les caractéristiques physico-chimiques de ce ciment sont données dans les tableaux IV.1 et IV.2.

Masse volumique apparente ( g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	Surface Blaine ( cm <sup>2</sup> /g)
1.18	3.13	3180

Tableau IV.1 : Caractéristiques phasiques du ciment utilisé.

Element chimiques	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Perte au feu	Insolu- ble
Teneur( %)	22,3	5,10	3,99	63,60	1,43	0,34	0,70	1,24	1,18	0,36

Tableau IV.2 : Composition chimique du ciment utilisé.

La composition minéralogique du clinker est établie selon les formules de Bogue. Les proportions des quatres phases du clinker sont données par le tableau IV.3.

Constituants	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	Régulateur de prise
Pourcentage (%)	63.12	10.52	1.42	17.13	4,00

Tableau IV.3 : Composition minéralogique du clinker selon de Bogue [labo de ZAHANA]

#### IV.6.2 Les granulats

Pour cette étude, nous avons utilisé une composition en granulats, comportant un sable de mer siliceux, provenant de la carrière de Sid Lakhdar (région de Mostaganem) et des granulats concassés calcaires à granulométrie continue, provenant de la carrière de Kristel (région oranaise)

##### Les sables

Pour les bétons autoplaçant le pourcentage des éléments fins est un facteur très important. Donc pour une bonne formulation ; il faudra prendre en considération ce facteur les tableaux (IV.4 et IV.5) et la figure (IV.17) fournissent les propriétés des sables utilisés.

	sable de mer	sable de carrière
La masse volumique apparente Kg/m <sup>3</sup>	1,48	1,5
La masse volumique absolue Kg/m <sup>3</sup>	2,56	2,68
Equivalent de sable moyen(piston) %	83,18	88,96
Equivalent de sable visuel %	87,76	94,48
Essai de propreté %	1	0,75
Taux d'humidité moyen W	0,51	0,80
Pourcentage en éléments fin %	0,33	1
Module de finesse $M_f$	1,64	2,63

Tableau IV.4 : caractéristiques physiques du sable de carrière et de mer

Classe	Sable de mer	sable de carrière
Nature	Siliceux	Calcaire
SiO <sub>2</sub>	75,05	2,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,95	/
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,67	0,13
CaO	10,34	54,58
MgO	0,25	0,14
SO <sub>3</sub>	0,065	nul
K <sub>2</sub> O	0,13	nul
Cl	/	nul
Perte au feu	10,26	43,32
Total	99,58	100,23
Matière organique	/	/
Eau de combinaison H <sub>2</sub> O	0,87	0,32
Carbonate	25,49	97,13
Na <sub>2</sub> O	0,23	nul

Tableau IV.5 : caractéristiques chimiques du sable de mer et de carrière

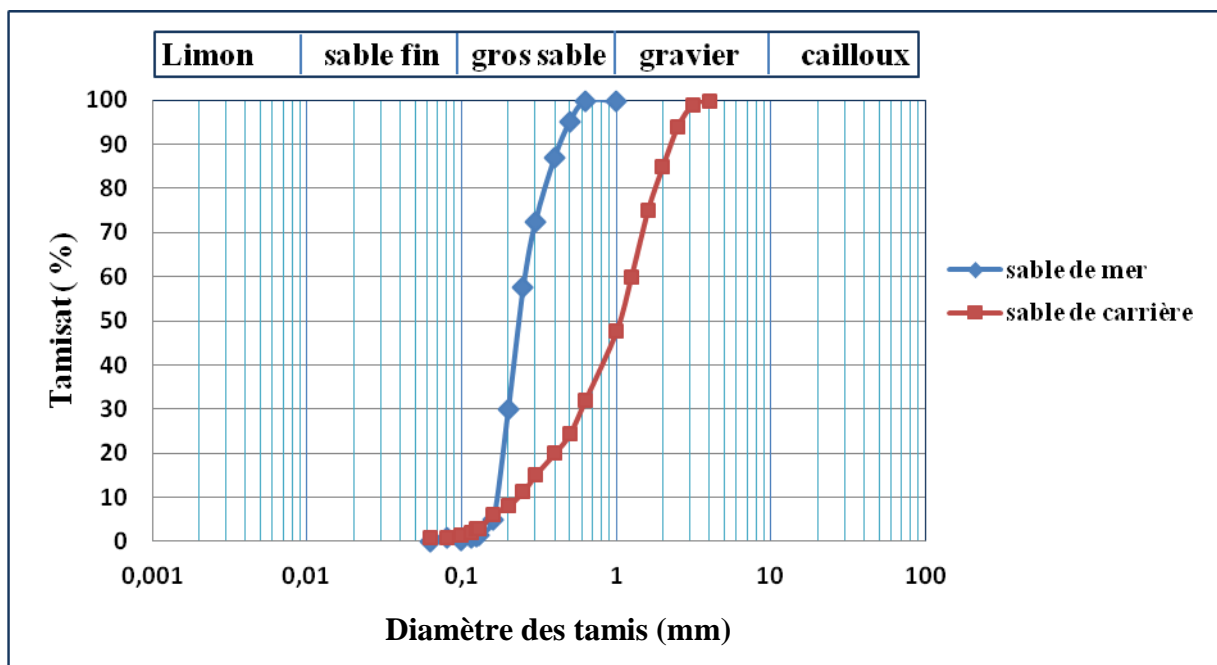


Figure IV.17 : Courbe granulométrique du sable de mer et de carrière

## Les gravillons

Le dosage des granulats et leurs propriétés peuvent avoir une influence sur les propriétés d'ouvrabilité des bétons. Pour obtenir un béton autoplaçant, le volume du gravier et la taille maximale des granulats ont été réduits pour réduire les frictions et éviter les blocages dans les zones confinées. Les tableaux IV.6 et IV.7 et la figure IV.18 donnent les caractéristiques des gravillons pour l'ensemble de nos compositions.

Classe	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Nature	Calcaire	Calcaire
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,66	2,66
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,46
Taux d'humidité moyen W %	0,86	0,40

Tableau IV.6 : caractéristiques physiques des différents gravillons

Classe	Gravier 3/8 et 8/15
Nature	Calcaire
SiO <sub>2</sub>	2,06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	/
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13
CaO	54,58
MgO	0,14
SO <sub>3</sub>	nul
K <sub>2</sub> O	nul
Cl	nul
Perte au feu	43,32
Total	100,23
Matière organique	/
Eau de combinaison H <sub>2</sub> O	0,32
Carbonate	97,13
Na <sub>2</sub> O	nul

Tableau IV.7 : caractéristiques chimiques des différents gravillons

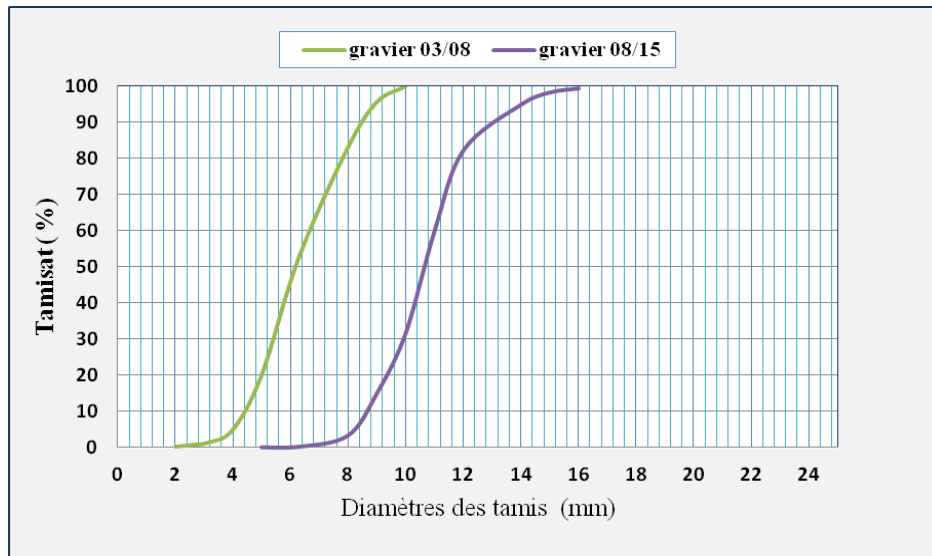


Figure IV.18 : Courbe granulométrique des graviers 3/8 et 8/15.

#### IV.6.3 Additions utilisés (vases) :

Dans notre étude nous avons utilisé deux vases fluviales une est prise du barrage Fergoug et l'autre du barrage Chorfa, les deux barrages se situent au niveau de la wilaya de Mascara dans l'ouest Algérien. Le prélèvement des échantillons a été en aval des barrages dans les zones de rejet (figure IV.19). Après prélèvement les échantillons ont été conservés dans des sacs en plastiques (figure IV.20).



Figure IV.19 : Prélèvement de la vase



Figure IV.20 : Conservation de la vase  
Après prélèvement

### IV.6.3.1. Préparation de la vase : séchage et broyage

- **Séchage et broyage**

Nous avons tout d'abord procédé à étuvage des deux vases à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et de faciliter son broyage (figure IV.21). Ensuite après concassage ces vases ont été totalement broyées (figure IV.22).



Figure IV.21 : Etuve de séchage



Figure IV.22: Le broyeur

Après le broyage la vase a été tamisée dans un tamis de 80  $\mu\text{m}$  (figure IV.23 et IV.24)



Figure IV.23 : Tamisage électrique après calcination



Figure IV.24 : Vase obtenue après tamisage

- **Calcination :**

La calcination est un traitement thermique .L'objectif de la calcination est de rendre les matériaux réactifs par déshydroxylation (pouzzolane artificielle). Nous avons menés cette calcination à une température de 750°C. Le dispositif de calcination utilise est un four

électrique de laboratoire (figure IV.25 et IV.26). Les échantillons sont calcinés une calcination lente dite à lit fixe, elle est maintenue pour une durée de 6 heures.



Figure IV.25 : Le four utilisé



Figure IV.26: Calcination de la vase

Après calcination la vase doit être conservée dans des sac en plastique et protégée contre l'humidité (figure IV.27).



Figure IV.27 : Vase après calcination (produit final)

#### **IV.6.3.2. Caractéristiques des vases après calcination :**

Les compositions chimiques des vases calcinées ont été effectuées au laboratoire L.T.P.O. Les résultats d'analyse sont représentés dans le tableau IV.8.

Caractéristiques	Symbole	Teneur	
		Vase Fergoug	Vase Chorfa
Silice	SiO <sub>2</sub>	55,59	55.34
chaux	CaO	14.15	13.82
Magnésie	MgO	3.08	2.67
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.49	15.75
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.5	7.43
Sulfates	SO <sub>3</sub>	0.23	0.17
Perte à feu		1.87	1.76
Total		100.21	100.28
Carbonates		30,00	22.73
	CaCO <sub>3</sub>	22.5	23.5
Eau de combinaison	H <sub>2</sub> O	5,71	0.87
Anhydres carbonique	CO <sub>2</sub>	0.24	2.04

Tableau IV.8 : caractéristiques chimiques des différentes vases Fergoug et Chorfa

Le tableau IV.9 récapitule les différents résultats de la caractérisation physique des deux vases calcinées.

Essai	Vase calcinée	
	Vase Fergoug	Vase Chorfa
Masse volumique apparente g /cm <sup>3</sup>	0.51	0.57
Masse volumique absolue g/cm <sup>3</sup>	2,62	2.65
Finesse cm <sup>2</sup> /g	7964 ,00	7830

Tableau IV.9 : caractéristiques physiques des différentes vases Fergoug et Chorfa

L'analyse granulométrique des deux matériaux a été effectuée au laboratoire SIBELCO (France) (figure IV.28 et IV.29)

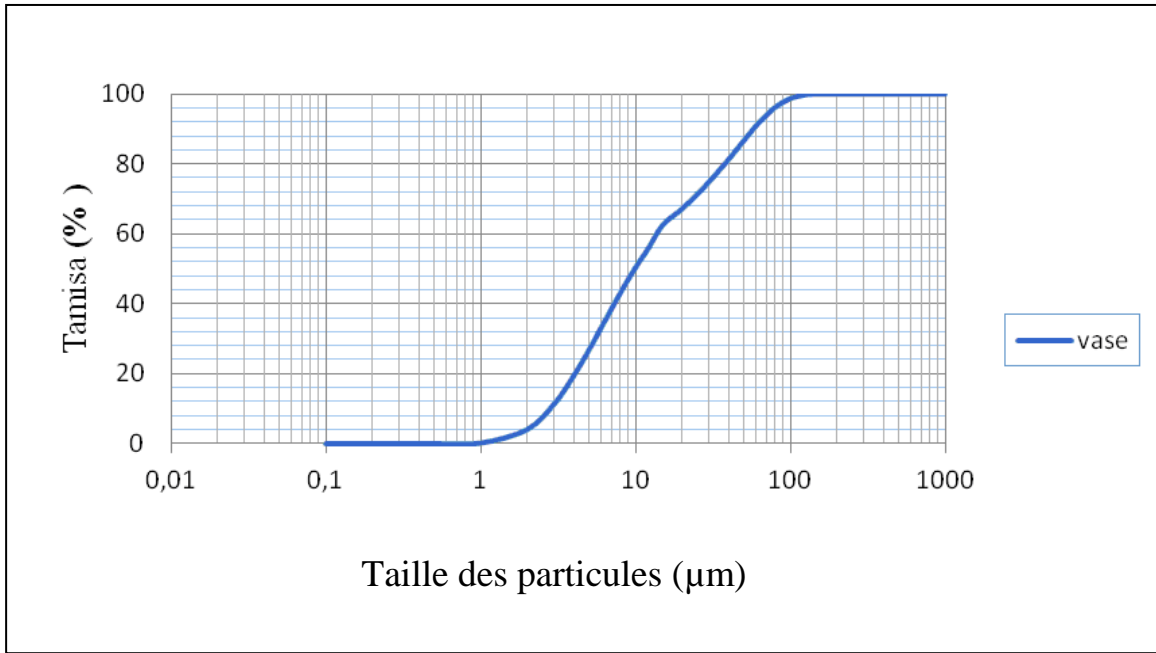


Figure IV.28 : Granulométrie de la vase calcinée de Fergoug [Laboratoire SIBELCO France 2011]

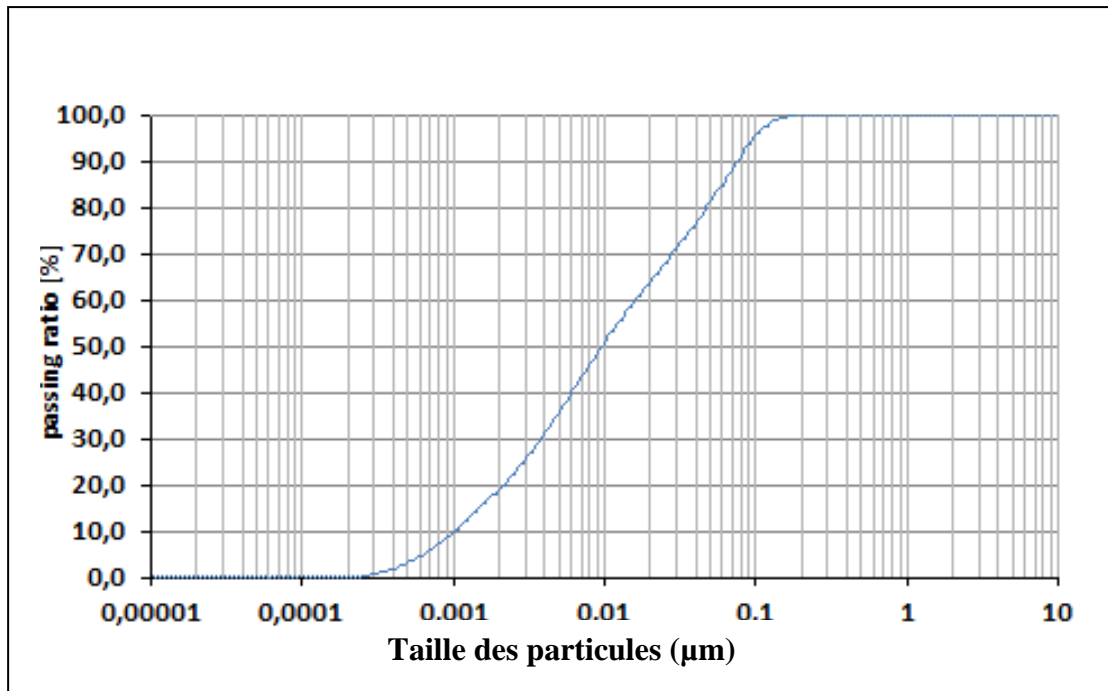


Figure IV.29 : Granulométrie de la vase calcinée de Chorfa [Laboratoire SIBELCO France 2011]

#### IV.6.4. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est le MEDAFLOW 113 c'est un superplastifiant haut réducteur d'eau formulé à base de polymères de synthèse combinés qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 113 permet :

- d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité avec un long maintien d'ouvrabilité.
- de faciliter la mise en œuvre du béton et éviter la ségrégation.
- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

Les caractéristiques de ce superplastifiant sont données par le tableau IV.10.

Nature	Fluidifiant et viscosant
PH	6.5 - 7.5
Densité	1,12 ± 0,02
Teneur en chlore	< 0.1%
Extrait sec	36%±1
Masse volumique	1120 kg/cm <sup>3</sup>

Tableau. IV.10 : Caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW 113

#### IV.6.5. L'eau :

Nous avons utilisé dans notre recherche l'eau potable du robinet de la ville de Mostaganem. Aucune analyse chimique n'a été réalisée sur cette eau puisqu'elle est propre à la consommation.

#### IV.7. Formulation des mortiers normalisés :

Dans le but de calculer l'indice d'activité pouzzolanique des essais de compression ont été fait sur des éprouvettes des mortiers normalisés à bases des vases calcinés comparés à un mortier témoin

Les mortiers ont été formulés selon la norme NEF15-403. Les composition de ces mortiers sont résumées dans le tableau IV.11

Constituants	Sans remplacement du sable	Remplacement partiel du sable	
		Vase de fergoug	Vase de chorfa
Ciment (g)	450	352.5	352
Eau (g)	225	225	225
Sable (g)	1350	1350	1350
Vases calcinées (g)	0	97.5	98

Tableau IV.11 : la formulation des mortiers prismatiques (4x4x16)

Les moules contenant les spécimens ont été couverts de film de plastique et stockés dans l'environnement du laboratoire. Démoulés à 24 heures, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau potable à 20°C, après 90, elles ont subies les tests suivants :

- Essais de résistance mécanique à la compression selon la norme NF-P-15-401.
- Essais de résistance mécanique à la flexion selon la norme NF-P-15-405.

Pour les essais sur mortiers, les notations suivantes ont été adoptées (figure IV.30)

- MR : mortier de référence.
- MVF : mortier avec 25% de vase de Fergoug.
- MVC : mortier avec 25% de vase de Chorfa.



Figure IV.30 : Les mortiers normalisés après démoulage

#### IV.8. Méthode de formulation des BAP :

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions de BAP testées dans cette étude expérimentale est prise d'une formule d'un BAP à base de fillers calcaires qui a été formulé par Bouhamou[2008]. Le principe de cette formule se base essentiellement sur la fixation d'un volume de pâte  $\approx 37,5 \%$  soit  $375,00 \text{ l/m}^3$ , rapport E/L  $\approx 0,5$  et G/S proche de 1. Une légère différence est à signaler dans la composition initiale, il été question d'une substitution du ciment par des filler calcaire dans la notre la substitution sera la vase calcinée avec des pourcentages variant entre 10, 15 et 20 %.

La formulation du BAP doit répondre aux critères de résistance mécanique (fixés ou désirés) choisis à partir de la formule de Bolomey (voir équation6).

$$f'c = Rc \cdot G [LEquiv / (Eeff + Air) - 0,5] \quad (6)$$

où  $f'c$  : résistance à la compression du béton (en MPa),

$Rc$  : résistance à la compression du ciment (en MPa),

$LEquiv$  : ciment + k . additions minérales (en kg),

$Eeff$  : quantité d'eau efficace (en litre  $\leq 200$  litres),

$Air$  : volume d'air (en litre),

$G$  : coefficient granulaire.

Le volume de pâte doit favoriser l'écoulement du béton tout en réduisant le coût en matières premières de cette formulation.

Pour cela, le volume de pâte (eau efficace + air occlus + ciment + additions + adjuvant + fines des granulats de dimension inférieure à  $80 \mu\text{m}$ ) est fixé à **375 litres**.

L'eau efficace correspond à l'eau totale théorique (eau de gâchage + eau apportée par les granulats + eau apportée par les adjuvants) à laquelle on soustrait l'eau absorbée par les granulats.

Le dosage en adjuvant (superplastifiant et viscosifiant) est calculé afin de limiter la ségrégation et le ressuage. Ce dosage est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur bétons frais pour lequel l'étalement doit être compris entre 60 et 75 cm.

L'optimisation de la constitution doit réduire la ségrégation et favoriser l'écoulement. Pour cela et afin de sélectionner une combinaison adéquate de granulats qui améliore la maniabilité et la déformabilité du béton autoplaçant, plusieurs proportions ont été considérées tout en gardant un rapport G/S proche de 1.

#### **IV.9. Notation des BAP**

Dans cette étude cinq bétons ont été formulés, les notations suivantes ont été adoptées :

- Un béton autoplaçant témoin BAPT sans substitution partiel avec la vase.
- Trois bétons autoplaçant BAPVF10, BAPVF15 et BAPVF20 avec substitution partiel de 10, 15 et 20% de la vase de Fergoug.
- Trois bétons autoplaçant BAPVC10, BAPVC15 et BAPVC20 avec substitution partiel de 10, 15 et 20% de la vase de Chorfa.

#### **IV.10. La mise en œuvre**

Les bétons autoplaçants ont été confectionnés selon les recommandations actuelles de l'AFGC [AFGC, 2000].

L'ordre d'introduction des composants et les séquences de malaxage sont les suivants :

- a. introduction des éléments secs (graviers, sable, ciment, vase) et malaxage pendant 1 minute.
- b. introduction du 1/3 l'eau et poursuite du malaxage pendant 2 minute.
- c. Introduction du superplastifiant dilué dans 2/3 eau de gâchage et malaxage 1 mn

Les séquences du malaxage sont comme suit :

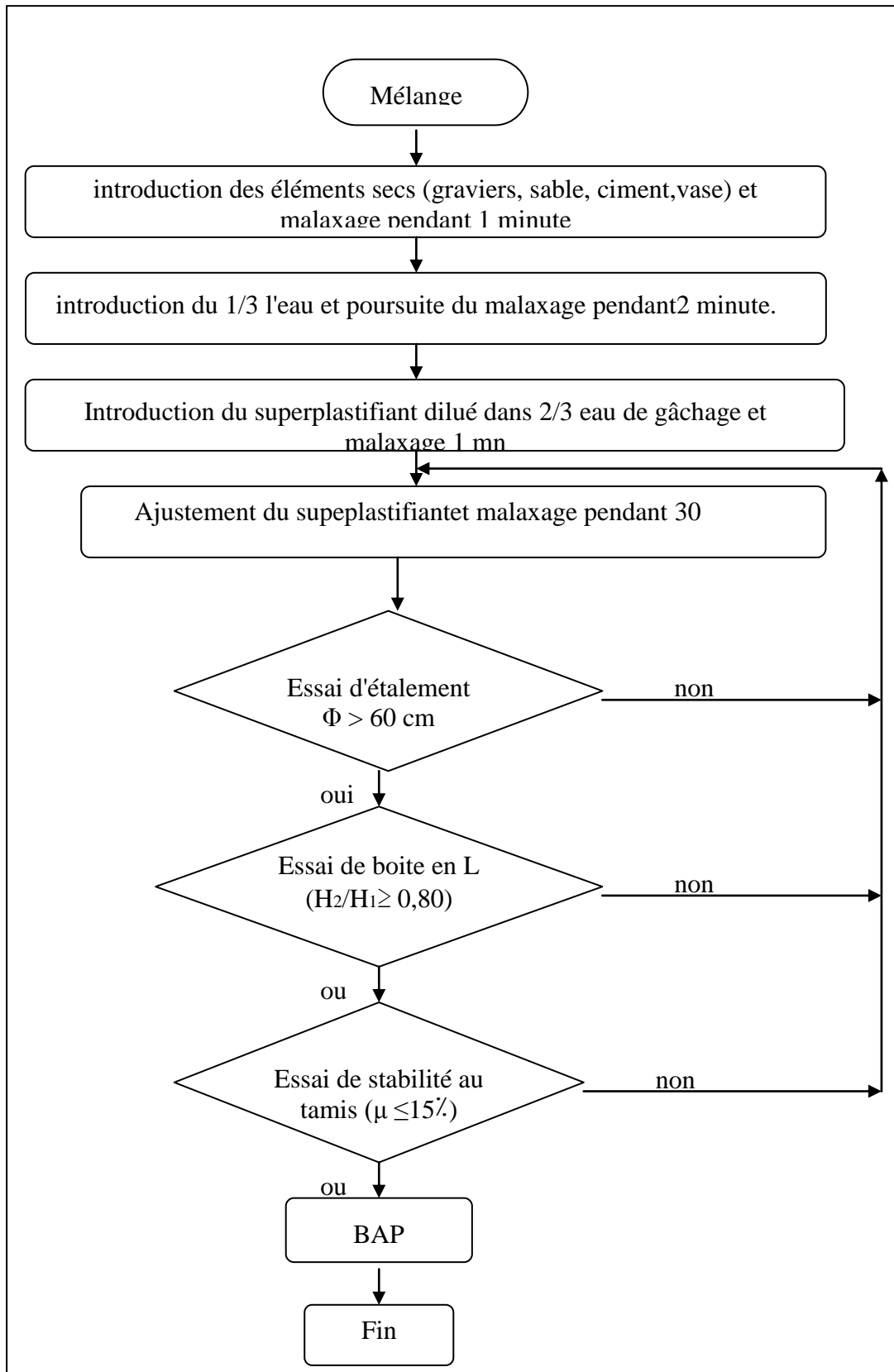


Figure IV.31 : Organigramme des séquences de malaxage des BAP

Les différentes formulations des BAP testées sont présentées dans les tableaux IV.12 et IV.13.

<b>Composition (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>BAPT</b>	<b>BAPVF 10</b>	<b>BAPVF15</b>	<b>BAPVF20</b>
Sable de mer	560	560	560	560
Sable de carrière	251	251	251	251
Gravier 3/8	333	333	333	333
Gravier 8/15	499	499	499	499
Ciment	450	420	408	395
Vase calcinée	---	35	52	66
Eau	225	218	216	213
Superplastifiant	5,7 (1,35 %)	7,5 (1,9 %)	8,3 (2,10 %)	9,8(2,30%)
E/L (C+K*A)	0,50	0,50	0,50	0,50
G/S	1,02	1,02	1,02	1,02
Volume pâte	374,99	374,99	374,99	374,99

Tableau IV.12 : la formulation des bétons autoplaçants à base du vase de Fergoug

<b>Composition (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>BAPT</b>	<b>BAPVC 10</b>	<b>BAPVC15</b>	<b>BAPVC20</b>
Sable de mer	560	560	560	560
Sable de carrière	251	251	251	251
Gravier 3/8	333	333	333	333
Gravier 8/15	499	499	499	499
Ciment	450	412	396.73	381
Vase calcinée	---	34.9	50.75	65.15
Eau	225	222	221	219.3
Superplastifiant	5,7 ( 1,35 % )	7.52 (1.9%)	8.282 (2.2 %)	9.06 ( 2,30% )
E/L ( C+K*A)	0,50	0,50	0,50	0,50
G/S	1,02	1,02	1,02	1,02
Volume pâte	374,99	374,99	374,99	374,99

Tableau IV.13 : la formulation des bétons autoplaçants à base du vase de Chorfa

## Chapitre V : Analyse et interprétation des résultats

### V.1. Introduction

Après avoir vu dans le chapitre précédent les caractéristiques principales des matériaux entrant dans la constitution des bétons ainsi que les méthodes d'essais, nous nous proposons dans ce chapitre de présenter les résultats aux essais sur nos bétons autoplaçants confectionnés en vue de montrer l'influence des deux vases calcinées (Chorfa et Fergoug) sur l'évolution de leurs propriétés.

### V.2. Essai sur pâte

- **Consistance normale**

Les résultats de l'essai de consistance sont résumés dans le tableau 1

Les constituants	Sans remplacement de ciment	Remplacement partiel de ciment					
		Vase de Fergoug			Vase se Chorfa		
		10%	15%	20%	10%	15%	20%
Ciment (g)	500	457,34	435,7	413,57	457	435	413
Eau (g)	125	131,6	136,8	140,5	134	137.5	142
Vasa (g)	0	42,54	64,30	86,43	43	65	87
Le rapport E/C	0.25	0,263	0,273	0,283	0.268	0.275	0.284
CN (%)	25	26.32	27.36	28.1	26.8	27.5	28.4

TableauV.1 : Consistance normale pour les différentes pâtes.

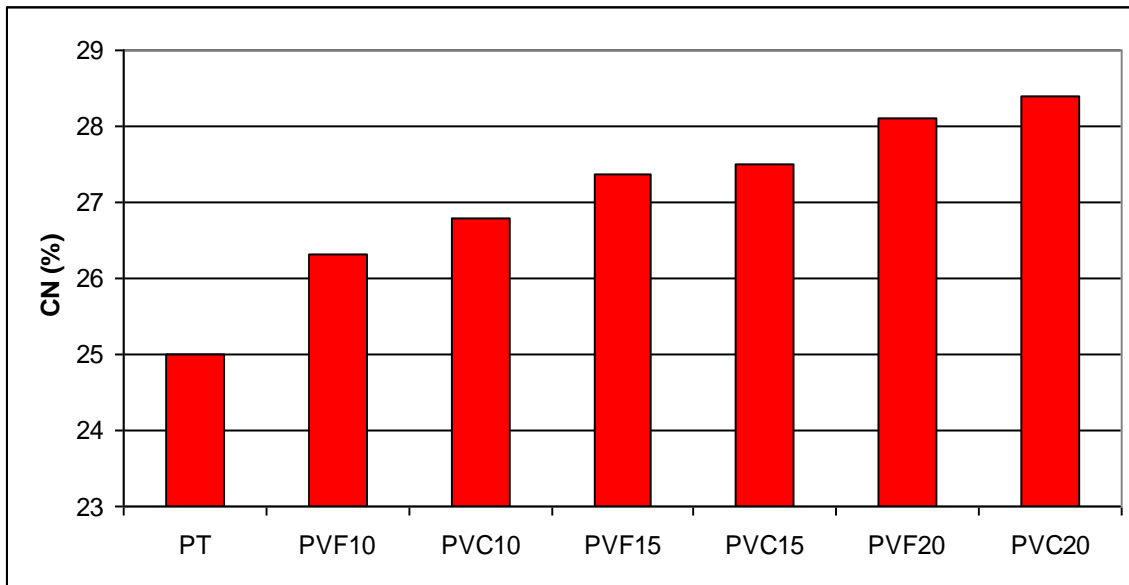


Figure V.1 : Variation de la valeur de la consistance normale des différentes pâtes de ciment .

Les résultats du (tableau V.1), montrent que la consistance normale des pâtes de ciment avec remplacement partiel par les sédiments traités (vase Fergoug et Chorfa) est plus importante par rapport a celle de la pâte témoin (sans remplacement partiel par les vases).

Il est à noter que le volume d'eau demandé par la pâte de ciment pour avoir une consistance normal augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

On remarque que la consistance normale des pâtes à base de la vase de Chorfa est plus importante que celle de la pate contenant la vase de Fergoug pour tous les pourcentages (figure V.1).

D'après Benia [2007] la demande en eau croît proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture du fine (ciment ou vases), ceci est dû d'une part à l'augmentation de la surface totale des grains qu'il faut mouiller et d'autre part à la diminution du poids spécifique (porosité élevée).

• **Début et fin de prise**

Le temps de début et fin de prise des différentes pâtes de ciment sont présentés dans le tableau V.2.

Les constituants	Pâte témoin	Remplacement partiel de ciment					
		Vase de Fergoug			Vase se Chorfa		
		10%	15%	20%	10%	15%	20%
Début de prise	2 h 57 mn	2h 55mn	2h45 mn	2h35mn	2h50 mn	2h34 mn	2 h29 mn
Fin de prise	4 h 12 mn	3h 57mn	3h43mn	3h17mn	3h50 mn	3h27mn	3h13 mn
Temps de prise	1 h15 mn	1h 02 mn	58 mn	47 mn	1 h	53 mn	44 mn

Tableau V. 2 : Temps de prise pour les différentes pâtes.

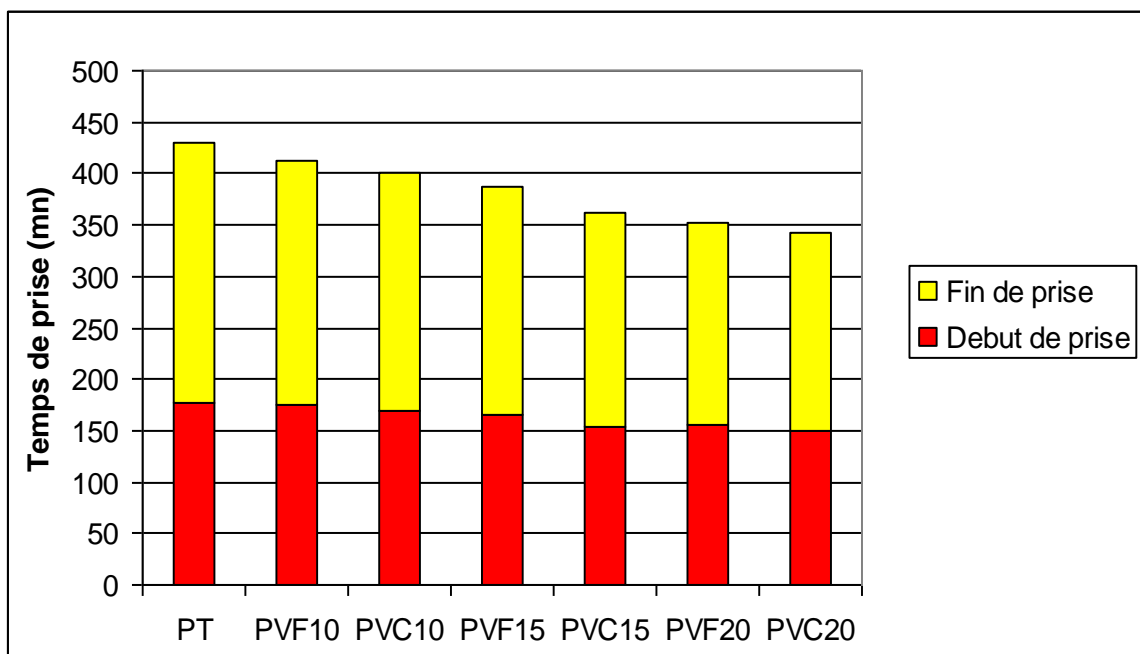


Figure V.2 : Variation du temps de prise des différentes pâtes de ciment

La figure V.2 montre que le temps de prise diminue avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout des vases dans les pâtes de ciment.

En effet le temps de prise des pâtes de ciment avec remplacement partiel de la vase de Chorfa est moins important que celui de la

pâte avec à base de la vase de Fergoug.

Les temps de début et de fin de prise diminuent proportionnellement avec l'augmentation de la finesse de mouture de ciment et vase, cela s'explique par le fait que la réaction pouzzolanique est accélérée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus rapide en fonction de l'augmentation de la finesse. Par conséquent les cristaux de CSH (responsables du durcissement de la pâte) existent en grande quantité aux très jeunes âges [Benia 2007].

### V. 3. Essai sur mortier :

Les résultats des résistances mécaniques à la compression et à la traction à 28 jours réalisées sur des différents mortiers normalisés (témoin et avec substitution de la vase) sont donnés dans le tableau V.3 :

	Mortier sans vase		Mortier avec vase			
			vase Fergoug		vase Chorfa	
	compression	traction	compression	traction	compression	traction
Résistances mécaniques à 28 j (MPa)	47,4	7,50	39,20	6,4	45.83	7.20

Tableau V. 3 : Résistances mécaniques des différents mortiers.

Calcul de coefficient d'activité K :

On a :

$$K = 1 - 1/p [ ( 1 - 0,5 E/C)(1 - i ) ]$$

$$\text{Avec } i = R_{c28p} / R_{c28}$$

	Coefficient d'activité i	coefficient d'activité K
vase Fergoug	0,82	0.47

vase Chorfa	0.967	0.9
-------------	-------	-----

Tableau V. 4 : indice et coefficient d'activité des deux vases.

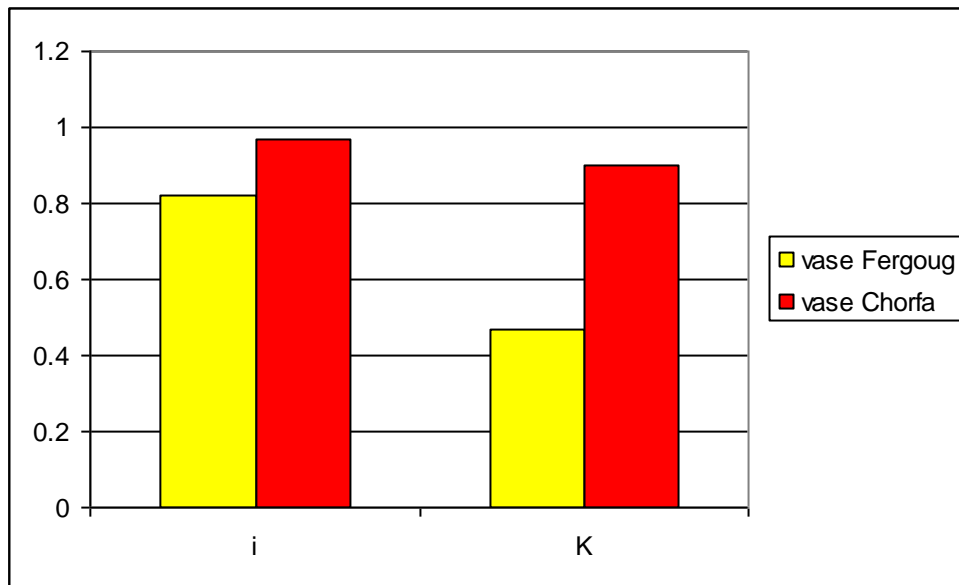
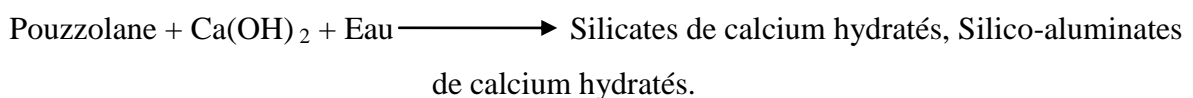


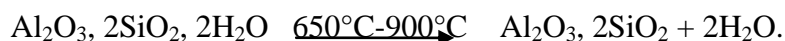
Figure V.3 : Comparaison de l'indice et coefficient d'activité des deux vases

La réaction pouzzolanique est une réaction de dissolution précipitation en milieu aqueux entre l'hydroxyde de calcium et un matériau pouzzolanique. Diverses études ont été menées sur l'analyse des différents produits de réaction d'un mélange métakaolin, hydroxyde de calcium et eau, les composés majoritairement présents sont la gélinitte hydratée, des Aluminates tétra calciques hydratés et des silicates de calcium hydratés.

La réaction pouzzolanique peut se résumer comme suit :



Le traitement thermique entraîne donc le passage d'une phase cristallisée et ordonnée (kaolinite) en une phase désordonnée (metakaolinite) par un effondrement du réseau cristallin. La transformation du kaolin par calcination au métakaolin s'effectue selon l'équation :



D'après le tableau V.4 et de la figure V.3, on remarque que l'indice d'activité et le coefficient d'activité pour la vase de Chorfa sont plus élevés par rapport à ceux de la vase de Fergoug. Ceci est due peut être à la composition chimique des deux vases.

Les résultats obtenus montrent que la vase Chorfa est plus active par rapport à celle de Fergoug.

#### V.4. Essai sur béton

##### V.4.1. Etat frais

Les résultats des essais réalisés sur les BAP à l'état frais sont résumés dans les tableaux 5 et 6

		BAPT	BAPVF10	BAPVF15	BAPVF20
Etalement	Φ (cm)	68	66	65	63
	T50 (s)	3.8	3.7	3.5	3.1
Boite en L	H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	0.89	0.87	0.84	0.82
	T40 (s)	4.3	3.6	3.1	3.4
Stabilité au tamis (%)		9.6	7.2	8.5	9.2
Colonne [Teneur en gravier (%)<5 mm par rapport à la section basse]	Haute (%)	85.02	95.61	92.28	89.37
	Medianne (%)	95	97.31	96.45	88.18
	Basse (%)	100	100	100	100
Essai de ressuage (‰)		1.3	1.42	1.16	1.26

Tableau V. 5 : Résultats à l'état frais des différents BAP à base de vase Fergoug

		BAPT	BAPVC10	BAPVC15	BAPVC20
Etalement	Φ (cm)	68	65	63	62
	T50 (s)	3.8	3.6	3.1	3
Boite en L	H <sub>1</sub> /H <sub>2</sub>	0.89	0.86	0.83	0.82
	T40 (s)	4.3	4.1	3.6	3.9
Stabilité au tamis (%)		9.6	8.2	7.55	8.7
Colonne [Teneur en gravier (%)<5 mm par rapport à la section basse]	Haute (%)	85.02	95.55	93.17	87.55
	Medianne (%)	95	96.8	95.69	94.70
	Basse (%)	100	100	100	100
Essai de ressuage (‰)		1.12	1.45	1.35	1.5

Tableau V. 6 : Résultats à l'état frais des différents BAP à base de vase Chorfa.

La caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais recommandés par l'AFGC [2000] : étalement au cône, écoulement à la boîte en L, stabilité au tamis, ressuage et l'essai de colonne.

#### **a. L'essai d'étalement**

Nous pouvons constater que l'ensemble des BAP respecte le critère d'étalement. L'étalement spécifié était compris entre 62 et 68 cm.

Bien qu'une limite ne soit donnée pour les temps d'étalement, les temps mesurés pour atteindre une galette de 50 cm de diamètre ( $t_{50}$ ) sont proches des valeurs couramment rencontrées (3 secondes).

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants :

- Les bords de la galette donnent une indication sur le ressuage.
- On peut noter la forme plus au moins bombée de la galette et l'homogénéité du béton.

Pour toutes les compositions de BAP, l'auréole de laitance au périphérique des galettes de Béton était absente ou très faible (de 1 à 2 mm). De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

#### **b. L'essai de la boîte en L**

Les résultats des tableaux V.5 et V.6 sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton autoplaçant. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler puisque tout les BAP présentent des taux de remplissage supérieur à 0.80.

#### **c. Essai au tamis**

L'essai de stabilité au tamis permet de calculer un taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Tous les BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.

#### **d. Essai de la colonne**

L'essai montre que toutes les formulations sans ajout (BAPT) ou avec ajout (BAPV) présentent une homogénéité et une bonne distribution entre leurs constituants. Les résultats obtenus dans les bétons testés montrent une variation légère en % de granulats au niveau des couches supérieures et médianes, évaluée respectivement 3 à 15%.

### e. Essai de ressuage

Un ressuage important est le signe d'une dégradation de la qualité esthétique des parements et de la durabilité. La valeur limite de ressuage doit être  $\leq 3\%$  en volume. Tous nos bétons respectent cette condition.

### f. Masse volumique

La masse volumique sur béton frais permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse théorique. Le tableau V.7 résume les résultats des masses volumiques sur bétons frais

Bétons	BAPT	BAPVF10	BAPVF15	BAPVF20	BAPVC10	BAPVC15	BAPVC20
Masse volumique théorique (kg/m <sup>3</sup> )	2323.7	2323.5	2327.3	2326.8	2319.42	2319.762	2317.51
Masse volumique expérimentale (kg/m <sup>3</sup> )	2358.5	2353.71	2352.9	2347.74	2351.4	2349.8	2347.6

Tableau V.7 : Récapitulatif des masses volumiques en Kg/m<sup>3</sup>.

Les masses volumiques réelles des bétons, mesurées au moment de la gâchée, sont acceptables [Neville 2000].

### g. Etude de la ségrégation

Un autre moyen pour contrôler la ségrégation d'un BAP consiste à scier une ou deux éprouvette (s) de béton durci dans le sens transversal et observer la répartition des granulats dans les trois parties de l'éprouvette : le milieu, le bas et le haut (figure V.4 et V.5).

Ces photographies illustrent bien le fait que les formulations de bétons ici (BAP à base de vase de Fergoug (BAPVF), BAP à base de la vase de Chorfa (BAPVC) et BAP témoin (BAPT)) ne sont effectivement pas sujettes à la ségrégation (statique ou dynamique). Les granulats sont en effet régulièrement répartis sur toute la hauteur des échantillons sciés.

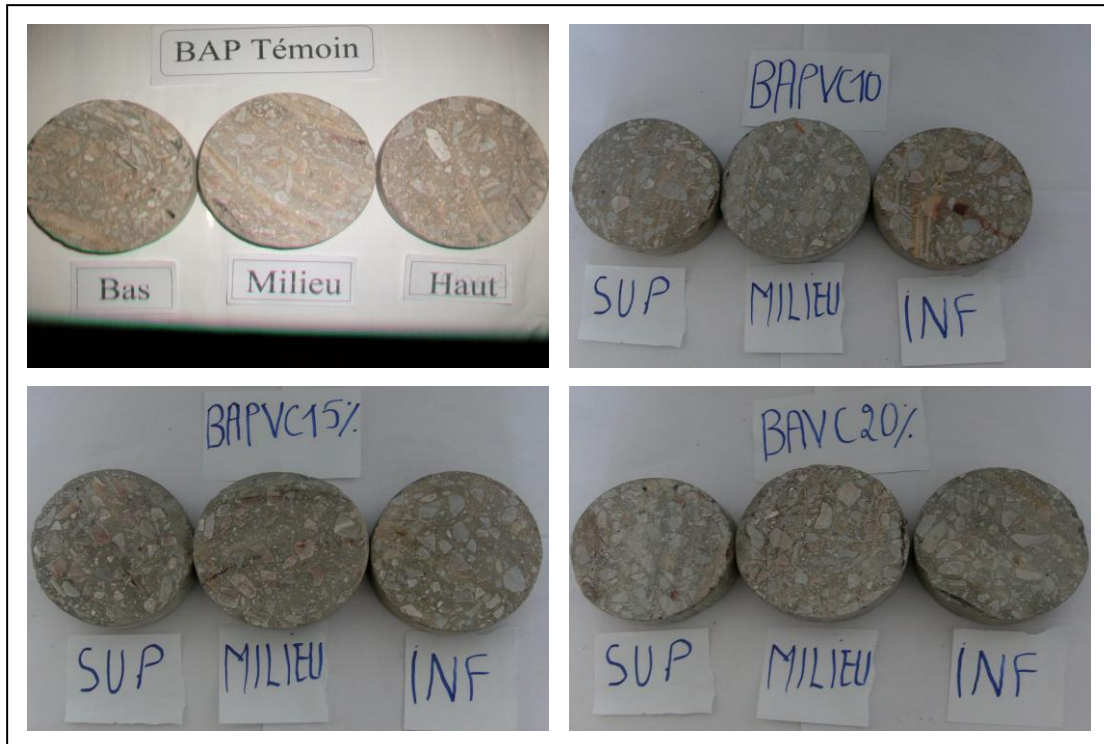


Figure V.4 : Comparaison de la distribution des constituant de béton entre le BAP témoin et le BAP à base de vase Chorfa

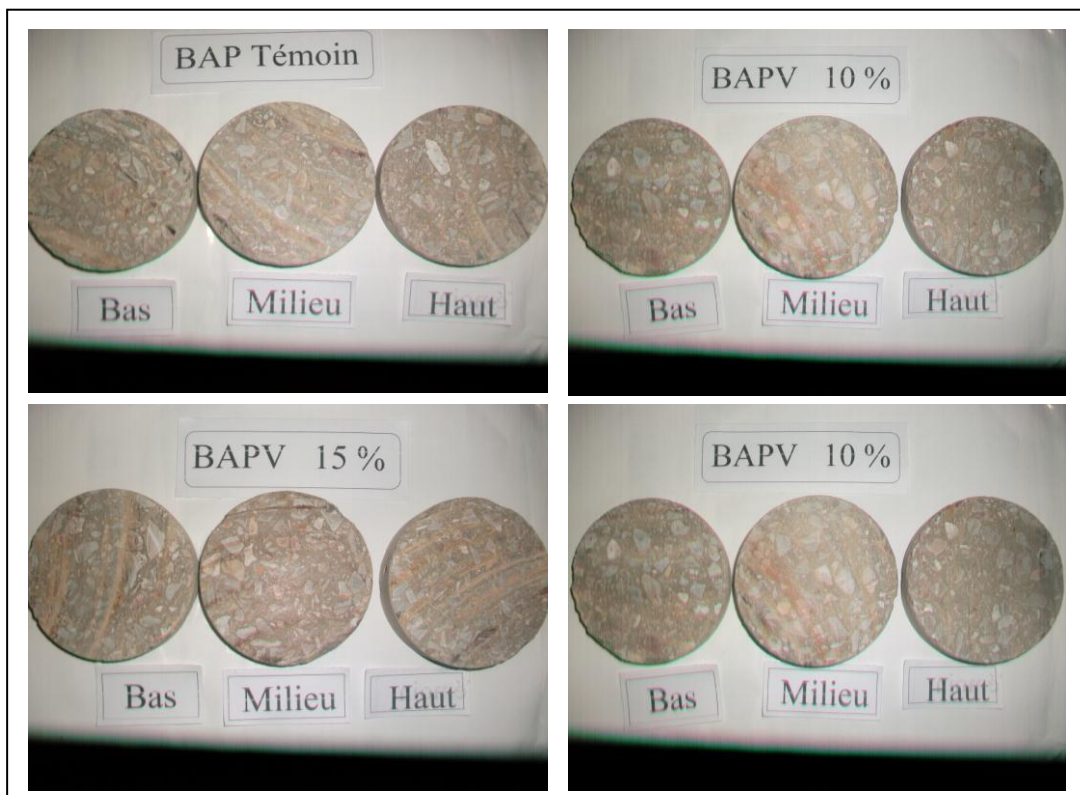


Figure V.5 : Comparaison de la distribution des constituants de béton entre le BAP témoin et le BAP à base de vase Fergoug.

## V.4.2. Etat durci

### V.4.2.1. Résistance à la compression

La résistance mécanique du béton dépend du rapport E/C, de la nature d'addition, du mode de conservation et de l'échéance de l'essai.

Nous présentons les résultats des essais de la résistance à la compression effectués sur des éprouvettes (11x22cm) constituées par les sept BAP. L'approche graphique a été choisie pour faciliter l'analyse des résultats trouvés et aussi pour même suivre l'évolution des résistances au cours du temps.

Les résultats de ces résistances à la compression sont détaillés dans les tableaux (V.8 et V.9) et illustrés par les courbes des figures (V.6, V.7, V.8, et V.9)

	BAPT	BAPVF10	BAPVF15	BAPVF20
3j	21.2	19.2	18.1	16.5
7j	25.5	23.6	22.8	21.9
14j	35.9	33.5	31.5	30.8
28j	44	40.8	35.2	33.9
60j	47.8	42.1	38.4	35.8
90j	49.1	45.6	40.9	37.1

Tableau V.8 : Résultats résistance à la compression des différents BAP à base de vase Fergoug (MPa).

	BAPT	BAPVC10	BAPVC15	BAPVC20
0 j	0	0	0	0
3 j	21.2	20.5	19.1	17.6
7 j	25.5	24.1	23.5	22.1
14 j	35.9	34.6	33.9	32.4
28 j	44	42.2	37.6	34.5
60 j	47.8	45.5	40.6	37.2
90 j	49.1	48.5	42.9	39.8

Tableau V.9 : Résultats résistance à la compression des différents BAP à base de vase Chorfa (MPa).

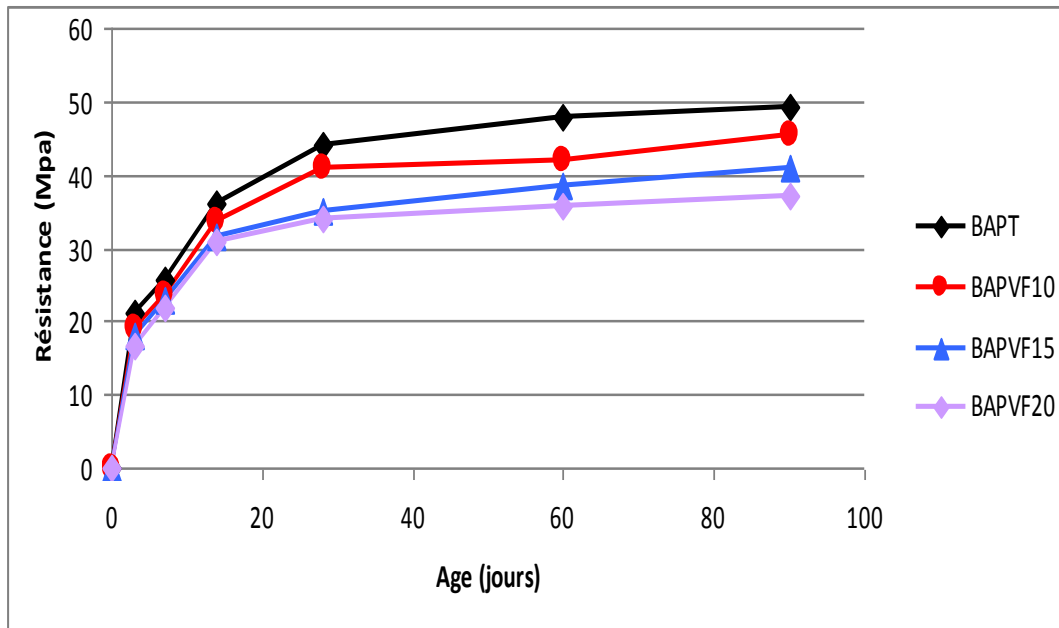


Figure V.6 : Evolution de la Résistance a la compression des différents BAP à base de vase Fergoug.

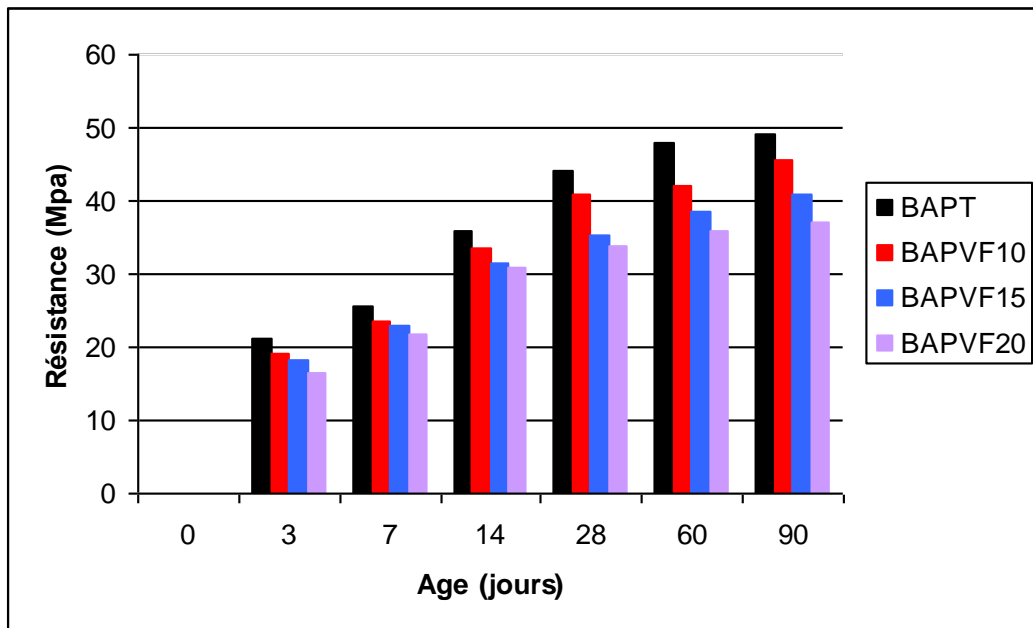


Figure V.7 : Résistance a la compression des différents BAP à base de vase Fergoug

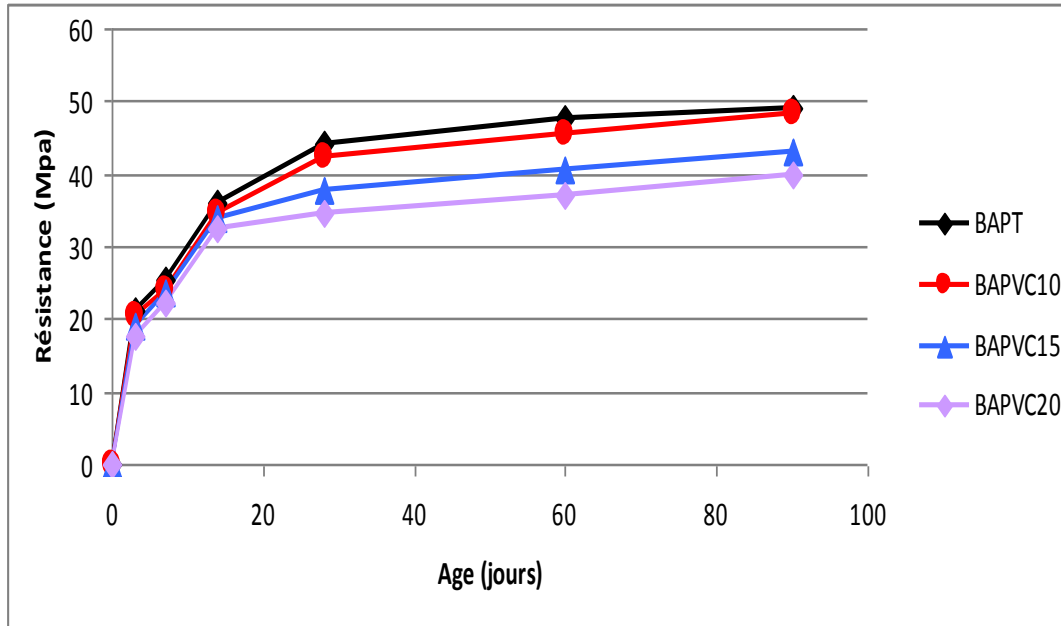


Figure V. 8 : Evolution de la Résistance a la compression des différents BAP à base de vase Chorfa

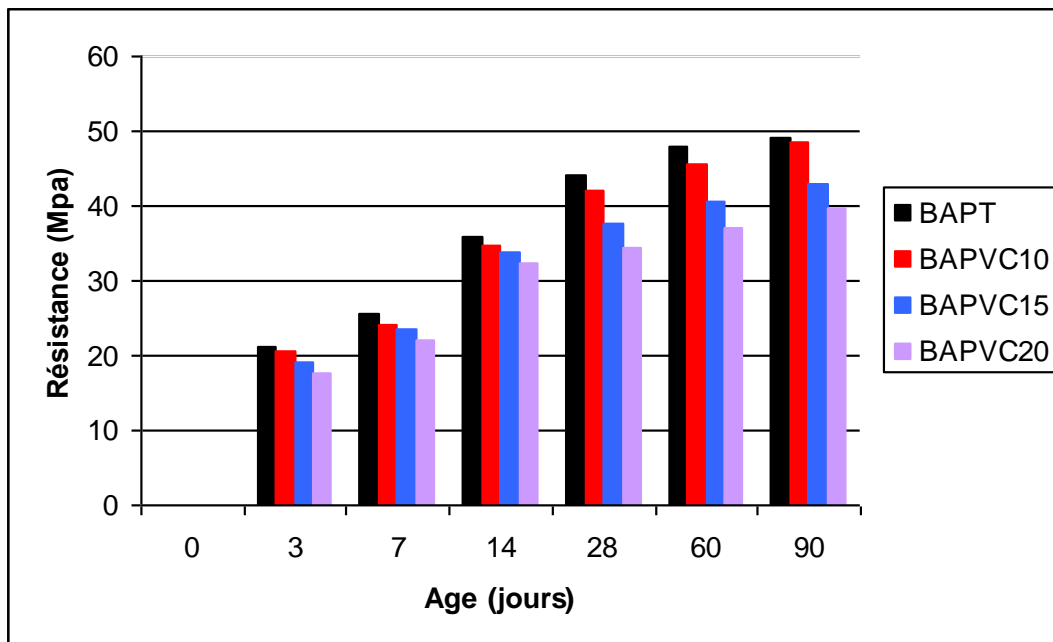


Figure V. 9: Résistance a la compression des différents BAP à base de vase Chorfa

Nous remarquons d'après les figures V.6 et V.8 une augmentation continue de la résistance à la compression pour les différents BAP, en fonction de l'âge (3, 7, 14, 28, 60 et 90 jours). Cette augmentation est due à l'hydratation du ciment au cours du temps ce qui provoque l'évolution de la compacité.

On remarque aussi une diminution de la résistance mécanique lorsque le pourcentage de la vase substitué dans les BAP. Le BAP témoin (sans ajout de vase) présente la valeur maximale de la résistance, suivi du BAP avec 10% de vase substituée et du BAP avec 15 % de vase. Le BAPV20 qui contient 20% de vase a présenté la plus faible résistance.(figures V.7 et V.9). Cette chute de résistance est due probablement au l'élimination de la quantité de ciment avec un ajout moins actif.

#### **V. 4.2.2. Résistance à la traction par flexion**

Nous rappelons que les résistance à la traction ont été mesurées par l'essai de flexion trois points. Chaque valeur représente la moyenne de trois mesures relatives à trois échantillons. Les résultats sont présentés sur les tableaux 10, 11, et par les courbes des figures 10, 11, 12 et 13.

	BAPT	BAPVF10	BAPVF15	BAPVF20
0j	0	0	0	0
3j	4.2	3.6	3.3	3.15
7j	6.5	5.9	5.68	5.4
14j	7.05	6.48	6.35	5.9
28j	8.5	7.9	7.4	6.8
60j	9.5	8.8	8.4	7.2
90j	10.6	9.6	9.2	8.5

Tableau V. 10 : Résultats résistance à la traction par flexion des différents BAP à base de vase Fergoug(MPa)

	BAPT	BAPVC10	BAPVC15	BAPVC20
0 j	0	0	0	0
3 j	4.2	3.8	3.25	3.18
7 j	6.5	6.2	5.8	5.55
14 j	7.05	6.8	6.5	6.25
28 j	8.5	7.9	7.6	7.1
60 j	9.5	8.9	8.6	7.8
90 j	10.6	10.2	9.9	8.9

Tableau V.11 : Résultats résistance à la traction par flexion des différents BAP à base de vase Chorfa (MPa).

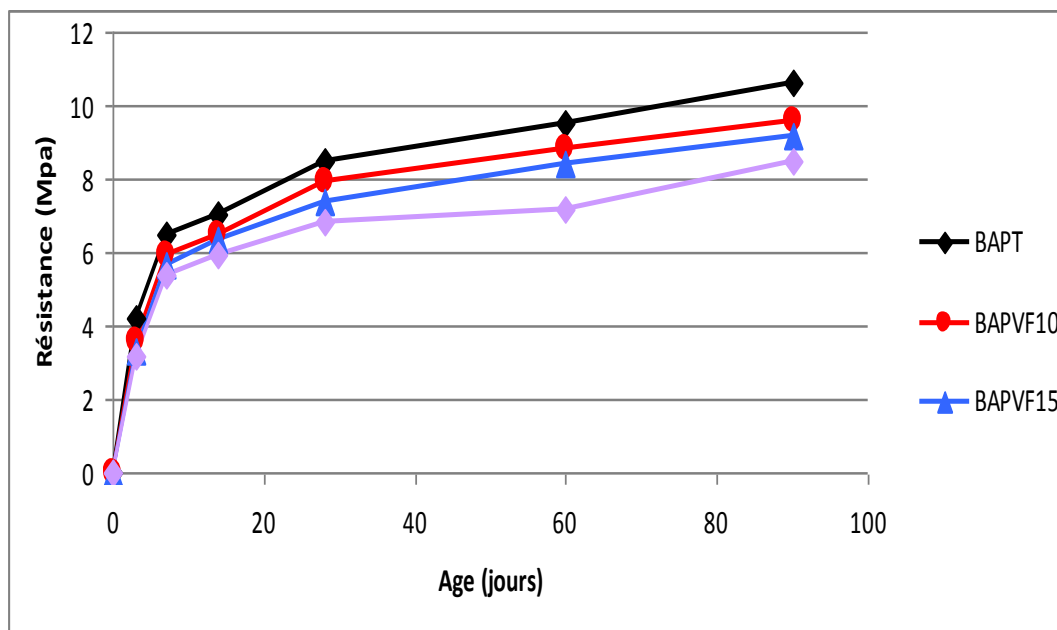


Figure V.10 : Evolution de la Résistance a la traction par flexion des différents BAP à base de vase Fergoug

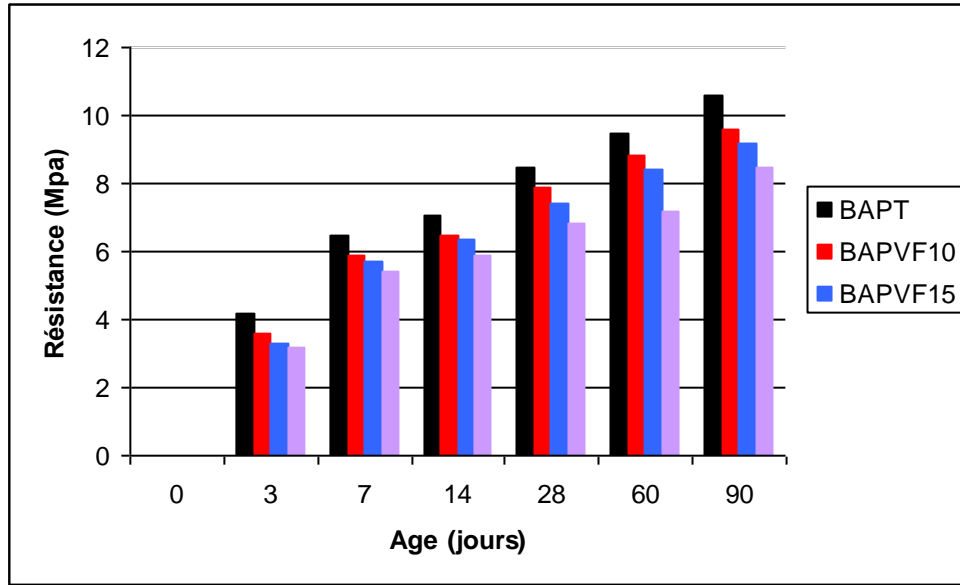


Figure V.11 : Résistance a la traction par flexion des différents BAP à base de vase Fergoug

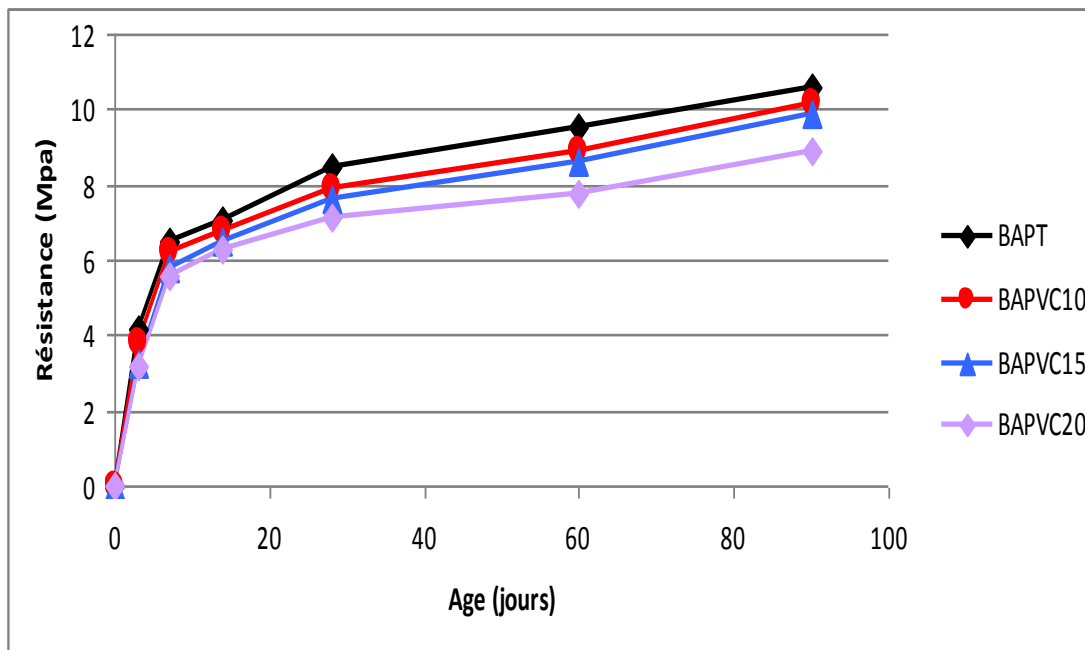


Figure 12 : Evolution de la Résistance a la traction par flexion des différents BAP à base de vase Chorfa

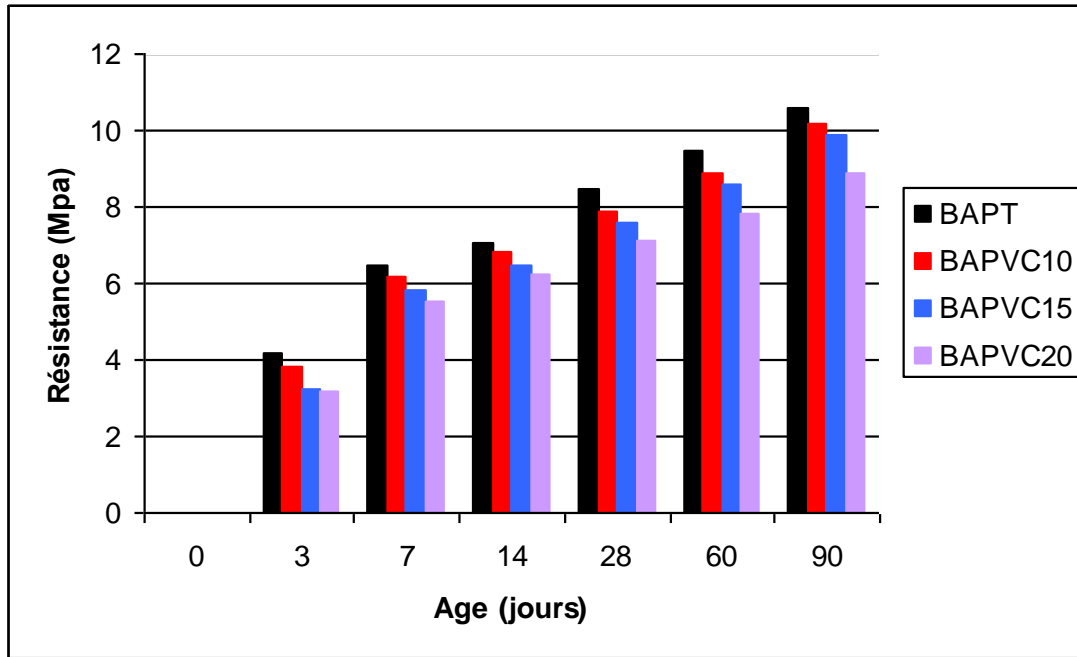


Figure V.13 : Résistance a la traction par flexion des différents BAP à base de vase Chorfa .

Sur les figures V.10 et V.12 on constate que la résistance à la traction augmente avec le temps.

Nous remarquons une diminution des résistances mécaniques à la traction en fonction du pourcentage de vase dans le béton (figures V.11 et V.13). L'évolution de la résistance à la traction enregistrée est influencée par les mêmes facteurs que ceux qui influencent l'évolution de la résistance de la résistance à la compression. Les deux résistances évoluent dans le même sens. Cela confirme l'existence d'une relation liant les deux types de résistance.

#### V.4. 3. Comparaison des résistances à la compression des deux vases

Les figures (V.14) représentent les valeurs de résistance à la compression de chaque pourcentage de substitution des deux vases par rapport à celui de béton témoin

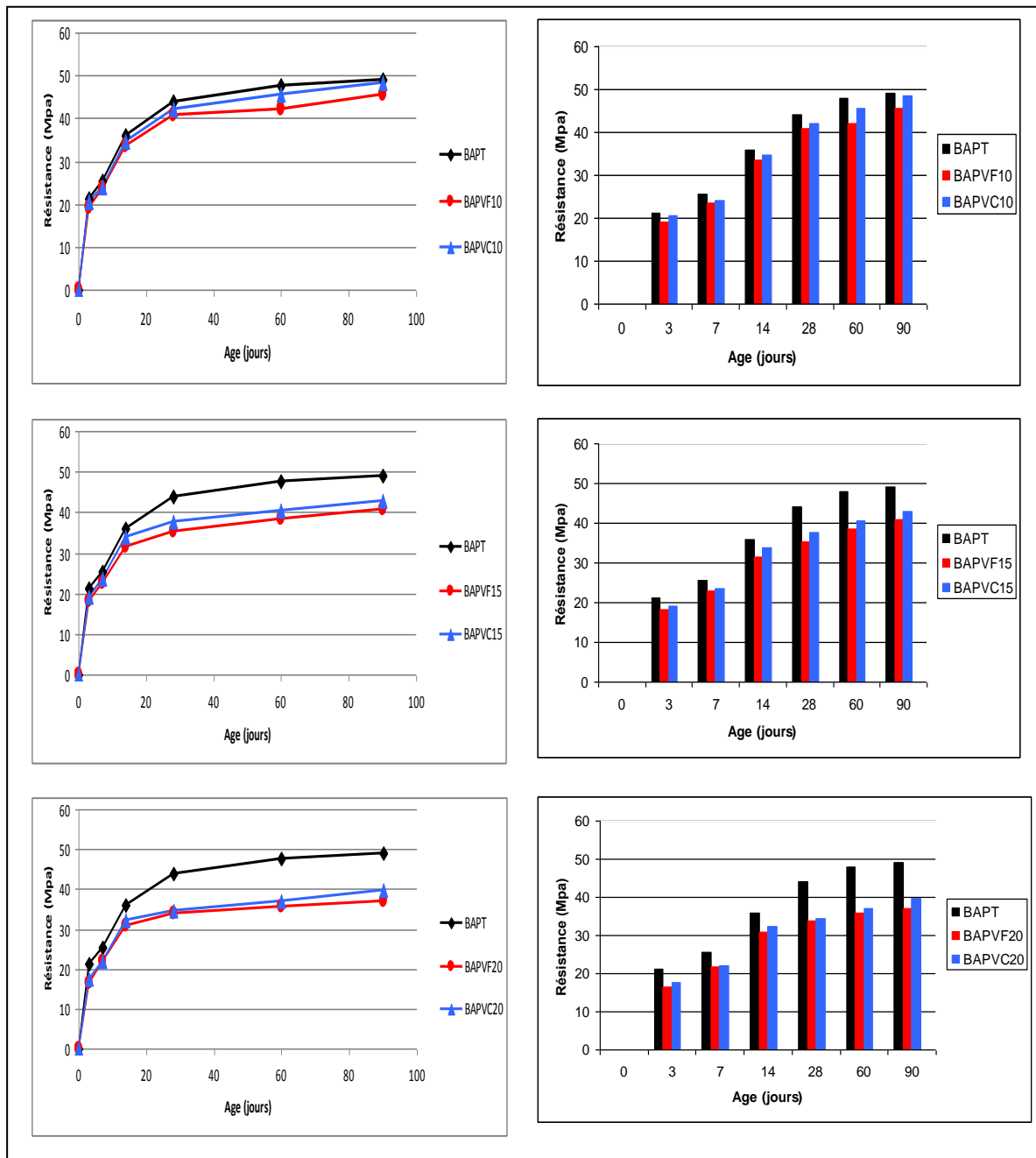


Figure V. 14 : Comparaison des résistances a la compression des BAP des deux vases Fergoug et Chorfa)(

Il est à noter que le béton témoin représente la valeur la plus élevée par rapport au béton à base des sédiments traités, ou il atteint 44 (MPa).

Pour un remplacement de 10 % des sédiments traités, le béton à base de la vase de Fergoug BAPVF10 présente une résistance moins importante par rapport au béton à base de la

vase de chorfa BAPVC10, ou elles atteignent respectivement 40.8 et 42.2 (MPa) à 28 jours et 45.6 et 48.5 (MPa) à 90 jours.

Les bétons avec 15 % de remplacement de la vase, on constate que le BAP à base de la vase de Chorfa est supérieure à celle de fergoug de 5%.

En comparant les résistances des BAP avec 20 % de remplacement des deux sédiments Chorfa et Fergoug, on remarque que la résistance des bétons à base de la vase de Chorfa est supérieure à celle de fergoug, ou elles atteignent respectivement 34.5 et 33.9 (MPa) à 28 jours et 39.8 et 37.1 (MPa) à 90 jours.

Cette amélioration de résistance peut s'expliquer par la différence des coefficients d'activité pouzzolanique. La vase de Chorfa rappelle le a affiché un coefficient d'activité plus important que celui de la vase de fergoug.

On conclut que la cinétique d'hydratation est beaucoup plus rapide dans les BAP témoin et les BAP à base de la vase de Chorfa, d'où un volume d'hydrates obtenu supérieur à celui développé dans les BAP à base de la vase de Fergoug, donc une plus grande densification du gel.

#### **V. 4.4. Comparaison des résistances à la traction des deux vases**

Les figures (V.15) représentent les valeurs de résistance à la traction de chaque pourcentage de substitution des deux vases par rapport à celui de béton témoin

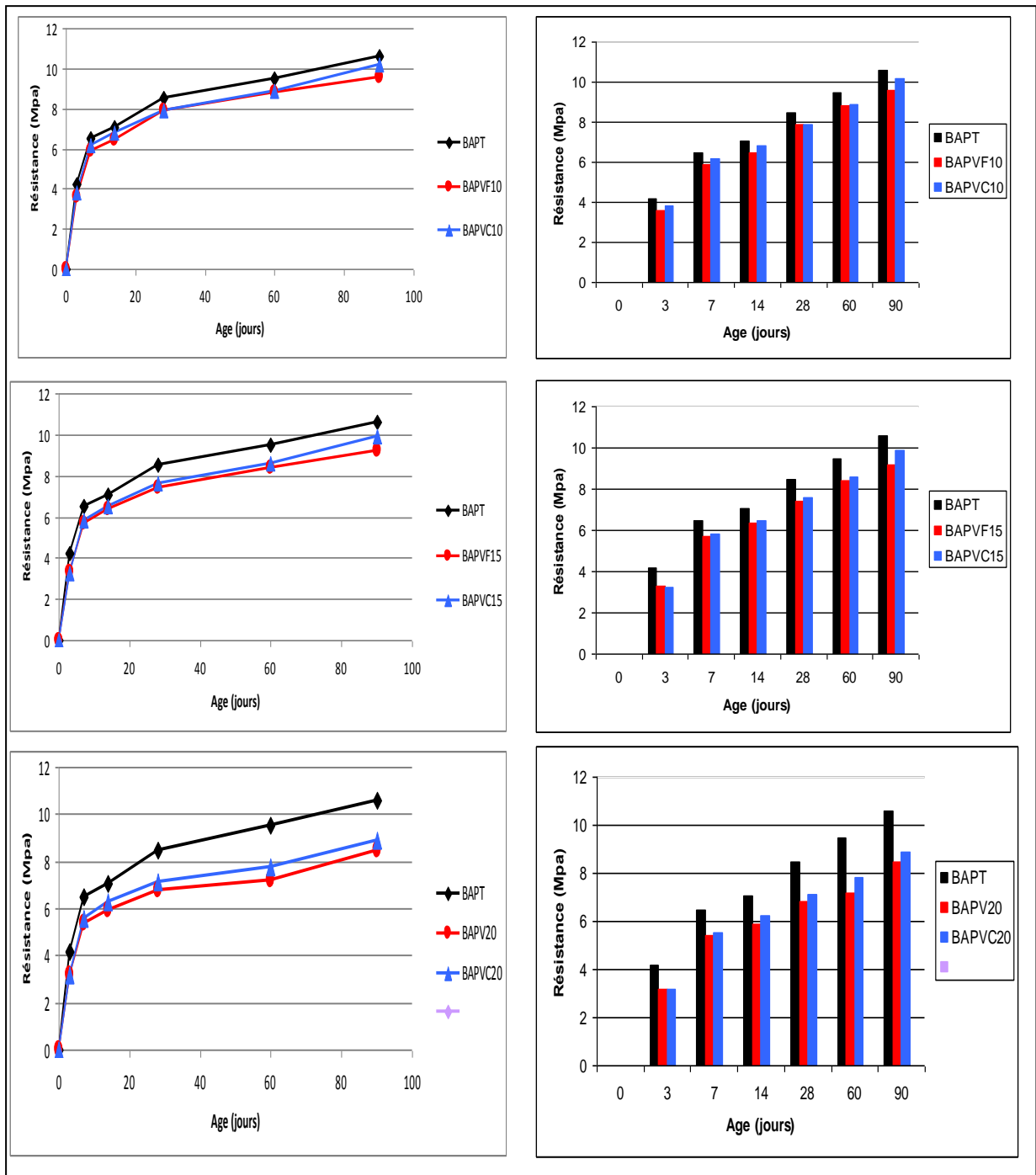


Figure V. 15 : Comparaison des résistances a la traction par flexion des BAP des deux vases Fergoug et Chorfa

D'après la figure (V.15) on remarque que pour tous les bétons, la formulation de béton témoin représente la valeur maximale, ou il atteint 8.5 (MPa) à 28 jours et 10.6 (MPa) à 90

jours. On constate alors que le béton témoin atteint le maximum de sa résistance à 28 jours (80.18 %).

À 28 jours les résistances des BAP avec 10 % de substitution des deux vases sont égales et atteignent 7.9 (MPa), par contre à 90 jours le BAP à base de la vase de Chorfa présente une résistance à la traction supérieure d'environ 6% des BAP à base de la vase de Fergoug

Il est à noter que pour une incorporation de 15% de la vase calcinée, la résistance à la traction pour les BAP à base de la vase de Chorfa est légèrement supérieure à celles de Fergoug, ou elles atteignent respectivement 7.6 et 7.4 (MPa) à 28 jours et 9.9 et 9.2 (MPa) à 90 jours.

Même pour les bétons avec substitution de 20 % de sédiments, le BAP à base de la vase de Chorfa à une résistance supérieure d'environ 5% de celle de Fergoug.

#### V.4.5. Perte de résistance à la compression et à la traction par rapport au BAP témoin :

Les figures (V.16 et V.17) illustrent les pertes de résistance à la compression et à la traction par rapport au béton témoin.

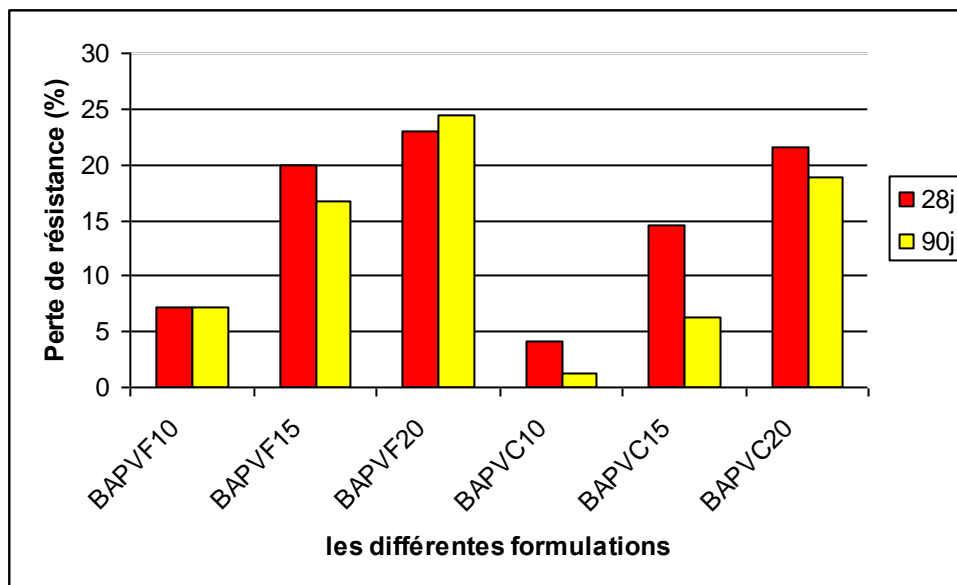


Figure V.16 : Perte de résistances a la compression à 28 et 90 jours des deux vases Fergoug et Chorfa par rapport au BAP témoin.

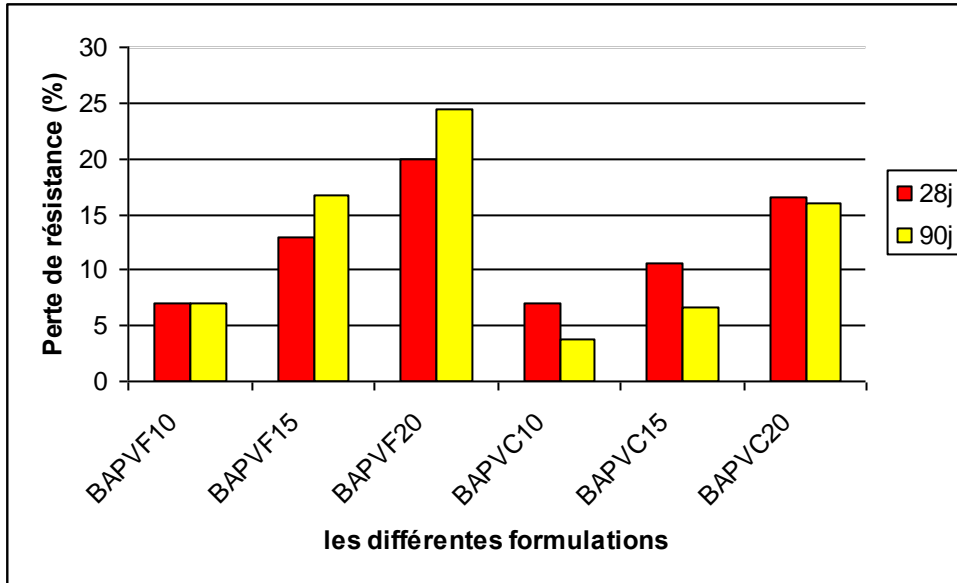


Figure V.17 : Perte de résistances a la traction à 28 et 90 jours des deux vases Fergoug et Chorfa par rapport au BAP témoin.

D'après la figure V.16 et V.17, on constate que la perte de résistance à la compression ne dépasse pas les 25% pour tous les bétons (les BAP à base de la vase de Fergoug et Chorfa) pour tous les âges (28 jours et 90 jours).

En effet, on remarque que l'incorporation de la vase calcinée dans les BAP génère une perte de résistance à la compression à 90 jours inférieure par rapport à la résistance à 28 jours, cela peut s'expliquer par l'évolution de l'activité pouzzolanique à long terme.

Les BAP à base de la vase de Chorfa présentent une perte de résistance à la traction et à la compression inférieure à : 5% pour un remplacement de 10% de la vase, 12% pour 15% de substitution et 20% pour incorporation de 20% des sédiments.

On ce qui concerne les BAP à base de la vase de Fergoug, on remarque que la perte de résistance atteint : 7% pour 10% de substitution, 17% avec 15% de substitution et 24% pour une incorporation de 20% de la vase.

On constate alors que la perte de résistance à la compression et à la traction est plus importante pour les bétons à base de la vase de Fergoug par rapport à celle de Chorfa.

#### V.4.7. Evolution des résistances à la traction

D'une façon générale, le béton a toujours une résistance à la traction beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. Concernant la nature de la résistance du béton, il apparaît que ces deux types de résistance sont intimement liés, mais, bien que ce soit indéniable, il n'existe aucun rapport direct de proportionnalité. En d'autres termes, la

résistance à la traction,  $f_t$ , augmente avec la résistance à la compression,  $f_c$ , mais à un taux allant en diminuant.

Un certain nombre de formules empiriques reliant  $f_t$  et  $f_c$  ont été proposées, la plupart ayant la forme suivante :

$$f_t = k (f_c)^n \quad (V.1)$$

Où  $k$  et  $n$  sont des coefficients. Des valeurs de  $n$  varient entre  $1/2$  et  $3/4$  ont été proposées [Neville, 2000]. La première valeur est utilisée par l'Américan Concrete Institute alors que Gardner et Poon [1976] ont trouvé une valeur plus proche de  $3/4$ , des cylindres ont été utilisés dans les deux cas. L'expression suivante semble donner la meilleure relation entre  $f_t$  et  $f_c$  :

$$f_t = 0.3 (f_c)^{2/3} \quad (V.2)$$

ou  $f_t$  est la résistance à la traction et  $f_c$  la résistance à la compression toutes deux en MPa mesurées sur des cylindres. Cette expression a été proposée par Raphael [1984] et Oluokun [1991] l'a modifiée comme suit :

$$f_t = 0.2 (f_c)^{0.7} \quad (V.3)$$

Les règles BAEL stipulent dans l'art. A2. 1. 12 que la résistance à la traction du béton à  $j$  jours, notée  $f_{ij}$  est conventionnellement définie par la relation (formule valable pour  $f_{cj} \leq 60$  MPa) :

$$f_{ij} = 0.6 + 0.06 f_{cj} \quad (\text{en MPa}) \quad (V.4)$$

L'application de ces lois donne pour les BAP des résistances à la traction à 28 jours dont les valeurs sont reportées dans le tableau V.12.

	Valeurs des résistances à la traction à 28 jours (MPa)			
	Mesurée	Calculée selon la loi V.1	Calculée selon la loi V.2	Calculée selon la loi V.3
BAPT	5.17	3.73	2.82	3.24
BAPVF10	5.16	3.55	2.68	3.04
BAPVF15	4.75	3.22	2.41	2.71
BAPVF20	4.98	3.14	2.35	2.63
BAPVC10	5.34	3.63	2.74	3.13
BAPVC15	4.94	3.36	2.53	2.85
BAPVC20	4.85	3.17	2.43	2.67

Tableau V.12 : Comparaison des valeurs des résistances à la traction des BAP mesurées à celles calculées par les lois V.1, V.2 et V.3

Nous remarquons que les lois V.2 et V.3 conduisent à une sous-estimation de la résistance à la traction pour l'ensemble des bétons. Par contre l'adoption de la loi V.2, donne des valeurs surestimées par rapport à celles trouvés par les essais.

La loi d'évolution dans le temps de la résistance à la traction ne présente pas d'intérêt considérable, dans la mesure où l'on cherche en pratique, comme on l'a dit précédemment, à évaluer la résistance à la traction à partir de la résistance à la compression.

## **V.5. Bilan**

Dans ce chapitre on a présenté tout les résultats obtenus par les différents essais effectués sur la pâte de ciment, le mortier et le béton à l'état frais et durcis. Nous pouvons tirer les remarques suivantes :

- La consistance normale est plus importante pour le béton avec ajout des vases par rapport au béton témoin, le BAP à base de vase Fergoug présente une consistance moins importante par rapport au BAP contenant la vase de Chorfa.
- Le temps de prise est moins important pour les BAP avec ajout par rapport au BAP témoin. Le BAP à base de vase de Chorfa présente un temps de prise le plus court.
- La vase de chorfa présente un coefficient d'activité plus élevé par rapport à celui de la vase de Fergoug.
- A l'état frais on remarque que toutes les formulations avec ou sans ajout de vase dépendent aux exigences de l'AFGC.
- En ce qui concerne les résistances mécaniques, la résistance diminue avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout dans le béton. La perte de résistance des bétons avec ajout de vase de Fergoug est plus importante que celle du béton avec vase de Chorfa.

## Conclusion générale

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Leur utilisation est notamment simplifiée par la suppression de la vibration et permet de réaliser des ouvrages d'une grande qualité esthétique. Cependant, leur formulation nécessite un volume de pâte élevé ce qui implique une utilisation de quantité importante de ciment et de superplastifiant.

La valorisation des déchets dans le domaine de la construction tend de plus en plus à se généraliser, d'une part en raison de la consommation de ce secteur de quantités élevées en matériaux de construction (gravier, sable, ciment...) menant ainsi à l'épuisement des matières premières servant à leur fabrication, alors ces déchets seront sans aucun doute une alternative non négligeable pour leur utilisation comme de nouvelles ressources, d'autre part ils sont la cause de problèmes écologiques dus à leur accumulation et rejet en pleine nature.

Ce travail présente une contribution dans les travaux de recherche réalisés sur la valorisation de déchets naturels, plus précisément il porte sur l'introduction des sédiments fluviaux issus des barrages de Chorfa et Fergoug au niveau de la wilaya de Mascara dans la formulation des bétons autoplaçants en substitution avec le ciment. Le but est de comprendre l'influence de ces sédiments sur les propriétés mécaniques de ces types de béton.

Sept formulations de bétons ont été retenues : un BAP témoin (BAPT) sans substitution de ciment, trois BAP avec des substitutions de 10, 15 et 20% de ciment par la vase calcinée de Fergoug et trois autres BAP avec les mêmes pourcentages par la vase calcinée de Chorfa.

Les bétons confectionnés ont fait l'objet de vérification de leur propriété autoplaçante par les différents essais préconisés par le cahier de charge de ce type de béton à l'état frais :

L'écoulement, la ségrégation dynamique et statique et la stabilité qui se sont révélés corrects pour la quasi-totalité des formulations.

Nous avons obtenu les résultats suivants

- À l'état frais

- L'essai d'étalement des BAP : l'étalement spécifié était dans l'intervalle de la norme. Nous remarquons que le diamètre d'étalement diminue avec l'augmentation du dosage en vase, ce qui est conforme aux résultats obtenus par l'essai de consistance.

- La ségrégation dynamique des BAP : déterminée par l'essai de la boîte en L, les taux de remplissage mesurés sont supérieurs à 80% pour l'ensemble des formulations.

- La ségrégation statique des BAP : Tous les BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte.

- Sur l'essai de colonnes : toutes les formulations présentent une homogénéité et une bonne distribution entre leurs constituants.

- Sur l'essai de ressuage : le pourcentage de ressuage répond à la norme.

D'après ces résultats, nous pouvons déduire alors que les sept bétons formulés avec ou sans vase répondent à la recommandation de la norme [AFGC 2000].

- À l'état durci

- quelque soit le type du béton et l'échéancier de mesure (3, 7, 14, 28, 60 et 90 jours), les résistances à la compression et la traction augmentent continuellement sans aucune chute .

- malgré ces augmentations les BAP avec vase développent des résistances mécaniques moins élevées que celles du BAP témoin qui présente les meilleures résistances mécaniques à tout âge.

- Les bétons à base de la vase Chorfa représente une résistance plus importante par rapport à celle de Fergoug.

-La perte de résistance augmente en fonction du pourcentage en vase, tout de même nous pouvons signaler que celle des bétons à base de vase Chorfa est moins importante par rapport à celle de Fergoug

D'après cette étude on constate que les résultats obtenus montrent :

-Les bétons autoplaçant à base des sédiments traités possèdent des bonnes propriétés à l'état frais.

-Les résistances mécaniques à la compression et à la traction sont acceptables pour les bétons avec ajout des vases surtout pour la vase de Chorfa qui présente une perte de résistance inférieure à 2% pour un pourcentage de 10% des la vase à 90 jours.

Vu les résultats de cette étude, de nouvelles paramètres pourront faire suite à ce travail tel que l'étude de la durabilité, tandis que le critère de résistance n'est pas le seul critère recherché. La tenue à l'eau et aux milieux agressifs des matériaux à base de vase ainsi que l'action du gel sont des facteurs déterminants dans l'orientation des domaines d'utilisation de ces matériaux.

Nous pensons que cette étude devrait porter sur l'étude des propriétés physiques telles que le retrait et le comportement du BAP à base des sédiments dragués vis-à-vis les hautes températures

Enfin nous proposons une étude techno-économique pour le traitement des sédiments dragués en vue de leur valorisation dans l'industrie du ciment.

## Références bibliographiques

**AEAP** [2000] «Agence de l'eau Artois Picardie. *Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués*».

**AFGC** [2000] Association française de Génie Civil. *Bétons Autoplaçants – Recommandations Provisoires*. Page 63.

**AFGC** [2002] Association française de Génie Civil (AFGC), *Bétons Auto-Plaçants Recommandations provisoires*, 63 pages.

**AITICIN** [ 2001] «*L'interaction ciment/superplastifiant. Cas des polysulfonates, bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*», Juillet-Aout, n°233, pp87-98.

**AGENCE DE (1)** [2002] Agence de l'eau (1). «*Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués*», Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments»s. 126 p.

**AGOSTINI. F** [2006] «*Inertage et valorisation des sédiments de dragage marin*» thèse d'état. (France).

**ASSIE. S** [2004] «*Durabilité des bétons autoplaçants*», thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Toulouse.

**BEAUCHAMP. J** [2005] «*Altération des continents*». Cour de sédimentologie. Département de Préhistoire .Paris (France).

**BEKARI. M** [2010] «*Outils d'aminagement des ports : Gestion globale des dédiments marins*». Etude bibliographique .

**BENAMAR. A, ALEM. A** [2003]-, « *Approche de valorisation des sédiments de dragage* »,21ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, P1-8.

**BENIA. B** [2007] «*Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux*». Mémoire de magister. Université de Mohamed Boudiaf M'sila .

**BERTHOIS. L** [1974]-, « *Les roches sédimentaires, étude sédimentologique des roches meubles* »,Tome 1, édition DOIN, P 202.

**BERTREAU I., MARTIN S., VASSILIADIS A** [1993]. « *Le curage des cours d'eau lorsque les sédiments contiennent des éléments-traces toxiques*». Le courrier de l'environnement de l'INRA, vol. 20, pp. 27-35.

**BICH. C** [2005] « *Contribution à l'étude de l'activité thermique du kaolin :évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique* », thèse pour l'obtention d'un grade

**BOUCARD. L** [2006]. « *Valorisation de sédiments fluviaux stabilisés*. Thèse de l'Université de Lille, 206 p.

**BONNET. C** [2000] «*Développement de bio-essais sur sédiments et applications de l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés*». Thèse de l'Université de Metz, 326 p.

**BOUHAMOU. N, BELAS. N, MESBAH. H, MEBROUKI. A et YAHIA. A** [2008] «*Influence des paramètres de composition sur le comportement du béton autoplacant à l'état frais*». Afrique SCIENCE 04(1) .1 - 20 ISSN 1813-548X.

**BOURGEOIS. R, CHAUVEL. H, KESSLE.RJ** [2001], «*Mémotech, génie des matériaux* », Editions CASTEILLA, 2001, P78-79.

**CHAHIDI ELOUZZANI. D,** [2005] « *Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeterie* », thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité sciences et techniques du déchet, Institut national des sciences appliquées de Lyon, P 18-21,65.

**CHINGE MELO. U et BILLONG. N** [1996] , « *Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites* », African journal of science and technology (AJST), science and engineering séries Vol.5, N°1, PP.92-100.

**CHINJE MELO. U et BILLONG. N** [2004] «*Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites*», African Journal of Science and Technology (AJST), Science and engineering Series Vol. 5, N°1, P 92-100.

**DE LARRARD F. et LE ROY. R** [1992], « *Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances* », Matériaux et Constructions, 25, pp. 464-475.

**DE LARRARD .F** [1999], «Concrete mixture-proportioning - A scientific approach», Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON.

**DE LARRARD. F., SEDRAN .T, HU. C, SZITKAR. J.C, JOLY. M et DERKX. F** [1996] «*Evolution of the workability of superplasticized concrete: assessment with BTRHEOM rheometer*», Rilem International Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Rilem proceedings 32, Glasgow, Scotland, pp. 377-388.

**DOMONE. P** [2006] «*Self-compacting-concrete. An analysis of 11 years of case studies, cement and concrete composites*», Volume 28, Issue 2, Pages 197-208.

**EMIL. O** [Emil 1978] «*Technologie de matériaux de construction*», Tome II, 335 p.

**FFB** [2003] Fédération française du béton «*Recommandations de mise en oeuvre des BAP et des BAN, SEBTP*».

**FELEKOGLU. B, YARDIMCI. M. Yet BARADAN. B** [2003], « *A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete*», Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 446-456, 17-20.

**FERRARIS et DE LARRARD** [1998], «*Testing and modeling of fresh concrete technology*», NIST, , NISTIR 6094, 61 pages.

**FLQTT et HOUST** [2001], «*A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizer*», Cement and concrete Research, vol 31, pp1169-1176.

**FOUCAULT. A et RAOULT. J.F** [1980] «*Dictionnaire de géologie*». Editions Masson, Paris, ISBN 2-225-654661-1.

**GARDNER, N. J., POON, S. M.** [1976], «*Time and temperature effects on tensile bond and compressive strengths* », ACI J., 73(7), 405-409.v

**GIBBS .J. C et ZHU. W** [1999] «*strength of hardened self-compacting concret*», Proceedinas of First Internationl RILEM Symposium on self-compacting concrete [PRO7], Stockholm, Suéd, pp 199-209, 13-15.

**GRAM .H et PIIPARINEN. P** [1999] «*Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance*», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 211-225, 13-15.

**JIN** [2002], «*Properties of mortar for self-compacting concrete*», PhD thesis de l'Université de Londre, 398 pages.

**KLUG. Y et HOLSCHEMACHER. K** [2003], «*Material properties of hardened self-compacting concrete*», ICPCM – A new era of building, Le Caire, Egypte, 18-20.

**KOIG. G, HOLSCHEMACHER. K, DEHN. F et WEIBE** [2001] «*Self-compacting concrete time development of material properties and bond behaviour*». Proceeding of 2<sup>nd</sup> internqntional RILEM Symposium on self-compacting concrete (Pro 33), Tokio, Japan : 507-516.

**KLUG. Y et HOLSCHEMACHER. K**[2003] «*Comparison of the hardened properties of self-compacting concrete and normal vibrated concrete*». Proceeding of 3<sup>rd</sup> internqntional RILEM Symposium on self-compacting concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland : 596-607.

**LECHEMI. M, HOUSSAIN. K.M.A, LAMBROS. V et N.BOUZOUBAA** [2003] «*Development of cost-effective self consolidating concrete incorporating fly ash, slag cement, or viscosity-modifying admixtures*», ACI Material journal, pp416-425.

**LEEHMANN et HOFFMAN** [2003], «*Pressure of self-compacting concrete on the formwork*», Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 288-295.

**LE ROY. R, DE LARRARD. F et PONS. G** [1996] «*Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances* », Extension du domaine d'application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, Bulletin des LCPC, spécial XIX, pp.63-84.

**MNAHONCAKOVA. E, PAVLIKOVA. M, GRESZCZYKk. S, ROVNANIKOVA. P, CERNY. R et HYDRIC** [2008] «*thermal and mechanical properties of self-compacting concrete containing different fillers*», Construction and building Materials 22,1594-1600.

**MIGNOT. C** [1989] «*Tassement et rh.ologie des vases*», 1.re partie, Revue Internationale La Houille Blanche, n.1.

**MILLOT. G** [2001] «*Argiles et minéraux argileux* », Dictionnaire des roches et minéraux, pétrologie et minéralogie, édition Encyclopaedia Universalis et Albin Michel, P 59-65.

**MIHOUBI. D** [2004] «*Déshydratation d'argiles par compression et séchage. Aspect de modélisation et de simulation* », Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur, spécialité énergétique, transfert et systèmes dispersés, Université de Pau, P 24, 30, 162.

**MOURET. M. et CYR. M** [2003] «*A discussion of the paper "The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete"*» by Mette R. Geiker, Mari Brandl, Lars N. Thrane, Dirch H. Bager and Olafur Wallevik, Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 11, pp. 1901-1903.

**NAKAHIRA. M et KATO. T** [1963] «*Thermal transformations of pyrophyllite and talc as revealed by X-ray and electron diffraction studies*», 12th national conference, journals "clay and clay minerals", Vol.12, Issue 1, P 21-27.

**NAGATAKI. S et FUJIWARA. H** [1995] «*Self compacting property of highly flowable concrete*», Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314.

**NEHBI. M et RAHMAN. M** [2000] «*Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosité in dispersed cement-based materials*». Cement and concrete Research 30[10], pp. 1663-1669.

**NEVILLLE A. M** [2000] «*Propriétés des Bétons*» », traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles.

**NGUYEN. T. B** [2008] «*Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée. Comportement mécanique et environnemental* » thèse de doctorat L'université de Toulouse.

**NOUGAR. B** [2009] «*Etude du comportement des sédiments issus du dragage en vue de leur stockage en attente de valorisation*» Mémoire de magister.

**OKUMARA et OUCH** [2003] «*Self-compacting concrete*», Journal of advanced Concrete Technology, vol 1, n°1, pp 5-15.

**OLUOKUN F.Q , BURDETTE E.G, DEATHERAGE I.H.** [1991] «*Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: Evaluation of Existing Relation for Normal Weight concrete*» , ACI Materials journal, Vol. 88, N° 3, Mai-Avril.

**OVARLEZ et ROUSSEL** [2006] «*A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork*», Materials and Structure, RILEM Materials and Structures, Vol. 37(2), pp. 239-248.

**OZAWA. K, SAKATA. N et OKAMURA. H** [1995], «*Evaluation of self compactibility of fresh concrete using the Funnel test*», Concrete Journal of JSCE, n°25.

**LE PARLOUËR. P et LEGENDRE. B** [2005] « *Matériaux de référence pour les techniques d'analyse thermique et de calorimétrie et méthodes de mesures calorimétriques* », Revue Française de métrologie, N°1 , Volume 2005-1, P 19-26.

**PERSSON. B** [2000] « *A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete* », Cement and Concrete Research, 31, pp.193-198.

**PETERSSON. Ö, BILLBERG. P and VAN. B.K** [1996], « *A model for Self-Compacting Concrete* », International Rilem Conference on 'Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32.

**PETERSSON. Ö** [2001], « *Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength* », Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 277-284, 23-25.

**PIMIANTA. J, ROUSSEAU. J et MONEK. G** [1973] « *Reconnaissance géologique du chantier de construction* », éditions EYROLLES, P165.

**PINEAUD. A** [2007]. « *Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des béton autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication* ». In thèse de doctorat, Université de Cergy\_Pontoise, page 271.

**PONS. G, PROUST. E et ASSIE. S** [2003] « *Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete* », Proceedings of 3<sup>rd</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20.

**PROJET NATIONAL BAP** [2005] « *Aide à la rédaction de cahier des charges techniques pour le Bétons Auto-Plaçants (BAP)* ».

**DUPAIN. R, LANCHAN. R, SAINT-ARROMAN.J et CAPLIEZ A** [2004] « *Granulats, sols, ciments et béton : caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire* », Editions Casteila.

**RAPHAEL, JEROME M.** [1984]. « *Tensile Strength of Concrete* », ACI Journal, American Concrete Institute, Detroit, MI, 158-165

**RENE. A** [1980] « *L'eau en Algérie, L'Eau en Algérie de l'imperialisme au développement* » (1830-1962) Editions Office des publications universitaires. 388 p.

**REMINI. B** [1997] « *Envasement des retenues de barrages en Algérie. Importance, mecanismes et moyen de lutte par la technique du soutirage* ». These de doctorat, Ecole nationale polytechnique d'Alger, mars, 342 p.

**REMINI. B** [2007] « *Evolution de l'envasement du barrage de l'Oued El Fodda* ». Rev. Eau énergie air, 1, 75-78.

**REMINI. B** [2006] « *Valorisation de la vase des barrages quelque exemple Algérien* » Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05, pp.75-89.

**REMINI .B** [2008] «*La surelevation des barrages – une technique de lutte contre l’envasement- Exemples algériens*». Rev. Int. La Houille Blanche, 5, 103-108.

**REMINI. B et HALLOUCHE.W** [2004] (2004) «*La sédimentation des barrages en Algérie*». Rev. Int. La Houille Blanche, 1, 1-5.

**REMINI. B et HALLOUCHE. W** [2007] «*Studying sediment. Water Power and Dam Construction*». Octobre, p. 42-45.

**SCORDIA. P** [2008] «*Cractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollues et traites dans les matériaux routiers*». thèse de doctorat L’école centrale de Lille.

**SEMCHA. A** [2006] «*Valorisation des sédiments de dragage : Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug*». Thèse de doctorat univercité de Reims pp.96-122.

**SHI. C, WU. Y, SHAO. Y et RIEFLER. M** [2002] «*Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete*», First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 349-354, 12-13.

**SONEBI. M et BARTOS. P.J.M** [1999] «*Hardened SCC and its bond with reinforcement*», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15.

**SUGAMATA** [1999] «*A study of particle dispersion effect of polycarboxylate-based superplasticizers*», Transactions of the Japan concrete institute, vol1, n°1, pp 7-17.

**SHINDOH et MATSUOKA** [2003] «*Development of combinaison type self-compacting concrete and evaluation test methods*», Journal of Advanced Concrete technology, vol 1, n°1, pp26-36.

**SOBOLEV. K et NAIK. T.R** [2005] «*Performance as a factor for sustainability of the cement industry* », Report N°. CBU-2005-17, Rep-588, August 2005, Presented and published at the CANMET/ACI, Three-day International Symposium on sustainable development of cement and concrete, October 5-7, 2005, Toronto, Canada, P 6-7.

**SORO. N.S** [2003] «*Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite* », thèse pour l’obtention d’un grade de docteur, spécialité sciences des matériaux céramiques et traitements de surfaces, université de Limoges, P 16-19, 34.

**TRAN.N. T** [2009] «*Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière*» THÈSE Doctorat de l’Université d’Artois. pp 68-96.

**TURCY** [2004], «*Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation*», thèse de doctorat de l’Ecole centrale de Nantes, 213 pages.

**VALEMBOIS. J et MIGNIOT. C** [1975] «*Rejets des produits de dragages a l’aval d’un barrage sur l’Oued Hamiz* ». Rev. Int. La Houille Blanche, 2-3, 155-172.

**VAN. BUI et MONTGOMERY** [1999], «*Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume*», Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, Stockholm, pp 373-384.

**WALRAVEN** [2003], «*Structural aspect of self-compacting concrete*», proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 15-22.

**YEN** [1999] «*Flow behaviour of high strength high-performance concrete*», cement and concrete composites, 1999, vol 21, pp413-424.

**ZHU. W et BARTOS. P. J. M** [2003], «*permeation properties of self-compacting concrete*», Cement and concrete research, 33, pp921-926.

**ZHU. W et GIBBS. J. C** [2005], «*use of different limestone and chalk powders in self compacting concrete*», Volume 35, Issue 8, page 1457-1462.

# Annexe

## MEDAFLOW 113

Conforme à norme EN 15423

Super plinthe - Haut absorbant  
d'eau - Amélioration d'acoustique

### DESIGN PRINCIPAL

Le MEDAFLOW 113 est un superplafond haut absorbant d'eau installé à l'aide des profils de finition compatibles qui améliorent considérablement l'acoustique intérieure.

Le MEDAFLOW 113 permet d'éliminer des tâches et résidu de l'eau facile à nettoyer avec un long maintien d'acoustique.

### CARACTÉRISTIQUES

- Poids ..... 1kg/m<sup>2</sup>
- Couleur ..... blanc
- pH ..... 6,8 - 7,8
- Garantie ..... 1, 10 et 20
- Taux de bruit ..... n.d.
- Résistance ..... 1000, 20

### PROPRIÉTÉS ET AVANTAGES

Cette superplafond à MEDAFLOW 113 permet :

- Sur l'eau sale :**
- Réduction des BCO, sans
  - Amélioration de la santé
  - un maintien de l'acoustique intérieure.
  - de faciliter le nettoyage des tâches et résidu de l'eau facile.

- Sur l'eau claire :**
- Augmenter les résistances mécaniques à long terme et à long terme
  - de réduire l'acoustique
  - d'augmenter la durée de vie
  - de réduire les coûts

### DOMAINES D'APPLICATION

- Bureaux, bureaux professionnels
- Bureaux, salle, plénum
- Bureaux publics, hôpitaux
- Bureaux professionnels, universitaires

Les superplafonds absorbent d'eau sont un choix idéal pour les superplafonds absorbant d'eau acoustique et acoustique dans les bureaux professionnels et universitaires.

### EXCLAMER

Plage de dosage recommandé de :  
0,8 à 2,8 % de poids structurel (0,80 à 2,80 kg/m<sup>2</sup>)  
de la Plinthe sur le produit absorbant.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des additifs utilisés.

### MÉTHODE D'INSTALLATION

Il est recommandé d'ajouter l'additif dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage et 50% du béton.

Le MEDAFLOW 113 est ajouté à la fin de la phase de dosage dans le béton mûr (après), puis mûr à grande échelle : l'essai?

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAFLOW 113 est conditionné en sacs de 25kg.

**État de conservation :**  
Une année dans son emballage d'origine, à l'abri de la pluie et de la chaleur (20°C < T < 30°C).

### PRÉCAUTIONS D'INSTALLATION

Manipulation dangereuse.  
Se référer à la Fiche de Sécurité de Sécurité d'urgence : www.granitor.com