

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba BENBOUALI DE CHLEF
Faculté de Génie Civil et d'Architecture
Département de Génie Civil



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Par :

GUERBAS Nabil

Thème

Effet des additions minérales sur le comportement rhéologique
et mécanique du mortier à base du sable de concassage

Soutenu publiquement le : 19 /01/2025

Devant le jury composé de :

Bennai Riadh	Professeur	UHB Chlef	Président
Boubekeur Toufik	Professeur	UABW Tissemsilt	Examineur
Bougara Abdelkader	Professeur	UHB Chlef	Examineur
Mezziane El hadj	MCA	UHB Chlef	Examineur
Adjoudj M'hamed	Professeur	UHB Chlef	Rapporteur

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents,

À mon frère,

À mes sœurs

À toute ma famille,

À mes amis (es).

GUERBAS NABIL

Remercîments

Je remercie "ALLAH" le Tout-Puissant de m'avoir donné la force et le courage de finir ce modeste travail, qui est le fruit de mes années de savoir.

Je tiens à remercier tous particulièrement :

*Mon directeur de thèse, Monsieur **Adjoudj M'hamed**, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour avoir dirigé ce travail et de m'avoir donné l'occasion de réaliser cette thèse dans les bonnes conditions. Je tiens également à le remercier pour sa grande disponibilité, son aide et sa sympathie, sa grande gentillesse, de ses encouragements et de la confiance qu'il m'a accordée.*

*Monsieur **Ezziane Karim**, Professeur à l'Université de Chlef, de m'avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement, je tiens également à les remercier de leur gentillesse et leur grande disponibilité et l'intérêt qu'ils alloué ont à ce travail, et monsieur **Rahmouni Zine El Abidine**, Professeur à l'Université de M'sila, pour les conseils avisés qui ont rendu ce travail possible, Je remercie aussi vivement monsieur **Bounedjema Yassine** pour ses précieux conseils et ses encouragements renouvelés.*

*Monsieur **Bennai Riadh**, Professeur à l'Université de Chlef, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider ce jury.*

*Messieurs **Boubekeur Toufik**, Professeur à l'Université de Tissemsilt, **Bougara Abdelkader** Professeur à l'Université de Chlef et **Mezziane El hadj**, MCA à l'Université de Chlef, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'en être les examinateurs.*

Mes remerciements vont également à mes collègues de la faculté de Génie Civil et d'Architecture de Chlef, du Laboratoire Géomatériaux (LaG) et du Laboratoire du béton en Génie Civil, que ce soit enseignants, chercheurs, techniciens et personnels administratifs avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à mes parents, mes frères, mes sœurs qui m'ont soutenu pendant l'élaboration de ce travail.

GUERBAS NABIL

Résumé

Cette étude vise à étudier l'effet de l'utilisation des additions minérales (AM) et de sable provenant de déchet de carrière (SDC) pour améliorer certaines propriétés du mortier. Le ciment ordinaire est remplacé par 10%, 20% et 30% de fumée de silice (FS), de pouzzolane naturelle (NP) ou de laitier de haut fourneau broyé (LHF) dans un mortier à base de sable SDC. Les propriétés de ce mortier sont évaluées et comparées à celles du mortier à base de sable naturel (SN). Les essais expérimentaux visent l'étalement, le besoin en superplastifiant, les paramètres rhéologiques, la résistance mécanique, l'absorption d'eau et le retrait. Les résultats obtenus montrent que le mélange à base de sable SDC présente la meilleure maniabilité et nécessite moins de dosage en superplastifiant. Lorsque les AM sont utilisées, une baisse de maniabilité est observée ce qui nécessite l'ajout d'une quantité supplémentaire de superplastifiant. De plus, le sable SDC rend la résistance du mortier 1,5 à 2 fois supérieures à celle du mortier à base de sable NS. Cette résistance augmente encore de 42% lorsque le ciment est remplacé par 10% de FS. Ce mortier est moins déformable et son retrait évolue lentement par rapport à celui du sable SN, et il sera plus faible et moins sensible à la dessiccation lorsqu'il est formulé avec des AM. Des relations adéquates ont été établies pour prédire les résistances mécaniques en fonction des paramètres d'essai, avec un coefficient de corrélation élevé et une faible erreur quadratique moyenne.

Mots clés : absorption, ouvrabilité, retrait, résistance, rhéologie, sable de déchets de carrière, sable naturel, mortier.

Abstract

This study aims to investigate the effect of using mineral additives (MA) and quarry waste sand (SDC) to improve certain properties of mortar. Ordinary cement is replaced by 10%, 20%, and 30% of silica fume (FS), natural pozzolan (NP), or ground granulated blast furnace slag (LHF) in a mortar based on SDC. The properties of this mortar are evaluated and compared to those of mortar based on natural sand (SN). The experimental tests focus on slump, superplasticizer demand, rheological parameters, mechanical strength, water absorption, and shrinkage. The results show that the mix based on SDC has the best workability and requires less superplasticizer dosage. When mineral additives (MA) are used, a decrease in workability is observed, which requires the addition of an extra amount of superplasticizer. Additionally, the SDC sand makes the mortar's strength 1.5 to 2 times higher than that of mortar based on SN sand. This strength further increases by 42% when the cement is replaced by 10% FS. This mortar is less deformable and its shrinkage progresses more slowly compared to that with NS sand, and it will be weaker and less sensitive to desiccation when formulated with MA. Adequate relationships have been established to predict mechanical strengths based on test parameters, with a high correlation coefficient and a low mean squared error.

Key words: absorption, workability, shrinkage, resistance, rheology, Quarry waste sand, natural sand, mortar.

ملخص

هذه الدراسة تهدف إلى دراسة تأثير استخدام المضافات المعدنية (AM) مع الرمل الناتج عن مخلفات المحاجر (SDC) لتحسين بعض خصائص الملاط الإسمنتي. بحيث يتم استبدال جزء من الإسمنت بإضافة نسبة 10%، 20% و 30% من غبار السيليكا (FS) أو البوزلان الطبيعي (NP) أو خبث الأفران (LHF)، في ملاط يحتوي على رمل (SDC). خصائص هذا الملاط يتم تقييمها ومقارنتها بخصائص الملاط القائم على الرمل الطبيعي (SN). تشمل الاختبارات التجريبية تأثير قابلية التشغيل، الحاجة إلى المدن العضوي، المعايير الريولوجية، المقاومة الميكانيكية، امتصاص الماء والانكماش. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الخليط القائم على رمل SDC يتمتع بأفضل قابلية للتشغيل ويحتاج إلى جرعة أقل من المدن العضوي. عند استخدام المضافات المعدنية (AM)، يُلاحظ انخفاض في قابلية التشغيل مما يستلزم كمية إضافية من المدن العضوي. بالإضافة إلى ذلك، فإن رمل SDC يزيد من مقاومة الملاط بمقدار 1.5 إلى 2 مرة مقارنة بالرمل SN، وتزيد هذه المقاومة بنسبة 42% مع 10% من FS. هذا الملاط هو أقل قابلية للتشوه ويتقدم انكماشه ببطء مقارنة بالملاط الذي يحتوي على الرمل SN، وسيكون أكثر ضعفاً وأقل حساسية للجفاف عندما يمتزج مع المضافات المعدنية (AM). تم إنشاء علاقات رياضية مناسبة لضبط المقاومة الميكانيكية بناءً على معايير الاختبار، مع وجود معامل ارتباط مرتفع وخطاً تربيعي ضعيف.

كلمات البحث: امتصاص، قابلية التشغيل، الانكماش، مقاومة، الريولوجيا، الرمال المخلفة من المحجرات، الرمال الطبيعية.

Liste des figures

Figure 1.1 :	Gisement situé en amont de la nappe phréatique.....	07
Figure 1.2 :	Dépôt situé en dessous de la nappe phréatique.....	07
Figure 1.3 :	Emplacement de la roche pouvant être exploitée.....	08
Figure 1.4 :	Engins roulants.....	08
Figure 1.5 :	Processus de concassage.....	10
Figure 1.6 :	Zones de stockage.....	11
Figure 1.7 :	Forme d'un granulats.....	13
Figure 1.8 :	Fabrication de sable concassé (en mètres cubes) en 2009, répartie parmi les dix wilayas les plus productives.	20
Figure 1.9 :	Représentation des principales additions de ciment sur le diagramme ternaire CaO-SiO ₂ -AL ₂ O ₃ .	21
Figure 1.10 :	Fumée de silice.....	22
Figure 1.11 :	Pouzzolane naturelle.....	23
Figure 1.12 :	Étapes du processus de fabrication des laitiers de haut-fourneaux.....	24
Figure 1.13 :	Roche de calcaires.....	25
Figure 1.14 :	Cendres volantes.....	25
Figure 1.15 :	Schéma glissement des couches.....	27
Figure 1.16 :	Déformation résultant par la mise en cisaillement d'un fluide.....	28
Figure 1.17 :	Schéma de vitesse de cisaillement.....	28
Figure 1.18 :	Apports des phases solides et liquide à la résistance au cisaillement du béton.	29
Figure 1.19 :	Rhéomètres rotatifs :(a) Plan-Plan, (b) Cône-Plan, (c) Cylindres coaxiaux.....	30
Figure 1.20 :	Données sur la viscosité plastique et les seuils de cisaillement identifiés lors de l'étude de bétons et de mortiers à l'aide de divers instruments.	31
Figure 2.1 :	Variation de l'étalement et du temps d'écoulement du mortier en fonction du pourcentage de fines calcaires.	36
Figure 2.2 :	Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique de l'addition minérale.	37
Figure 2.3 :	Coefficients d'absorption capillaire à 90 jours des bétons avec et sans fines calcaires substituées au sable SDC.	38
Figure 2.4 :	Absorption capillaire d'eau des différents mélanges de béton autoplaçant à base de sable SDC avec différents teneurs en fines.	39
Figure 2.5 :	Evolution de la perte de masse des différents mortiers.	40
Figure 2.6 :	Développement de résistance à la traction par flexion à différents âges	41
Figure 2.7 :	Évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines calcaires.	42
Figure 2.8 :	Résistance de compression de béton a 180 jours.....	43
Figure 2.9 :	Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment calcaire avec le sable normalisé et le sable SDC.	44
Figure 2.10 :	L'influence des fillers de quartz (Q) et de calcaire (C) sur le flux de chaleur d'un ciment PC1 riche en C ₃ A et un ciment PC2 pauvre en C ₃ A.	45
Figure 2.11 :	Evolution du retrait de séchage des béton étudiés.....	46

Figure 2.12 :	Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant.	47
Figure 2.13 :	Effets de la fumée de silice sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.	49
Figure 2.14 :	Influence du laitier de haut fourneau sur la rhéologie des bétons (a) Seuil de cisaillement ; (b) Viscosité.	50
Figure 2.15 :	Impact de la granulométrie des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des bétons analysés.	51
Figure 2.16 :	Évolution de la masse des mortiers.....	53
Figure 2.17 :	Résistances à la traction des mortiers ternaires en fonction du taux de substitution des additions minérales.	53
Figure 2.18 :	Variation de la Résistance à la compression du mortier formulé avec divers pourcentages de fumée de silice.	54
Figure 2.19 :	Variation de la résistance à la compression des bétons formulés avec divers pourcentage de la pouzzolane naturelle.	55
Figure 2.20 :	Évaluations des propriétés mécaniques des bétons incorporant de la pouzzolane naturelle de Bouhamidi.	56
Figure 2.21 :	Variation de la résistance à la compression des mortiers contenant du laitier de haut fourneau en relation avec la finesse, le taux de substitution et l'âge.	57
Figure 2.22 :	Impact du taux de remplacement du ciment par des fillers calcaires (LF) sur la variation de la résistance à la compression du béton.	59
Figure 2.23 :	Dégagement de chaleur de ciment avec ajouts (taux variable en (a), finesse variable en (b)).	60
Figure 2.24 :	Évolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler (0, 10, 20%).	60
Figure 2.25 :	Variation du retrait total sur mortiers à 20°C.....	61
Figure 2.26 :	Retrait de séchage d'un béton.	62
Figure 2.27 :	Variation de l'affaissement des bétons à base de sable SDC et d'additions minérales.	63
Figure 2.28 :	Variation de l'absorption d'eau des bétons à base de sable SD et d'additions minérales.	65
Figure 2.29 :	Influence de la fumée de silice sur la perte de masse du béton à base de sable SDC.	66
Figure 2.30 :	Résistance à la traction des bétons en fonction du sable SDC et différents additions minérales.	67
Figure 2.31 :	Effet de fumé de silice sur la résistance à la compression de béton à base du sable SDC.	68
Figure 2.32 :	Résistance à la compression du béton à haute performance à l'âge de 28 jours en fonction de proportion de sable artificiel et du taux de fumée de silice.	69
Figure 2.33 :	Effet de fumé de silice sur le retrait du béton à base de sable SDC.....	70
Figure 3.1 :	Courbes granulométriques des matériaux utilisés.....	75
Figure 3.2 :	Démarches de l'essai d'étalement à la table à secousses du mortier.....	79
Figure 3.3 :	Dispositif du rhéomètre utilisé.....	80
Figure 3.4 :	Profil de vitesse.....	81
Figure 3.5 :	Conservé les éprouvettes à l'extérieur dans l'air libre.....	82

Figure 3.6 :	Description-schematique-de-l'essai-d'absorption-d'eau-par-immersion.	83
Figure 3.7 :	Déroulement de l'essai de flexion en trois points.....	84
Figure 3.8 :	Déroulement de l'essai de compression.....	85
Figure 3.9 :	Schéma du dispositif de mesure de retrait.....	86
Figure 4.1 :	Etalement des mortiers en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables et les additions minérales utilisés.	89
Figure 4.2 :	Variation des dosages en superplastifiant des différents mortiers pour atteindre une consistance plastique.	90
Figure 4.3 :	Viscosité plastique des mortiers basée sur différents sables et divers AM.....	93
Figure 4.4 :	Seuil de cisaillement des mortiers basés sur différents sables et divers AM....	93
Figure 4.5 :	Coefficient d'absorption d'eau au cours du temps en fonction des différents sables et FS.	95
Figure 4.6 :	Absorption d'eau au cours du temps en fonction des différents sables et NP...	96
Figure 4.7 :	Absorption d'eau au cours du temps en fonction des différents sables et LHF..	96
Figure 4.8 :	Perte en poids au cours du temps en fonction des différents sables et FS.....	98
Figure 4.9 :	Perte en masse au cours du temps en fonction des différents sables et NP.....	98
Figure 4.10 :	Perte en masse au cours du temps en fonction des différents sables et LHF....	99
Figure 4.11 :	Résistance à la compression des mortiers en fonction des différents sables et FS.	100
Figure 4.12	Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction des différents sables et NP.	100
Figure 4.13 :	Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction des différents sables et LHF.	101
Figure 4.14 :	Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction des différents sables et FS.	102
Figure 4.15 :	Résistance à la compression des mortiers en fonction des différents sables et NP.	103
Figure 4.16 :	Résistance à la compression des mortiers en fonction des différents sables et LHF.	103
Figure 4.17 :	Retrait des mortiers en fonction des différents sables et FS.....	105
Figure 4.18 :	Retrait des mortiers en fonction des différents sables et NP.....	105
Figure 4.19 :	Retrait des mortiers en fonction des différents sables et LHF.....	106
Figure 4.20 :	Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction pour le mortier à base de sable SDC et la teneur en AM.	107
Figure 4.21 :	Résistance ultime à la compression et résistance à la moitié de l'âge pour mortier basé sur le sable SDC et la teneur en AM.	108
Figure 4.22 :	Comparaison entre la résistance à la compression mesurée et estimée d'un mortier basé sur le sable SDC et la teneur en AM.	110

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Principaux appareils de concassage employé.....	09
Tableau 1.2	Classification des grains selon les normes britanniques.....	12
Tableau 1.3	Rhéomètres à béton.....	30
Tableau 1.4	Analyse comparative des divers rhéomètres pour béton.....	31
Tableau 3.1	Caractéristiques physicochimiques et minéralogiques du ciment.....	73
Tableau 3.2	Caractéristiques des deux sables utilisés.....	74
Tableau 3.3	Caractéristiques chimique et physico-mécaniques de fumée de silice.....	75
Tableau 3.4	Caractéristiques chimique et physico-mécaniques de la pouzzolane.....	76
Tableau 3.5	Caractéristiques chimique et physico-mécaniques du laitier.....	76
Tableau 3.6	Caractéristiques physico-chimiques de superplastifiant utilisé.....	77
Tableau 3.7	Dosage en superplastifiant pour étalement de 80%	78
Tableau 3.8	Proportions des mélanges des mortiers.....	77
Tableau 3.9	Méthode de malaxage et procédure d'incorporation de l'adjuvant.....	78
Tableau 4.1	Les paramètres S_{cu} et t_{50} exprimés en fonction du contenu AM par la corrélation de l'Eq. 3 avec les résultats expérimentaux	109

Liste des symboles

AM	Additions minérales.
SDC	Sable de déchets de carrière.
SN	Sable naturel.
FS	Fumée de silice.
NP	Pouzzolane naturelle.
LHF	Laitier de haut fourneau broyé.
Cv	Coefficient volumétrique.
F	Projection de la force de frottement tangentielle.
S	Surface élémentaire d'une couche cisillée.
τ	Contrainte de cisaillement (Pa).
τ_0 :	Seuil de cisaillement (Pa).
γ	Taux de cisaillement (1/s).
μ :	Viscosité plastique (Pa.s).
SP	Ssuperplastifiant.
CaO	Oxyde de calcium.
SiO ₂	Silice.
Al ₂ O ₃	Alumine.
Fe ₂ O ₃	Oxide de fer.
MgO	Oxyde de magnesium.
Na ₂ O	Oxide de sodium.
K ₂ O	Oxide de potassium.
SO ₃	Trioxide de soufre.
C ₃ S	Silicate tricalcique (Aalite).
C ₂ S	Silicate bicalcique (bélite).
C ₃ A	Aluminate tricalcique (célite).
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique.
PC	Polycarboxylates.
Ca(OH) ₂	Chaux.
CSH	Silicates de calcium hydratés.

Table des matières

Résumé.....	iv
Abstract.....	v
ملخص.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	x
Liste des symboles.....	xi
Introduction générale.....	2

Chapitre 1

Revue bibliographique sur les granulats et différents additions minérales

1.1. Introduction.....	5
1.2. Granulats.....	5
1.2.1. Différents types de granulats.....	5
1.2.1.1. Granulats Naturels.....	6
1.2.1.2. Granulats Artificiels.....	6
1.2.1.3. Granulats Recyclés.....	6
1.2.2. Processus de production des granulats.....	7
1.2.2.1. L'extraction.....	7
1.2.2.2. Chargement et Transport.....	8
1.2.2.3. Traitement.....	9
1.2.2.4. Stockage et expédition.....	11
1.2.2.5. Suivi et contrôle de qualité.....	11
1.2.3. Caractérisation des sables.....	12
1.2.3.1. Forme des grains.....	12
1.2.3.2. Adhérence au liant.....	13
1.2.3.3. Granularité (composition granulométrique).....	13
1.2.3.4. Grosseur du sable.....	14
1.2.3.5. Porosité du sable.....	14
1.2.3.6. Absorption.....	15
1.2.3.7. Réactions alcalis-granulats.....	16
1.2.3.8. Impureté du sable.....	16
1.2.3.9. Choix des sables.....	18
1.3. Sable de déchets de carrière.....	18
1.3.1. Origine du sable SDC.....	18
1.3.2. Caractéristiques du sable SDC.....	19
1.3.3. Fabrication du sable SDC en Algérie.....	19
1.3.4. Rôle du sable dans le béton et mortier.....	20
1.4. Additions minérales.....	20
1.4.1. Types d'additions minérales.....	21
1.4.1.3. Fumée de silice.....	22
1.4.1.2. Pouzzolane naturelle.....	22
1.4.1.1. Laitier granulé des hauts fourneaux.....	23
1.4.1.4. Fillers calcaires.....	24
1.4.1.5. Cendres volantes.....	25
1.4.2. Avantages des additions minérales.....	25
1.4.2.1. Avantages techniques.....	26
1.4.2.2. Avantages économiques.....	26

1.4.2.3. Avantages écologiques	26
1.5. Rhéologie.....	27
1.5.1. Viscosité plastique.....	27
1.5.2. Contrainte de cisaillement	28
1.5.3. Vitesse de cisaillement	28
1.5.4. Seuil de cisaillement.....	29
1.5.5. Appareils de mesures rhéologiques	29
1.6 Conclusion.....	31

Chapitre 2

Apport des additions minérales sur les propriétés du mortier et béton à base de sable SDC

2.1. Introduction	34
2.2. Apport du sable de déchets de carrière.....	34
2.2.1. Ouvrabilité.....	34
2.2.2. Paramètres rhéologiques.....	36
2.2.3. Absorption d'eau	38
2.2.4. Perte de masse	39
2.2.5. Résistance à la flexion	40
2.2.6. Résistance à la compression	41
2.2.7. Chaleur d'hydratation.....	44
2.2.7. Retrait	45
2.3. Apport des additions minérales	47
2.3.1. Ouvrabilité.....	47
2.3.2. Paramètres rhéologiques.....	48
2.3.3. Absorption d'eau	52
2.3.4. Perte de masse	52
2.3.5. Résistance à la traction par flexion.....	53
2.3.6. Résistances à la compression	54
2.3.7. Chaleur d'hydratation.....	59
2.3.8. Retrait	60
2.4. Apport combiné du sable SDC et additions minérales.....	63
2.4.1. Ouvrabilité.....	63
2.4.2. Paramètres rhéologiques.....	64
2.4.3. Absorption d'eau	65
2.4.4. Pertes de masse.....	66
2.4.5. Résistance à la traction par flexion.....	66
2.4.6. Résistances à la compression	68
2.4.7. Chaleur d'hydratation.....	69
2.4.8. Retrait	70
2.5. Conclusion.....	71

Chapitre 3

Matériaux et méthodes d'essai

3.1. Introduction	73
3.2. Matériaux utilisés	73
3.2.1. Ciment	73
3.2.2. Sables.....	74
3.2.3. Additions minérales.....	74

3.2.3.1. Fumée de silice (FS).....	75
3.2.3.2. Pouzzolane naturelle (NP).....	76
3.2.3.3. Laitier des hauts fourneaux (LHF)	76
3.2.4. Adjuvant	77
3.2.5. Eau de gâchage	77
3.3. Formulation et confection des éprouvettes	77
3.3.1. Formulation des mortiers.....	77
3.3.2. Préparation des échantillons	78
3.3.3. Conditions de conservation des éprouvettes	79
3.4. Essais effectués.....	79
3.4.1. Essai d'ouvrabilité	79
3.4.2. Essai de la rhéologie	80
3.4.2.1. Rhéomètre utilisé.....	80
3.4.2.2. Procédure de l'essai.....	81
3.4.2.3. Profil de vitesse	81
3.4.2.4. Déroulement de l'essai	81
3.4.3. Essai de la perte de masse	82
3.4.4. Absorption par immersion.....	83
3.4.5. Essai de résistance à la flexion	83
3.4.6. Essai de résistance à la compression	84
3.4.7. Retrait	85
3.5. Conclusion.....	86

Chapitre 4

Analyse et discussion des résultats

4.1. Introduction	88
4.2. Effet combiné sable SDC-addition minérale	88
4.2.1. Besoin en superplastifiant	88
4.2.2. Paramètres rhéologiques.....	91
4.2.3. Absorption d'eau	94
4.2.4. Perte de masse	97
4.2.5. Résistance à la traction par flexion.....	99
4.2.6. Résistance à la compression	101
4.2.7. Retrait	104
4.2.8. Corrélation de la résistance à la traction.....	106
4.2.9. Corrélation de la résistance à la compression.....	107
4.3. Conclusion.....	111
Conclusions générales	113
Références bibliographiques	116

Introduction générale

Introduction générale

Les substances minérales utilisées comme ajouts en cimenterie ou additifs lors de la confection du béton contribuent par leur activité physique, hydraulique et pouzzolanique à améliorer le comportement des ciments à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Plusieurs types d'additions sont bien connus tels que la fumée de silice, les pouzzolanes naturelles, les laitiers des hauts fourneaux et les cendres volantes, ainsi que. Ces produits deviennent plus actifs dans les solutions alcalines du ciment et donnent naissance à de nouveaux hydrates qui confèrent aux bétons une plus grande résistance mécanique et une meilleure durabilité. Par leur activité de surface et leur distribution granulaire, ils jouent un rôle fondamental dans le comportement rhéologique et mécanique des mortiers et bétons.

Dans les carrières, environ 20% des déchets de concassage ; soit 15 millions de tonnes de sable SDC, sont rejetés en raison de leur forte teneur en fines, les rendant non conformes aux règlements en vigueur. Ces 15 millions de tonnes de sable rejeté représentent environ 55% de la demande en sable dans le domaine de la construction. Ces sables sont généralement stockés en vue d'une éventuelle utilisation. Par conséquent, l'utilisation du sable SDC pour la fabrication du béton et du mortier devient de plus en plus nécessaire pour protéger l'environnement et répondre aux besoins du secteur de la construction et des travaux publics.

Ce travail vise à étudier les performances du sable SDC, lorsqu'il se trouve avec des ciments contenant des additions minérales tels que : le laitier des hauts fourneaux, la pouzzolane naturelle ou la fumée de silice. Le travail se base sur une série d'expérimentation sur différentes mixtures composées de différentes fractions d'additions minérales dans un mortier à base du sable SDC. Les essais portent sur l'évaluation des propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques.

Dès lors, le travail s'organise autour des chapitres suivants :

Le premier chapitre offre une synthèse bibliographique sur les granulats utilisés dans le béton. Il inclut un rappel des différents types de granulats et des processus de production, ainsi qu'un aperçu général du sable SDC, couvrant son origine, ses caractéristiques, sa fabrication et son rôle. Il présente également un rappel sur les différents types d'additions minérales et une introduction à la rhéologie des fluides. Enfin, il décrit les principaux rhéomètres utilisés pour déterminer les constantes rhéologiques du ciment et du béton.

Ensuite, le deuxième chapitre présente une synthèse des travaux consacrés à l'effet du sable SDC, des additions minérales, ainsi que de leur effet combiné sur les propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques du béton et du mortier.

Ce chapitre est suivi d'un troisième chapitre qui offre une description détaillée des matériaux et du matériel utilisés pour la réalisation des différents essais. Il fournit un aperçu sur les techniques expérimentales, la préparation des mélanges et les variables à étudier.

Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Des commentaires avec une comparaison avec d'autres résultats montrent clairement l'effet combiné entre le sable SDC et les additions minérales.

Enfin, une conclusion fondée et des recommandations pertinentes pour une meilleure maîtrise de ces produits dans l'industrie moderne achèvent ce travail.

Chapitre 1

**Revue bibliographique sur les granulats et
différents additions minérales**

1.1. Introduction

Ce chapitre énonce un examen approfondi des avancées actuelles dans la littérature scientifique relatives aux sables SDC, aux additions minérales et à la rhéologie des matériaux cimentaires. Dans le domaine de la construction et des travaux publics, les agrégats jouent un rôle prépondérant en tant que composants essentiels. Notamment, la demande en agrégats, spécifiquement en sable, revêt une importance significative pour les projets de construction. Cette demande soutenue a stimulé l'usage accru de ressources locales, telles que le sable SDC provenant des carrières, reconnu pour son aptitude à substituer avantageusement le sable SN. Dans le contexte de l'amélioration du béton, les avancées récentes dans le domaine de la technologie du béton démontrent que l'association simultanée d'additions minérales et superplastifiants tend généralement à réduire la quantité d'eau requise pour le mélange, entraînant ainsi une augmentation significative de la compacité du matériau. Par conséquent, ces innovations se traduisent par des améliorations considérables au niveau des performances physiques, mécaniques et de durabilité de ce nouveau type de béton et de mortier.

1.2. Granulats

Les granulats se définissent comme des agrégats de particules solides présentant une variété de dimensions, de formes et de compositions. Leur utilisation est principalement orientée vers la fabrication de matériaux tels que les mortiers et les bétons, ainsi que pour la constitution des différentes couches qui composent les chaussées routières, les assises et les ballasts des voies ferrées, ainsi que les remblais [1]. L'intégration des granulats dans les bétons et les mortiers vise à renforcer la résistance de la matrice cimentaire tout en réduisant la nécessité d'utiliser une quantité excessive de liant [2]. Cette pratique contribue à la création de structures plus durables et économiquement avantageuses, car elle optimise l'utilisation des matériaux et améliore les caractéristiques mécaniques du composite final [2].

1.2.1. Différents types de granulats

Les granulats employés dans la composition du béton proviennent soit de sources naturelles, artificielles ou recyclées. Ces granulats peuvent être d'origines éruptives comme le granite et basalte porphyres, sédimentaires comme le calcaire, grès, quartzites ou métamorphique tels que le gneiss et l'amphibolite.

1.2.1.1. Granulats Naturels

Les matériaux granulaires naturels d'origine minérale proviennent soit de dépôts de roches meubles (alluvions) soit de roches massives, ayant subies exclusivement des processus mécaniques tels que le concassage, le broyage, le criblage et le lavage. Indépendamment de leur composition minéralogique d'origine, ces matériaux peuvent être regroupés en deux classifications distinctes :

- Les granulats provenant des carrières de roches massives, désignés comme concassés, sont obtenus par des méthodes d'abattage et de concassage, leur attribuant ainsi une morphologie angulaire. Cette procédure illustre la production de sable SDC dans les sites de production de granulats.
- Les granulats provenant des gisements alluvionnaires, désignés comme roulés, ont acquis leur forme par le processus d'érosion. Ceux-ci représentent principalement des dépôts alluvionnaires présents dans un lit de rivière ou éventuellement en milieu marin [3].

1.2.1.2. Granulats Artificiels

Les granulats artificiels proviennent soit des résidus de l'industrie sidérurgique, soit sont intentionnellement produits pour satisfaire des besoins particuliers. Leur formation résulte d'un processus combinant des traitements thermiques et mécaniques appliqués aux roches ou aux minerais. Ces matériaux artificiels trouvent leur utilité dans la composition des bétons spécifiquement conçus pour des applications spécifiques.

1.2.1.3. Granulats Recyclés

Les granulats recyclés sont produits par le traitement des matériaux inorganiques préalablement intégrés dans des constructions, notamment ceux issus de structures démantelées à la suite de catastrophes naturelles telles que les séismes et les crues, ou encore par le processus naturel de vieillissement et de dégradation. Ce processus de recyclage engendre deux implications écologiques significatives: la diminution du volume des déchets et la conservation des ressources naturelles.

1.2.2. Processus de production des granulats

Les granulats résultent de l'exploitation des dépôts naturels, qu'ils proviennent de gisements alluvionnaires, marins ou de la fragmentation de roches massives telles que le calcaire ou les roches éruptives. Leur composition, leur morphologie et leurs propriétés varient en fonction des caractéristiques des gisements exploités et des méthodes de production employées. De plus, quelle que soit la nature des granulats, leur processus de production peut être divisé en trois étapes : l'extraction, le traitement ainsi que le chargement et le transport [2].

1.2.2.1. L'extraction

a) Granulats alluvionnaires

Les granulats alluvionnaires proviennent de l'érosion causée par les eaux des cours d'eau tels que les rivières, les fleuves et les oueds, sur divers types de roches. Par conséquent, il y a deux principales méthodes d'extraction, qui dépendent de la présence ou non d'eau dans le gisement. Tout d'abord, lorsque le gisement à exploiter se trouve au-dessus de la nappe phréatique (**Figure 1.1**), l'extraction est réalisée en surface à l'aide d'engins de travaux publics tels que les pelleteuses ou les chargeurs [4]. Ensuite, si une partie du gisement est localisée sous le niveau de l'eau (**figure 1.2**), l'extraction est réalisée au moyen d'engins adaptés à la situation tels que les dragues à godets, les dragues à benne, les dragues suceuses et les dragues à pelle [4].

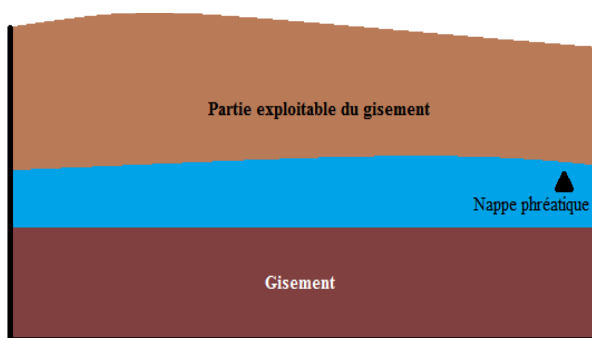


Figure 1.1 : Gisement situé en amont de la nappe phréatique [5].

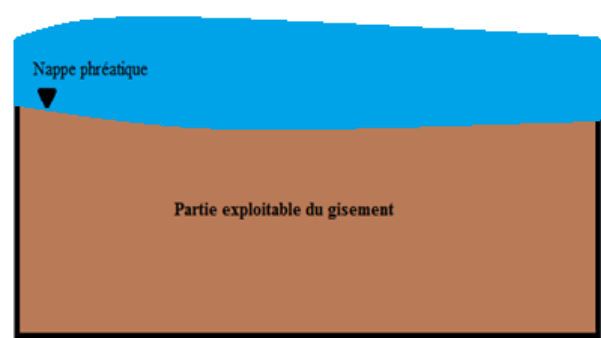


Figure 1.2 : Dépôt situé en dessous de la nappe phréatique [5].

b) Granulats concassés

La roche intacte et apte à être exploitée sur un site ne peut être atteinte qu'après avoir retiré la couche de terre végétale et les roches altérées (**Figure 1.3**). Ces deux composants seront entreposés sous forme de merlons en vue de leur réutilisation lors de la reconfiguration ultérieure du site [4].

Par la suite, l'opération d'abattage implique la fragmentation de la matière première à l'aide d'explosifs. Les détonations résultant des tirs de mine entraînent la dispersion d'une importante quantité de matériaux fragmentés, dont les dimensions peuvent dépasser un mètre dans leur étendue maximale. La proportion des particules fines engendrées durant le processus d'abattage peut atteindre jusqu'à 20 % [1]. Le processus d'abattage est constitué de trois phases distinctes :

- L'implantation et le forage des trous consistent en la réalisation méticuleuse de perforations dans les formations rocheuses massives, dont le diamètre de ces perforations varie en fonction du volume à fragmenter.
- Le chargement des explosifs est effectué par des experts en explosifs dans les trous de forage de manière méthodique.
- Tir : La phase finale de réduction dimensionnelle est entreprise à ce stade. Cette opération est exécutée de manière restreinte en raison des diverses nuisances qu'elle génère, notamment les nuisances sonores, les vibrations et les projections.

1.2.2.2. Chargement et Transport

Cette phase intermédiaire, située entre le processus d'extraction et celui de traitement, doit être exécutée de manière optimale afin de favoriser des économies substantielles, notamment en réduisant la distance entre les installations d'extraction et de traitement. Le déplacement des matériaux (qu'ils soient concassés ou alluvionnaires) est réalisé au moyen de convoyeurs à bandes ou d'engins roulants (**figure 1.4**).

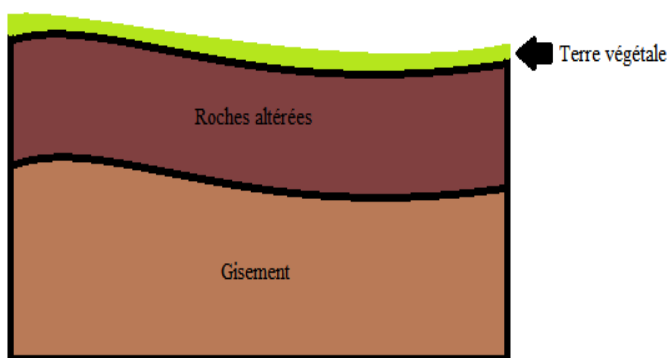


Figure 1.3 : Emplacement de la roche pouvant être exploitée [5].



Figure 1.4 : Engins roulants [5].

Par ailleurs, dans le contexte des exploitations immergées, le transport des matériaux alluvionnaires s'étend à divers autres moyens, notamment l'utilisation de bateaux ou de barges. L'intégration simultanée de plusieurs modes de transport est fréquemment identifiée comme la solution la plus efficace [6].

1.2.2.3. Traitement

Les granulats sont fabriqués dans cette phase ultime, à partir de roches ou d'alluvions extraites ayant des caractéristiques physiques et chimiques normalisées. Le processus de traitement se déroule au sein de la carrière, à l'aide d'installations automatisées et surveillées, et se divise en quatre phases distinctes.

- L'élimination des impuretés
- Le concassage / broyage
- Le criblage
- Le lavage


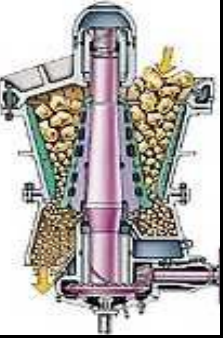

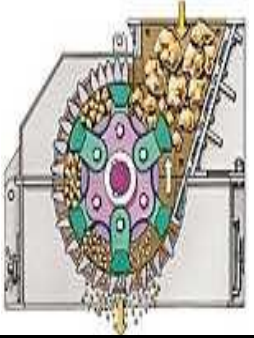
a) Élimination des impuretés :

Cette procédure vise à éliminer les matériaux terreux adhérent à la surface des grains, en utilisant un pré-cribleur vibrant (tamisage) ou bien, dans certaines situations, un pré-lavage. Les matériaux qui ont été traités sont alors pré-stockés à proximité du poste primaire afin de garantir un approvisionnement adéquat pour les phases subséquentes de l'installation.

b) Concassage / broyage

Le concassage et le broyage représentent des processus mécaniques visant à réduire les dimensions de la matière première (**figure 1.5**), Ces étapes sont réalisées en plusieurs phases au moyen d'équipements souvent désignés sous le terme de concasseurs (**Tableau 1.1**), dans le but de produire une gamme de granulats. Cette étape est reconnue comme un élément crucial pour la production efficace de sable et de graviers [3].

Tableau 1.1 : Les principaux appareils de concassage employé [7].

	Concasseur à mâchoire	Concasseur Giratoire	Concasseur à cylindre	Concasseur à percussion
Phénomène	Compression	Compression	Écrasement	Projection
Étape de concassage	Primaire	Primaire Secondaire Tertiaire	Secondaire Tertiaire Quaternaire	Secondaire Tertiaire Quaternaire
Illustration				

En fin, sur le plan énergétique et en réponse à la demande, il est important de mentionner que la production du sable SDC requiert une durée de broyage supérieure à celle nécessaire pour les graviers. Il convient également de souligner que la consommation énergétique est directement proportionnelle à la dimension des granulats ; ainsi, la fabrication de granulats d'un centimètre consomme mille fois plus d'énergie que celle de granulats de dix centimètres [1].



Figure 1.5 : Processus de concassage [5].

c) Criblage :

Le criblage constitue une méthode de tamisage destinée à la sélection et la classification des grains selon diverses tailles pour obtenir des granulométries standardisées telles que les gravillons et le sable. Cette opération s'effectue au moyen de grilles perforées, fabriquées en métal, en caoutchouc ou en tissus synthétiques, fréquemment désignées sous le terme de "cribles". On distingue principalement deux types de cribles vibrants : les cribles inclinés et les cribles horizontaux.

d) Lavage :

Le processus de lavage est conçu pour améliorer la propreté des matériaux, qu'ils soient concassés ou alluvionnaires, dans le but d'obtenir des granulats dénués d'impuretés, adaptés à la production de béton. La présence de poussières, d'argiles ou de particules végétales, qu'elles soient mélangées ou adhérentes aux granulats peut les rendre inappropriés pour les applications prévues. En effet, ces impuretés compromettent l'adhérence des granulats avec les liants tels que le ciment, la chaux, le laitier ou le bitume, essentiels à la fabrication de matériaux de construction robustes et durables.

L'opération de lavage des matériaux implique l'utilisation de volumes d'eau variables en fonction du niveau de pureté souhaité. Des installations de traitement ont été développées pour permettre la réutilisation des eaux de lavage, fonctionnant en circuit fermé afin de prévenir tout rejet vers l'environnement naturel.

1.2.2.4. Stockage et expédition

Après le traitement et le tri des granulats en fonction de leur granulométrie, les produits finis répondant aux spécifications requises seront dirigés vers des zones de stockage désignées (**figure1.6**). Les produits stockés sont acheminés vers leur destination en fonction des exigences du client et des moyens de transport disponibles. Par ailleurs, ces dernières années, on a observé une augmentation de la distance moyenne entre les carrières et les sites de consommation, comme indiqué par une étude récente. Par exemple, en Algérie, sur les 197 unités d'extraction de granulats, 49 % sont principalement situées dans l'est du pays [6].

En conséquence, le transport de ces matériaux peut parfois devenir particulièrement coûteux, notamment lorsque la plupart des unités de production sont concentrées en un seul endroit, comme c'est le cas dans l'est de l'Algérie [5].

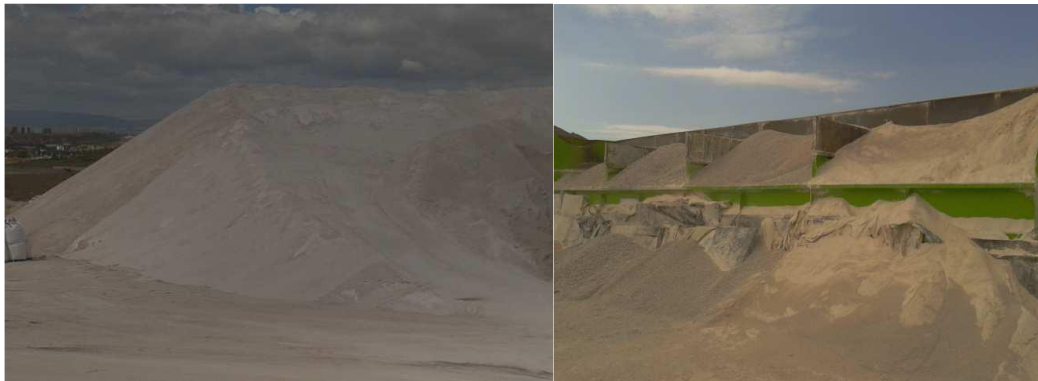


Figure 1.6 : Zones de stockage [5].

1.2.2.5. Suivi et contrôle de qualité

Tout au long de la période de production, une unité spécialisée, présente dans chaque carrière, effectue régulièrement des contrôles de qualité et de conformité des produits par le biais de divers tests, notamment sur la granulométrie, la forme, la dureté et la propreté. Toute anomalie identifiée par cette unité est immédiatement signalée à l'unité de production, qui doit prendre des mesures correctives pour garantir la qualité du produit final. Ces mesures peuvent inclure des ajustements du débit de broyage, des vérifications des paramètres de criblage et du

processus de lavage des granulats [6]. Le but de ces contrôles est d'assurer la conformité aux normes relatives à la santé, à la sécurité, à la traçabilité, à la protection du consommateur et à l'environnement, en vue d'obtenir l'homologation CE (Conformité Européenne) pour ces granulats [6].

1.2.3. Caractérisation des sables

1.2.3.1. Forme des grains

Les normes britanniques classifient les formes des grains de granulats conformément aux spécifications présentées dans le **tableau 1.2** [8].

Tableau 1.2 : La classification des grains selon les normes britanniques [8].

Classe	Description	Exemple
Ronde	Forme arrondie par l'attrition de l'eau	Sable déposé sur les rivières des fleuves, plages de mer, emporté par le vent
Irrégulière	Naturellement ou artificiellement irrégulière par l'attrition, et ayant des arrêtes arrondies	
Forme de plaquette	Matériaux dont l'épaisseur est relativement moins que les deux autres dimensions	
Anguleuse	Matériaux ayant des arêtes vives et surface rugueuse	Gravier et sable SDC, laitier concassé
Gravier et sable SDC, laitier concassé	Matériaux dont la longueur est considérablement plus grande que les deux autres dimensions	
Forme d'aiguillé et de plaquette	Matériaux ayant la longueur considérablement plus grande que la largeur et ce dernier est plus grand que l'épaisseur	

Les sables naturels se caractérisent par différentes formes, notamment anguleuses, sub-anguleuses, sub-arrondies, rondes et très rondes. Concernant les granulats artificiels, les concasseurs à mâchoires ont tendance à produire des granulats présentant de mauvaises formes telles que des éclats, des plaquettes et des éléments plats [9]. Le coefficient volumétrique, noté Cv (coefficient de forme), offre une indication précise sur la forme de l'élément considéré [10]. Pour un grain donné, ce coefficient est défini comme le rapport entre le volume V du grain et le volume V de la sphère circonscrite de diamètre d (où d représente la plus grande dimension du grain), comme illustré dans la **figure 1.7**.

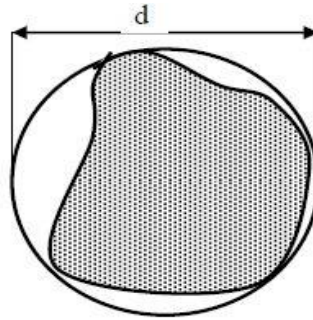


Figure 1.7 : Forme d'un granulat [11].

Pour un groupe de particules, il est constaté que :

$$C_v = \sum V_i / \sum (\pi d_i^3 / 6)$$

Un coefficient faible est associé à un granulat comportant plusieurs surfaces planes, tandis qu'un coefficient élevé est caractéristique d'un granulat de forme "cubique" ou "arrondi". Le concept de coefficient volumétrique est applicable à toutes les catégories de granulats, incluant le gravier et le sable. Cependant, pour le sable, le calcul du coefficient volumétrique est particulièrement complexe en raison de la petite taille de ses grains, en particulier de la fraction fine.

1.2.3.2. Adhérence au liant

L'adhérence constitue un paramètre significatif influençant la résistance à la traction des bétons et des mortiers, ainsi que leur résistance à la compression. Dans cette optique, l'utilisation prudente des granulats (gravier et sable) provenant de roches altérables et réactives au contact du ciment est recommandée. Les sulfates (gypse) et les sulfures (pyrite) sont responsables de la désagrégation du béton en provoquant une augmentation de volume des composants qui les contiennent. Le sable SDC présente une bonne adhérence avec le ciment dans les bétons et mortiers en raison de sa forme anguleuse et de ses surfaces rugueuses. L'interaction chimique entre les granulats et la pâte de ciment se manifeste particulièrement avec les sables provenant de calcaire et dolomitique [8].

1.2.3.3. Granularité (composition granulométrique)

La composition granulométrique se caractérise par les proportions des particules de différentes tailles. Les sables doivent présenter une granularité adéquate, il s'agit de proportions appropriées de particules de différentes dimensions, afin de minimiser la porosité.

Une granularité optimale est associée à une qualité satisfaisante du sable [12, 8]. La granulométrie d'un sable est établie en le tamisant à sec à travers un ensemble standard de tamis. Le processus implique la mesure du refus partiel et cumulatif sur chaque tamis, ainsi que du passage à travers chaque tamis. La distribution granulométrique est représentée par la courbe granulométrique, construite en utilisant les refus cumulés des tamisages. Cette courbe doit être intégralement située dans une plage normalisée, dénommée "fuseau de spécification", indiquant ainsi une granularité appropriée du sable. Le fuseau de spécification est énoncé dans les normes de différents pays, sous diverses formes [13].

1.2.3.4. Grosseur du sable

La dimension des particules de sable n'est pas déterminée par le diamètre maximal des grains, contrairement aux graviers et aux pierres concassées. Elle est généralement définie de manière approximative par la taille globale des grains. Ainsi, l'évaluation de la dimension du sable se fait habituellement par l'analyse de sa courbe granulométrique. Si la courbe se situe au-dessus du fuseau de spécification, le sable est qualifié de gros par contre si elle se trouve en dessous, le sable est considéré comme fin. Dans les anciens pays de l'Union Soviétique, la méthode prévalent pour évaluer la dimension des particules de sable impliquait le calcul du diamètre moyen de l'ensemble des grains. Cependant, dans de nombreux pays, la préférence pour l'utilisation du module de finesse comme indicateur de la granulométrie du sable est devenue prédominante [9]. Selon les travaux de Kômar [9], les sables sont classés en fonction de leur module de finesse :

- Sable gros $M_f > 2.5$;
- Sable moyen $M_f > 2.5 - 2$;
- Sable fin $M_f > 2 - 1.5$;
- Sable très fin $M_f > 1.5 - 1$.

En général, les sables moyens et gros sont préférés car ils produisent des bétons et des mortiers présentant de meilleures performances, même avec un dosage important en ciment [9].

1.2.3.5. Porosité du sable

Une granulométrie appropriée du sable assure une porosité minimale, reflétant ainsi sa haute qualité et son efficacité accrue dans l'application au béton et au mortier. Cette caractéristique permet de diminuer la consommation de ciment nécessaire pour combler les vides entre les particules de sable. En général, la fluidité du béton frais et la résistance du béton

durci sont d'autant plus élevées que la porosité du sable est plus faible. La porosité du sable, représentant l'ensemble des grains, peut être calculée comme suit :

$$P = (1 - \gamma_s / \rho_s) \cdot 100\%$$

Où :

- γ_s = Masse volumique spécifique des grains du sable;
- ρ_s = Masse volumique apparente du sable sec.

La masse volumique apparente du sable en état lâche est inférieure à celle en état compact. Par conséquent, la porosité du sable en état compact est toujours moindre que celle en état lâche [11].

1.2.3.6. Absorption

Lorsque l'eau entre en contact avec le sable, elle s'infiltré entre les grains et remplit les espaces vides. Le sable présente une capacité d'absorption d'eau notable, pouvant atteindre 20 à 25 % de son poids [9]. Les particules de sable fin, en raison de leur porosité élevée et de leur grande surface spécifique, ont une tendance accrue à absorber l'eau. Il est important de prendre en compte cette humidité, qui inclut l'eau contenue dans les particules de sable, sur leurs surfaces, ainsi que dans les interstices entre les grains

Lors de l'analyse de la composition du béton et du mortier, l'omission de cette mesure conduit à un excès d'eau ajoutée, ce qui peut diminuer la résistance du béton conformément au principe "la résistance dépend du rapport E/C" [14]. On introduit alors la notion de 'besoin en eau' du sable, définie comme suit [15] :

- La première étape consiste à déterminer le rapport eau sur ciment (E/C) nécessaire pour obtenir une pâte de ciment de consistance standard, caractérisée par un étalement de 170 mm lorsqu'elle est soumise à la vibration d'une table vibrante.
- Ensuite, le rapport (E/C) requis est déterminé pour un mortier de constitution pondérale 1:2 (une partie de ciment mélangée à deux parties de sable en poids (m)), fabriqué à partir du sable étudié et présentant une fluidité normale similaire à celle de la pâte de ciment (c'est-à-dire avec un étalement égal à 170 mm).
- Enfin, le calcul du besoin en eau (Be) s'effectue à l'aide de la relation suivante :

$$Be = [[(E/C) m - (E/C)C]/2] \times 100\%$$

Le besoin en eau représente un élément crucial permettant d'évaluer l'impact des granulats sur les principales caractéristiques du béton ou du mortier, comme la fluidité et la résistance [15].

1.2.3.7. Réactions alcalis-granulats

Cette problématique a été largement étudiée aux États-Unis et au Canada [10,16]. Le sable peut contenir de l'opale et des calcaires dolomitiques, qui peuvent réagir avec les alcalis présents dans le ciment pour former de nouveaux composés chimiques expansifs. Ces réactions peuvent générer des contraintes internes, susceptibles de provoquer des fissures dans le béton [16].

Pour que la réaction alcali-granulat se produise de manière optimale, deux critères doivent être remplis : premièrement, la présence de SiO₂ hydratée au sein du granulat est essentielle, et deuxièmement, le ciment utilisé pour le mortier et le béton doit contenir une quantité d'alcalins supérieure à 0.6% [17]. La concentration d'alcalins dans le ciment est spécifiée comme suit :

$$\% \text{Alcalin} = \text{NaO}_2 + 0.638 \text{K}_2\text{O}.$$

Les granulats (sables) sensibles aux alcalins sont classés comme réactifs, tandis que les autres sont désignés comme des granulats non réactifs. La réaction commence lorsque l'hydroxyde alcalin, issu des alcalis (Na₂O et K₂O) contenus dans le ciment, attaque la silice des granulats. Cette interaction produit un gel d'alcali-silicate qui, en absorbant l'eau, augmente de volume et provoque des fissures ainsi que la détérioration de la matrice de ciment, en raison de son potentiel d'expansion pratiquement illimité.

1.2.3.8. Impureté du sable

En général, les agrégats, notamment le sable, contiennent souvent diverses substances étrangères, appelées impuretés. Selon Kômar [9], ces impuretés se divisent en deux catégories: celles qui sont interdites et celles qui sont tolérées dans certaines limites.

- **L'impureté interdites**, telles que le charbon, le bois ou leurs dérivés (cendres, mâchefer, etc.), l'argile en morceaux et les scories, sont considérées comme des matériaux faibles et moins adhérents au ciment. Par conséquent, leur présence peut diminuer la résistance et altérer d'autres propriétés mécaniques du béton et du mortier.
- **L'impureté tolérée**, telles que les sulfates (gypse) et les sulfures (pyrite), sont converties en une mesure de teneur en SO₃, qui ne doit pas excéder 1% selon les normes admises. De plus, les substances solubles et les particules extra-fines sont acceptables tant qu'elles ne constituent pas plus de 5% du total.

Il est important de souligner que les particules fines comme l'argile et la poussière peuvent recouvrir les grains de sable, réduisant leur liaison avec le ciment dans le béton et le mortier. Cela peut affaiblir la résistance à la traction et à la flexion des matériaux. Ces particules fines augmentent aussi la demande en eau du sable, ce qui peut diminuer considérablement la résistance du béton et du mortier [9, 12, 16]. La teneur maximale autorisée de ces impuretés varie selon les normes de chaque pays.

- Dans les pays de l'ex-Union Soviétique, les normes imposaient que la teneur en argile et poussière ne dépasse pas 2% pour les bétons de classe inférieure à 30 (MPa), et 1% pour ceux de classe 30 ou plus. Pour les granulats issus de roches calcaires, les limites étaient de 3% pour les bétons de classe inférieure à 30 et de 2% pour ceux de classe supérieure ou égale à 30 [12].
- Selon la norme britannique (BS882 :1973), les limites admissibles pour l'argile, le limon et la poussière sont fixées à :
 - ✓ 15% (en poids) pour les sables issus du concassage de roches.
 - ✓ 3% (en poids) pour les sables naturels ou ceux obtenus par concassage de galets.
- Aux États-Unis, les normes autorisent certaines quantités de fines dans le béton, avec des ajustements basés sur le type de béton, comme ceux résistant à l'abrasion [8]. Pour le béton standard, seulement 3% du poids du sable peut être constitué de particules fines passant un tamis de 75 microns, alors que pour le béton soumis à l'abrasion, cette limite est augmentée à 5%. De plus, il existe des normes spécifiques qui exigent que la teneur en argile, limon et particules facilement décomposables ne dépasse pas 3 % dans le sable utilisé.
- La norme américaine ASTM (C33-78) [18] définit les seuils autorisés pour les particules friables dans le sable comme suit :
 - ✓ Pour les particules fragiles, la concentration maximale autorisée est de 3%.
 - ✓ Il n'y a pas de limite définie pour les particules tendres.
 - ✓ La concentration de charbon est limitée à 0.5 - 1 %.

Les argiles sont les contaminants les plus courants. Leur existence entraîne systématiquement une réduction de la résistance, il est donc impératif de respecter les limites spécifiques définies pour chaque procédé [18].

1.2.3.9. Choix des sables

Le processus de sélection des granulats (sable et gravier) pour la composition du béton et du mortier peut se faire selon plusieurs critères essentiels, notamment :

- La résistance face aux milieux corrosifs ;
- Les propriétés mécaniques du granulat et de la roche d'origine ;
- La capacité d'adhésion au liant [13].

D'après Gorisse [17], les principaux critères de choix des granulats incluent leur composition minéralogique, densité, propreté, résistance, forme, distribution granulométrique et résilience à la dégradation. Cependant, les choix peuvent être restreints par la distance entre la carrière et le chantier de construction, ainsi que par l'influence du coût de transport sur le prix total. Néanmoins, il est nécessaire d'opter pour une carrière plus distante pour satisfaire les spécifications techniques requises.

1.3. Sable de déchets de carrière

Le sable joue un rôle crucial dans la composition du béton, assurant une cohésion efficace entre le ciment et le gravier pour une structure granulaire homogène. Bien que largement utilisé dans la construction et les travaux publics, le sable SN en tant que granulat fin présente des défis logistiques et environnementaux majeurs, notamment en termes de coûts de transport élevés depuis les sources naturelles et d'épuisement des ressources à grande échelle. Ces problèmes entraînent des conséquences néfastes telles que la perte d'eau stockée dans les couches de sable, l'approfondissement des cours d'eau et la dégradation de la végétation riveraine. L'exploration de solutions alternatives, telles que l'utilisation de sables de concassage provenant de carrières, est vivement encouragée. De nombreuses études ont été entreprises pour explorer cette perspective [19].

1.3.1. Origine du sable SDC

Le sable SDC, est produit en récupérant la fraction granulométrique [0-6 mm] issue du processus de concassage de divers types de roches telles que le calcaire, la granodiorite, l'andésite, le granite, la dolomie et le basalte. Dans le sable SDC, les fines se réfèrent généralement aux fractions granulométriques les plus petites, tandis que dans les sables naturels, les fines peuvent être composées d'argile ou d'autres particules indésirables. Les sable SDC sont constitués de granulats concassés présentant une texture angulaire. Il est généralement reconnu que leur incorporation dans le béton favorise l'obtention de résistances mécaniques plus élevées. Cependant, leur utilisation se traduit souvent par une demande en eau

plus importante, en raison principalement de la diminution de la compacité liée à leur forme, leur rugosité et leur angulosité.

1.3.2. Caractéristiques du sable SDC

Les dimensions du sable SDC varient entre 0 et 6 mm. En raison de l'opération de broyage, ce type de sable présente des différences avec les sables naturels en termes de granulométrie, de forme et de texture des grains. De plus, il contient entre 10% et 20% de fines (les grains passant à travers un tamis de 80 μm). L'utilisation des sables dépend de la taille des grains et des propriétés intrinsèques (mécaniques et chimiques) de la roche d'origine. En général, ces sables sont utilisés pour les sous-fondations, les fondations et diverses applications liées au ciment, comme le béton, ainsi que pour la fabrication de mélanges bitumineux [19]. Par conséquent, les caractéristiques globales du sable SDC, telles que sa morphologie, sa dureté, sa densité, sa stabilité physique et chimique, ainsi que sa couleur, sont déterminées par l'origine de l'extraction [5].

1.3.3. Fabrication du sable SDC en Algérie

En 2005, l'Algérie a élaboré une instruction ministérielle (Loi n° 05-12, 2005) [20] visant à organiser la généralisation progressive de l'utilisation du sable SDC dans le secteur de la construction. Cette directive précise les spécifications techniques requises pour ces matériaux. Une cartographie nationale a été établie afin d'identifier les carrières pouvant fournir des sables SDC, et des autorisations minières ont été délivrées pour la fabrication exclusive de ce sable.

La politique visant à encourager la production et l'utilisation du sable SDC en complément du sable SN dans la construction, dans le but de préserver les sables des oueds et des plages, montre des résultats prometteurs. Depuis 2005, la production de sable SDC est en constante augmentation, répondant ainsi à la demande croissante du marché de la construction et des travaux publics. De 2.72 millions de mètres cubes de sable SDC produits en 2005, la production a presque quintuplé pour atteindre 13.36 millions de mètres cubes en 2009. Selon les données fournies par l'Agence Nationale du Patrimoine Minier (ANPM), la production nationale de sable SDC était de 14 millions de tonnes en 2013, tandis que les besoins en sable SDC étaient estimés à près de 30 millions de tonnes par an. Au cours de l'année 2008, une activité minière significative s'est déployée en Algérie, comptabilisant 637 exploitations minières impliquées dans la production de sable SDC réparties dans 41 wilayas. Parmi celles-ci, 603 installations étaient dédiées à la production simultanée d'agrégats et de sable SDC,

tandis que 34 exploitations minières se concentraient exclusivement sur la production de sable SDC, opérant dans quatre wilayas distinctes. En ce qui concerne la distribution de la production de sable SDC, les données présentées dans la **figure 1.8** identifient les dix wilayas les plus productrices en Algérie.

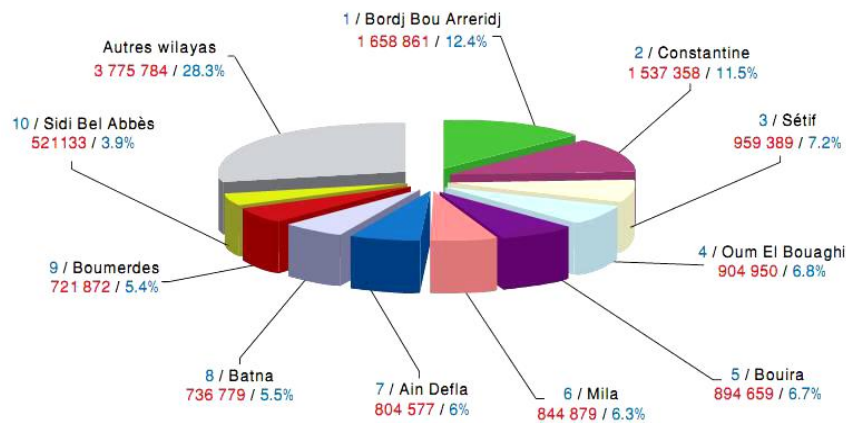


Figure 1.8 : Fabrication de sable SDC, en mètres cubes, en 2009 répartie parmi les dix wilayas les plus productrices [20].

1.3.4. Rôle du sable dans le béton et mortier

Dans la composition du béton, les granulats représentent approximativement trois quarts de son volume total, parmi lesquels le sable constitue près d'un tiers du volume global des granulats. Un sable de qualité inférieure affecte négativement la fabrication des bétons et des mortiers performants. Son utilisation peut avoir un impact significatif sur la stabilité et les capacités structurelles de ces matériaux. Le sable, en tant que granulat, est généralement moins coûteux que le ciment ; par conséquent, augmenter son dosage peut réduire les coûts associés à la production de béton et de mortier. Toutefois, la qualité supérieure du béton et du mortier est importante, il est donc essentiel de sélectionner un sable approprié pour leur fabrication [11].

1.4. Additions minérales

L'utilisation des additions minérales dans le ciment et le béton améliore les propriétés des ciments à l'état frais et durci. Ces additifs deviennent actifs en milieu alcalin, créant des hydrates qui renforcent la résistance mécanique et la durabilité des bétons. Leur distribution granulaire et leur activité de surface jouent un rôle clé dans la maniabilité du béton. Les additions minérales les plus fréquemment cités dans la littérature comprennent : le filler calcaire, le métakaolin, les cendres volantes, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle, la

poudre de verre, la poudre de marbre, le filler siliceux, le laitier granulé de haut fourneau, le sédiment de dragage et le schiste calciné [21].

Dans un premier temps, l'ajout de substances minérales modifie la structure et les interactions entre les éléments du squelette granulaire à l'état frais. Ensuite, l'hydratation du ciment est influencée par la présence de ces additifs, qui interagissent dans la formation des produits hydratés. Ces interactions peuvent se traduire par des synergies ou des antagonismes parmi les éléments et sont souvent difficiles à détecter, notamment en ce qui concerne les réactions alcalines, l'hydratation ralentie et d'autres phénomènes similaires [22].

1.4.1. Types d'additions minérales

Les matériaux minéraux qui remplacent le ciment peuvent être regroupés en deux catégories : les fines actives, comme la fumée de silice et la pouzzolane naturelle, et les fines inertes, comme le calcaire. En outre, le cadre réglementaire français identifie six substances minérales conformes à la définition « additions pour béton hydraulique », à savoir :

Additions de type I suivant la norme EN 206-1

- Les additions calcaires (NF P 18-308),
- Les additions siliceuses (NF P 18-509),
- Les fillers (NF P 18-501),

Additions de type II suivant la norme EN 206-1 (Figure 1.9) :

- La fumée de silice (NF P78-502),
- Les cendres volantes de houille (NF P18-505),
- Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P18-506)
- La pouzzolane naturelle (EN197-1)

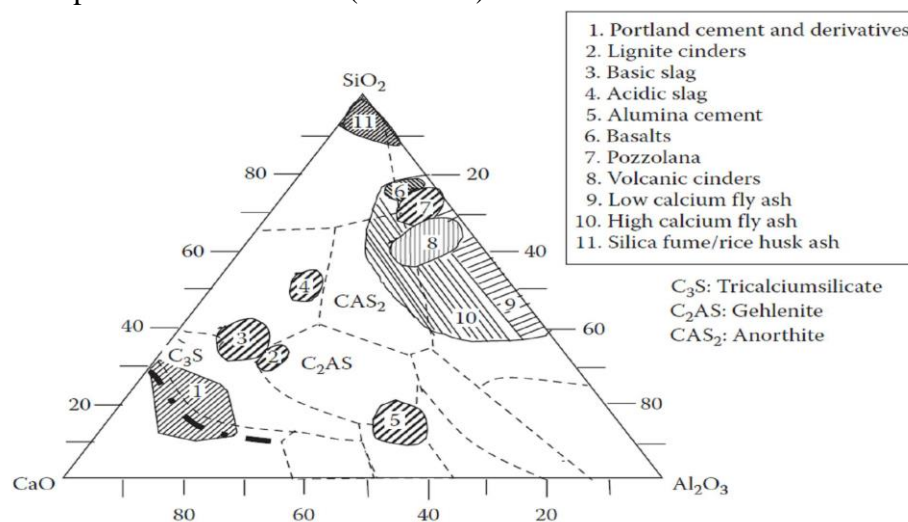


Figure 1.9: Représentation des principales additions de ciment sur le diagramme ternaire CaO-SiO₂-Al₂O₃ [23,24].

1.4.1.3. Fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit industriel obtenu lors du dépeussierage des fumées générées par les fours à arc électrique utilisés dans la production de silicium et d'autres alliages (**figure 1.10**). Principalement composée d'oxyde de silicium (SiO_2), elle présente une granulométrie fine qui améliore la compacité du ciment en remplissant les vides entre les grains. De plus, sa structure amorphe favorise une réaction pouzzolanique, consommant la chaux et favorisant la formation de nouveaux hydrates. La fumée de silice, également connue sous le nom de microsiline, a été introduite dans le ciment par des chercheurs norvégiens. Sellevold et *al.* [25] a démontré les améliorations des propriétés mécaniques résultant de cette addition. La première application de la fumée de silice dans le béton de construction a eu lieu en 1971 à la fonderie de Fiskaa en Norvège [26]. Depuis 1979, les ciments islandais contiennent généralement entre 6 et 7% de fumée de silice. Au Canada, plusieurs entreprises incorporent près de 7 à 8% de fumée de silice dans leurs ciments [27]. L'utilisation de cet additif est désormais répandue à l'échelle mondiale, en particulier dans la production de nouveaux bétons. Ses avantages ont été largement démontrés.



Figure 1.10 : Fumée de silice.

1.4.1.2. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane, issue de projections volcaniques, est principalement de composition basaltique. Sa couleur varie généralement du noir au rouge en fonction du degré d'oxydation du fer, qui se présente sous forme de magnétite ou d'hématite (**figure 1.11**). En effet, avant l'avènement du ciment Portland, les liants utilisés à l'échelle mondiale étaient principalement composés de pouzzolane et de chaux. Cependant, leur utilisation a diminué en raison de leurs faibles résistances et de la lenteur de leur prise. Heureusement, grâce à ses avantages techniques, la pouzzolane naturelle est devenue une alternative très pratique dans la construction, remplaçant ainsi le ciment Portland.

Le ciment à la pouzzolane a connu des développements significatifs au fil du temps. En Italie, il a été utilisé dès 1910, mais sa fabrication n'a pas été largement développée en raison de ses résistances mécaniques limitées. Par la suite, son utilisation a été limitée aux constructions maritimes. Cependant, avec des progrès dans la maîtrise de ses propriétés, le ciment à la pouzzolane a été normalisé dans le code Italien en 1929 [28]. Aux États-Unis, il a été employé pour la construction de l'aqueduc de Los Angeles entre 1910 et 1912, ainsi que pour le Golden Gate à San Francisco dans les années trente. En 1935, un ciment Portland à base de pouzzolane a été utilisé pour le barrage de Bonneville sur le fleuve Columbia. De nos jours, plusieurs pays, dont la Chine, l'Allemagne, la Grèce, la Turquie, le Mexique et l'Algérie, intègrent la pouzzolane naturelle dans leur industrie cimentaire.



Figure 1.11 : Pouzzolane naturelle.

1.4.1.1. Laitier granulé des hauts fourneaux

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit des usines sidérurgiques, principalement composé de silicates et d'aluminosilicates de calcium, ainsi que d'autres substances minérales. Après sa sortie du four, il subit un refroidissement rapide grâce à un jet d'eau, ce qui lui confère une structure vitreuse capable de réagir en présence de l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment (**figure 1.12**). L'utilisation de ce sous-produit remonte à plus d'un siècle, avec la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892), puis aux États-Unis (1896) [29].

En effet, l'utilisation du ciment au laitier a initialement posé des problèmes en raison de sa faible résistance. Toutefois, au fil du temps, ces préoccupations ont été atténuées grâce à une optimisation des propriétés chimiques, du taux de verre et de son activité. Cette amélioration a contribué à la popularité actuelle du ciment au laitier, dont les avantages incluent de bonnes performances mécaniques, une économie de coûts et une empreinte écologique favorable.

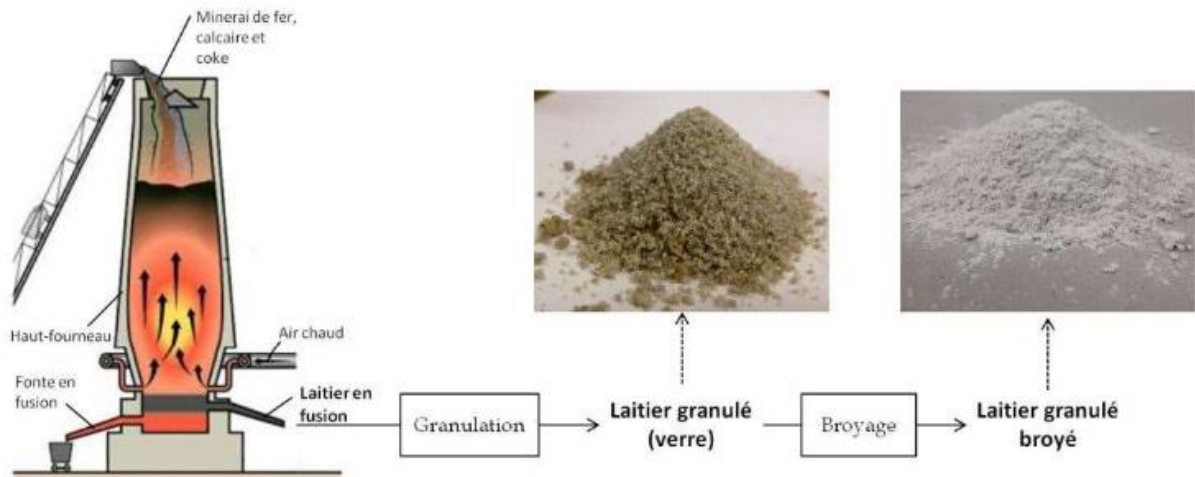


Figure 1.12: Etapes du processus de fabrication des laitiers de haut-fourneaux [30].

1.4.1.4. Fillers calcaires

Le calcaire, une roche sédimentaire principalement constituée de carbonate de calcium (CaCO_3), a été intégré à la production de ciments après les deux guerres mondiales afin d'accroître la capacité de production du ciment et de répondre à la demande croissante pour ce matériau (**figure 1.13**). Son utilisation a conduit à des résultats encourageants en termes de résistance et de durabilité. Par la suite, diverses études ont démontré que l'incorporation de fillers calcaires présente des avantages notables en termes de facilité de manipulation des liants hydrauliques et de caractéristiques mécaniques des bétons. En 1960, le Code Espagnol a autorisé l'incorporation de plus de 10% de filler dans les ciments de faible classe. En 1975, ce code a été révisé pour permettre l'ajout de jusqu'à 35% de calcaire. En 1979, une nouvelle Norme Française a élargi les possibilités en permettant d'utiliser jusqu'à 35% de laitier, de cendres volantes, de calcaire et de pouzzolane naturelle pour créer un ciment composé appelé CPJ. Dans les années 90, plusieurs pays européens ont adapté leurs normes pour autoriser l'utilisation du calcaire dans la production de ciment. En 2000, la Norme Européenne EN 197-1 a défini quatre types de ciments contenant du calcaire parmi les 27 ciments normalisés. Ces ciments à base de calcaire représentent environ 24% de la production européenne, soit environ 40 millions de tonnes. Il est vrai que les fillers, tels que le calcaire, ont longtemps été considérés comme des agents de remplissage qui améliorent la porosité du ciment. Cependant, plusieurs recherches [31,32] suggèrent qu'ils peuvent également réagir chimiquement avec le ciment au niveau de la surface des grains de calcite.



Figure 1.13: Roche de calcaires.

1.4.1.5. Cendres volantes

Les cendres volantes (**figure 1.14**) sont en effet des particules fines résultant de l'incinération du charbon dans les installations thermiques. Leur morphologie sphérique et leur diamètre compris entre 1 et 150 μm les rendent intéressantes pour l'industrie du ciment. En 1937, Davis, chercheur à l'Université de Californie, a présenté une étude sur l'incorporation des cendres volantes dans le ciment. La première application pratique de ces cendres a eu lieu lors de la construction du barrage de Hungry Horse aux États-Unis en 1948 [27, 33]. Depuis, la recherche dans ce domaine a considérablement progressé, et l'utilisation des cendres volantes s'est généralisée en raison des améliorations qu'elles apportent au béton et des économies qu'elles permettent.



Figure 1.14: Cendres volantes.

1.4.2. Avantages des additions minérales

Les additions minérales ont un impact significatif sur la structure inter-granulaire des composés de mortier et de béton. Leur fonctionnalité se manifeste sous forme de micro-agrégats, ce qui entraîne une réduction substantielle de la porosité inhérente aux matériaux. En conséquence, ces additifs contribuent à optimiser les propriétés des mortiers et des bétons, notamment en améliorant leur maniabilité, leur résistance, et leur durabilité. Par ailleurs, il est important de noter que, dans la plupart des études, les additions minérales ont été incorporées en substituant une partie du ciment. En revanche, dans le cas des bétons spéciaux tels que le

béton à haute performance ou le béton autoplaçant, les additions minérales sont employées afin d'augmenter les propriétés mécaniques ou rhéologiques sans modifier la proportion de ciment utilisée [22].

1.4.2.1. Avantages techniques

L'intégration de particules de dimensions très fines dans un béton améliore sa maniabilité et réduit la quantité d'eau nécessaire pour atteindre une consistance donnée, à l'exception des matériaux présentant une très grande surface active, tels que les fumées de silice. L'incorporation des additions minérales entraîne généralement une augmentation de la résistance, de l'imperméabilité et de la résistance aux agressions chimiques. De plus, en raison de leur capacité à réduire la libération de chaleur lors de l'hydratation des mélanges de ciment, les additions minérales contribuent aussi à améliorer la résistance à la fissuration [34].

1.4.2.2. Avantages économiques

Le ciment Portland représente la composante la plus coûteuse au sein d'un mélange de béton, étant donné son caractère énergivore. Les additions minérales, tels que les sous-produits industriels, offrent une solution plus économique et écologique. Néanmoins, la distance entre la source des matériaux de substitution et les frais de transport élevés qui en découlent peuvent annuler leurs avantages économiques envisageables. L'absence de solutions de stockage abordables constitue parfois un obstacle à leur emploi sur certains marchés. Bien que difficile à prévoir, le coût des additions minérales pourrait lutter par rapport à celui du ciment si la demande en béton restait constante, dans un contexte où le dioxyde de carbone menace notre environnement [35].

1.4.2.3. Avantages écologiques

La fabrication d'une tonne de ciment Portland entraîne la libération d'une quantité presque équivalente de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. Par conséquent, la substitution du ciment Portland par des additions minérales permet de réduire proportionnellement les émissions de CO₂. En règle générale, l'emploi de cendres volantes et de fumées de silice en tant que ajouts cimentaires ne requiert pas un traitement énergétique intensif. En revanche, la production de laitier granulé de haut fourneau entraîne l'émission d'environ 0.07 tonne de CO₂ par tonne de laitier granulé. En outre, il convient de prendre en compte les émissions de CO₂ générées par le transport des additions jusqu'au site de construction. Des études indiquent que le transport d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1000 km, par camion et chemin de fer, libère environ 0.022 tonne de CO₂ [34].

1.5. Rhéologie

La rhéologie, qui étudie les propriétés d'écoulement des matériaux cimentaires, joue un rôle essentiel dans la technologie de la construction. Le terme "rhéologie", proposé en 1928 par Eugene Bingham (1878-1945) et accepté lors de la création de « l'American Society of Rheology » en 1929, désigne la science qui explore les déformations et l'écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte. Alors que les comportements d'un solide élastique parfait (Robert Hooke en 1678) et d'un fluide newtonien (Isaac Newton en 1700) sont bien compris, la rhéologie permet d'explorer une gamme plus large de comportements pour les mortiers et bétons à l'état frais [35,36]. Cette étude reflète l'aptitude physique de ces matériaux à se déplacer sous leur propre poids. Dans cette section, les concepts fondamentaux de la rhéologie seront exposés en énonçant les caractéristiques rhéologiques inhérentes aux bétons et mortiers, à savoir la contrainte de cisaillement (τ), le taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$), le seuil de cisaillement (τ_0), ainsi que la viscosité plastique (μ). De plus, les appareils de mesure existants permettant d'évaluer ces paramètres seront abordés.

1.5.1. Viscosité plastique

En considérant un liquide au repos, comme un ensemble de couches moléculaires parallèles soumises à une contrainte tangentielle. Lorsqu'une de ces couches se déplace par rapport à celle qui lui est sous-jacente (**figure 1.15**), le frottement permanent entre les molécules de la couche inférieure et celles de la couche supérieure entraîne un transfert partiel du mouvement. Ce phénomène de retard, dû à la friction interne entre les molécules des deux couches, est appelé viscosité μ (Pa.s). De ce fait, la viscosité représente la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. Elle est caractérisée par un coefficient de viscosité qui joue un rôle essentiel dans la rhéologie des fluides. Pour certains fluides, la connaissance de ce coefficient suffit à décrire précisément leur comportement rhéologique.

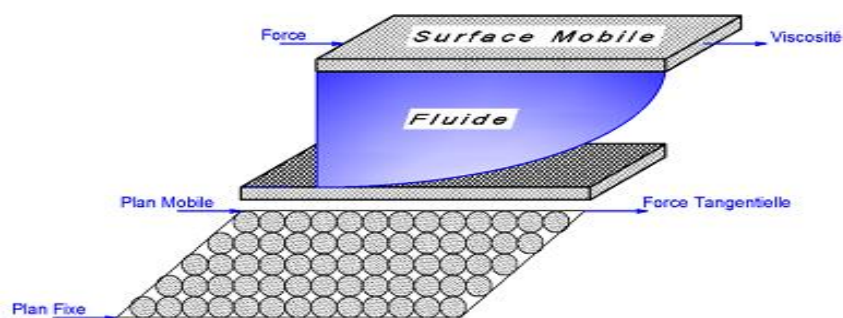


Figure 1.15 : Schéma glissement des couches [36].

1.5.2. Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement représente la force (F) appliquée de manière parallèle à la surface (S) (**figure 1.16**). Elle est déterminée par l'équation 1.1 et exprimée en unités de Pascals.

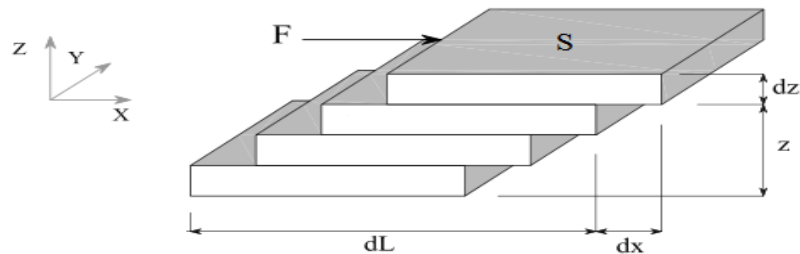


Figure 1.16 : Déformation résultant par la mise en cisaillement d'un fluide.

$$\tau = \frac{F}{S} \tag{1.1}$$

Où

F : La projection de la force tangentielle de frottement.

S : Surface d'un élément dans une couche soumise à un cisaillement.

1.5.3. Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement γ , également appelée gradient de vitesse, caractérise la variation de la vitesse entre les couches limites. Elle est définie comme le quotient de la vitesse (V) et de l'épaisseur (e) de l'échantillon (**figure 1.17**). Puisque la vitesse est une longueur divisée par un temps, ce quotient s'exprime en inverse de seconde (s^{-1}). La valeur de la vitesse de cisaillement dépend non seulement de la vitesse de déplacement de la couche mobile, mais aussi de l'épaisseur (e) cisailée. Si cette dernière est faible, des vitesses de cisaillement très élevées peuvent être atteintes, même avec des vitesses de déplacement relativement faibles.

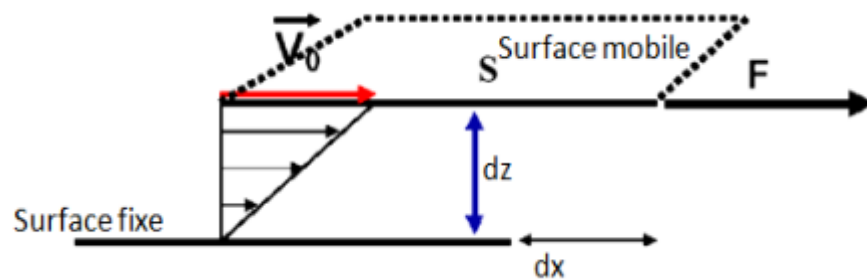


Figure 1.17 : Schéma de vitesse de cisaillement.

1.5.4. Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement τ_0 est la contrainte de cisaillement minimale qu'un fluide doit atteindre pour s'écouler lorsqu'il est soumis à une déformation de cisaillement. En dessous de cette valeur, le fluide se comporte comme un pseudo-solide, sans déformations permanentes. De Larrard et *al.* [37] ont souligné que le seuil de cisaillement τ_0 (**Pa**) représente la manifestation macroscopique du frottement entre les grains constituant le squelette granulaire du béton, incluant les grains de ciment et les particules ultrafines (**figure 1.18**).

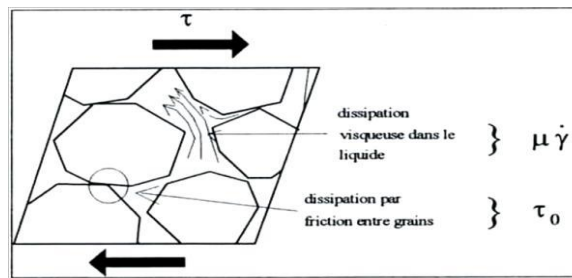


Figure 1.18: Apports des phases solides et liquide à la résistance au cisaillement du béton [37].

1.5.5. Appareils de mesures rhéologiques

Les rhéomètres sont des instruments utilisés pour mesurer les couples de cisaillement ou directement le seuil de cisaillement des matériaux à base de ciment. Ils permettent également d'établir les courbes d'écoulement ($\tau, \dot{\gamma}$) des matériaux testés, à partir desquelles on peut déterminer la viscosité et déduire le comportement du béton ou du mortier. Les rhéomètres utilisés sont équipés de géométries rotatives et se distinguent par leur mode de fonctionnement : cylindres coaxiaux, cône plan, plan-plan ou plans parallèles (**figure 1.19**). Ils se composent d'un récipient immobile dans lequel le béton étudié est versé, ainsi que d'un axe rotatif équipé d'un dispositif de mesure (agitateur), souvent muni d'une pale. La rotation de cette pale permet d'appliquer un cisaillement au béton testé. Le **tableau 1.3** regroupe les différentes variantes de rhéomètres disponibles.

La configuration géométrique des rhéomètres varie en fonction du matériau cimentaire soumis à l'analyse. Par exemple, les dimensions des rhéomètres destinés à l'étude du mortier diffèrent de ceux conçus pour le béton. Cette différence est due à la dépendance de la géométrie par rapport à la taille maximale des particules. Pour garantir la précision et la validité des mesures rhéologiques, il est recommandé que l'espace entre la pale et le conteneur soit dix fois supérieur au diamètre des plus grosses particules. De plus, le rapport entre le rayon du cylindre externe et celui du cylindre interne ne doit pas dépasser 2, conformément aux directives de Banfill [38].

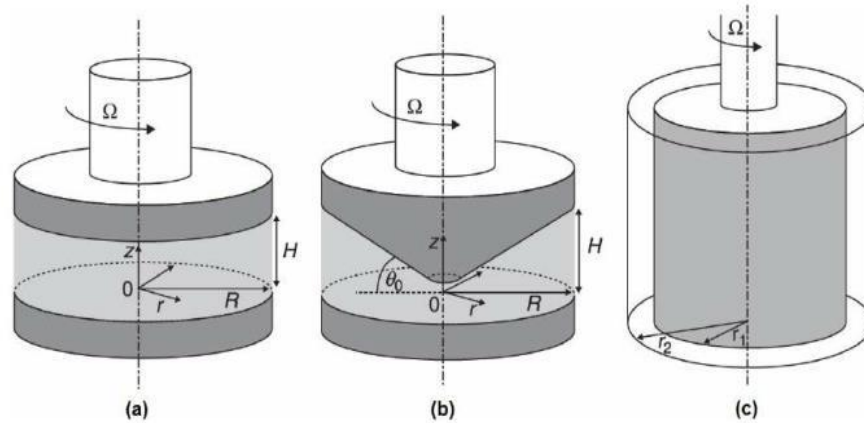



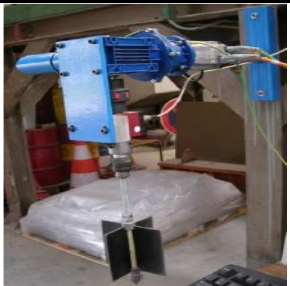



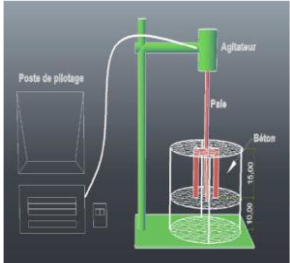



Figure 1.19: Rhéomètres rotatifs : (a) Plan-Plan, (b) Cône-Plan, (c) Cylindres coaxiaux [39].

Tableau 1.3 : Rhéomètres à béton [40].

Rhéomètre agitateur-malaxeur	Rhéomètre à deux cylindres coaxiaux	Rhéomètre à cylindres coaxiaux-plaque parallèle	Rhéomètre de type Couette
 <p>Rhéomètre two-point</p>	 <p>Viscosimètre ConTec BML 3</p>	 <p>BTRhéom</p>	 <p>Rhéomètre de Estellé</p>
 <p>IBB (Innovation Béton Beaupré)</p>	 <p>CEMAGREF-IMG</p>	 <p>COPLATE 5 – MARK III Wallevik</p>	 <p>Rhéomètre de Soualhi</p>
 <p>ICARKoehler</p>			

Le **tableau 1.4** présente une comparaison des principaux dispositifs de mesure de la rhéologie appliqués aux bétons. Récemment, plusieurs campagnes d’essais ont été menées pour évaluer les performances des différents rhéomètres, notamment le BML, le BTRhéom, l’IBB, le Cemagref-IMG et le Two Point Test [41]. Cette étude a impliqué la réalisation de 17 échantillons de béton, principalement des bétons autoplaçants, ainsi que 5 échantillons de mortier autoplaçant. Les conclusions de cette investigation sont présentées dans la **figure 1.20**.

Tableau 1.4 : Analyse comparative des divers rhéomètres pour béton [42].

Rhéomètre	Géométrie de mesure	Contenance (en L)	Type de bétons mesurés
Two-point test	Outil-mélangeur	10	Aff > 100 mm
BML	Cylindres coaxiaux	17	Pate de ciment,BAPs,BO
BTRhéom	Plan-plan	7	Aff > 100 mm
Cemagref	Cylindres coaxiaux	500	-
IBB	Mélangeur planétaire en H	21	Aff > ou égal à 20mm

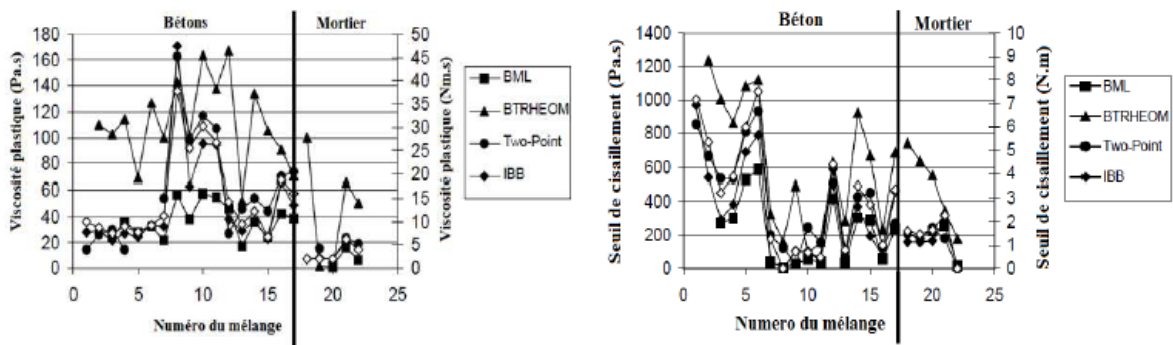


Figure 1.20 : Données sur la viscosité plastique et les seuils de cisaillement identifiés lors de l'étude des bétons et des mortiers à l'aide de divers instruments [41].

1.6 Conclusion

Ce chapitre offre un aperçu des connaissances actuelles sur le sable SDC, les additions minérales et la rhéologie. La littérature révèle une variété de données publiées concernant ces matériaux. En conséquence, l’utilisation du sable SDC, et les additions minérales dans la composition des bétons et des mortiers est envisageable. Ces matériaux peuvent apporter des propriétés spécifiques et améliorer la performance des mélanges. Les sable SDC sont des éléments clés dans le domaine de la construction. Leur variété de tailles et de formes permet des utilisations spécifiques, et ils apportent des avantages significatifs en termes de résistance et de durabilité des matériaux. Pour résumer, le rôle des sables SDC est essentiel dans le

domaine de la construction, car ils contribuent à la construction de structures solides et durables.

Les additions jouent un rôle important dans l'amélioration des caractéristiques des matériaux de construction, en particulier du mortier et béton. L'intégration de ces éléments permet d'accroître la résistance, la durabilité et d'autres caractéristiques essentielles des structures. De plus, les additions minérales présentent des bénéfices écologiques en diminuant la quantité de ciment requise, ce qui aide à réduire les émissions de dioxyde de carbone. Ils constituent donc une approche durable et économiquement bénéfique dans le secteur de la construction si elles sont utilisées de manière judicieuse.

Il est crucial d'analyser la rhéologie des bétons et mortiers afin de saisir et surveiller leur comportement lors de leur utilisation et de leur durcissement. Les données de la rhéologie sont précieuses pour évaluer la fluidité, la viscosité et la capacité de déformation de ces matériaux, ce qui permet d'améliorer leur formulation et leur utilisation sur les chantiers. La maîtrise de la rhéologie est essentielle pour assurer non seulement des performances à l'état frais, mais aussi pour garantir de meilleures performances à l'état durci. Ainsi, l'exploration constante de ce domaine favorise l'évolution des normes et des méthodes de construction, ce qui conduit à des bétons plus performants et durables, qui répondent aux besoins croissants du secteur de la construction.

Chapitre 2

**Apport des additions minérales sur les propriétés
du mortier et béton à base de sable SDC**

2.1. Introduction

Les agrégats comme le sable et le gravier, qu'ils soient naturels ou recyclés à partir de matériaux de démolition, jouent un rôle fondamental dans la construction et les travaux publics. La consommation d'agrégats, et plus particulièrement le sable, est importante dans les grands travaux publics, les infrastructures et les réseaux de toutes sortes. Cette forte consommation a encouragé l'utilisation des matériaux recyclés issus des carrières qui sont plus adaptés pour remplacer positivement le sable SN et pour fabriquer des bétons économiques et durables. Le sable est un élément essentiel dans la composition du béton. Il assure une continuité granulaire entre le ciment et le gravier, favorisant ainsi la cohésion du béton. Cependant, l'utilisation du sable SN comme granulats fin dans le béton ou le mortier peut être coûteuse en raison des frais de transport depuis les sources naturelles. De plus, l'épuisement des ressources de sable SN à grande échelle pose des problèmes environnementaux [17]. Le développement récent dans le domaine de la technologie du béton montre que l'incorporation d'additions minérales conduit généralement à la réduction de la quantité d'eau nécessaire au gâchage et à l'augmentation conséquente de la compacité du matériau. Ainsi, des améliorations très significatives des performances mécaniques, physiques et de durabilité caractérisent ce nouveau béton.

2.2. Apport du sable de déchets de carrière

2.2.1. Ouvrabilité

Le concassage des roches dans les carrières de production de gravier produit des quantités considérables de déchets constitués de sables à forte teneur en fines, rendant leur recyclage nécessaire. Leur stockage, ainsi que leur présence abondante dans la nature, représentent un problème environnemental majeur. Plusieurs chercheurs [5,17] ont étudié l'utilisation de ce sous-produit comme substitut au sable SN dans la production de mortiers et de bétons. Cette pratique contribue à la conservation des ressources naturelles et à la diminution des surfaces dédiées aux décharges.

L'ouvrabilité du béton se réfère à sa capacité à être facilement mis en œuvre, notamment lors du remplissage des coffrages et de l'enrobage des armatures. Elle caractérise la fluidité du béton avant qu'il ne durcisse. Plusieurs recherches [43] ont étudié l'ouvrabilité du béton contenant du sable SDC. Il a été constaté que l'ouvrabilité du béton fabriqué avec du sable SDC est inférieur (de 6 à 11%) à celle du béton fabriqué avec du sable SN. Les

meilleures performances en termes d'ouvrabilité sont obtenues en incorporant 50% de sable SDC par rapport au sable roulé [44]. Nanda et *al.* [45] ont étudié l'affaissement des bétons à base du sable SDC et ils ont constaté que l'affaissement diminue à mesure que le pourcentage de sable SDC augmente. Vinayak et Popat [46] ont observé que 60% de sable SDC peut produire un béton avec une ouvrabilité satisfaisante. Bouziani [47] rapporte que le mélange composé de 80% de sable SDC et de 20% de sable SN dans un béton auto-plaçant génère un étalement adéquat de 77 cm. D'autres chercheurs [48,49] ont confirmé que l'ouvrabilité des bétons contenant du sable SDC est inférieure à celle des bétons à base de sable SN. Cette disparité s'explique principalement par la forme angulaire et la morphologie des grains concassés, qui diffèrent de celles du sable SN.

Al-Ameeri et *al.* [50] ont étudié l'influence de la source minéralogique de trois types de sable SDC (granit, calcaire et mâchefers) sur le comportement du béton. Les résultats ont montré que le sable SDC issu de granit était le plus avantageux en termes d'ouvrabilité. Cette observation a été attribuée à la morphologie des particules de sable de granit. En effet, la texture et la forme des particules de sable SDC jouent un rôle essentiel dans l'association entre la pâte de ciment et les granulats [51].

Belaidi et *al.* [52] ont étudié l'effet de différents pourcentages de substitution volumique (25%, 50%, 75%) du sable SN par du sable SDC sur l'affaissement du béton. Les résultats ont montré que l'augmentation des particules fines entraîne une diminution de l'affaissement. Cette observation s'explique par l'augmentation de la finesse et de la surface spécifique des particules fines, ce qui conduit à une augmentation du volume de pâte cimentaire pour maintenir les mêmes propriétés d'écoulement.

Shi et *al.* [53] ont confirmé que lorsque le sable SN est remplacé par du sable SDC, l'affaissement du béton diminue en fonction de la teneur en sable SDC. Cette diminution est justifiée par l'augmentation du taux de fines de calcaire contenue dans ce sable, indépendamment du type de ciment utilisé [54]. De même, Bonavetti et *al.* [55] ont étudié comment le pourcentage de fines calcaires dans le sable affecte les propriétés physiques et mécaniques des mortiers. Ils ont utilisé trois types de fines : le quartz, le granit et le calcaire. Les résultats indiquent que la demande en eau des mortiers augmente proportionnellement avec la concentration de fines, surtout pour les fines de calcaire et de granit. Cette augmentation devient particulièrement marquée lorsque le pourcentage de fines dépasse 10%. Ce phénomène semble être attribuable à la grande surface spécifique des fines. Les travaux de Benabed et *al.* [56] ont montré que l'ajout de 10% à 15% de fines calcaires au mélange de mortier améliore

l'ouvrabilité. Cependant, lorsque le taux de sable SDC dépasse 15%, une diminution significative de la valeur d'étalement et une augmentation du temps d'écoulement sont observées, comme illustré sur la **figure 2.1**. Ils ont expliqué cet effet par la finesse et la grande surface spécifique des particules fines, qui nécessitent plus d'eau pour être humidifiées. En revanche, plusieurs études [57-60] ont montré que l'ajout de 5% à 10% de fines calcaires peut améliorer l'ouvrabilité du béton. Skender [61] a étudié l'influence des fines calcaires substituées au sable SDC, en utilisant des pourcentages de fines calcaires de 0 %, 5%, 15% et 25%. Les résultats indiquent que la maniabilité du béton diminue à mesure que le taux de fines calcaires augmente, indépendamment du type de ciment utilisé.

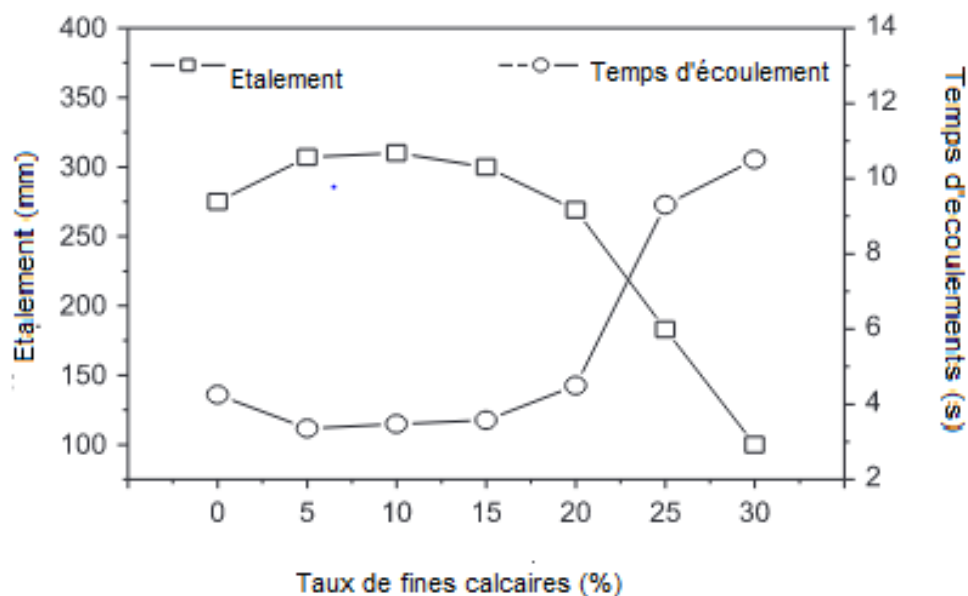


Figure 2.1: Variation de l'étalement et du temps d'écoulement du mortier en fonction du pourcentage de fines calcaires [56].

2.2.2. Paramètres rhéologiques

Les paramètres rhéologiques définissent les propriétés d'écoulement et de déformation des matériaux soumis à des contraintes. Leur influence sur le béton à base de sable SDC affecte la fluidité, la consistance et la mise en place du mélange. La forme angulaire et la granulométrie du sable influencent la viscosité et la plasticité du mélange. Une adaptation précise de ces paramètres est essentielle pour obtenir un béton homogène et performant. Les travaux de Martinie et *al.* [62], ont révélé qu'au cours de la phase de coulage du béton, un effet se produit, entraînant des dissipations d'énergie supplémentaires. Lorsque des grains, comme le sable, sont ajoutés à la pâte de ciment, la viscosité de l'ensemble augmente par rapport à celle de la pâte de ciment seule. La viscosité du béton est influencée par la fraction volumique des inclusions. Le mouvement des particules dans la pâte de ciment provoque un écoulement

ou une déformation, ce qui peut affecter les vitesses d'écoulement et le déplacement d'autres particules dans le matériau.

Benabed *et al.* [56] affirment que le sable SDC contenant 10 à 15% de fines calcaires peut être utilisé dans la production de mortier auto-plaçant présentant de bonnes propriétés rhéologiques. De même, certains auteurs [63] ont montré que la demande en eau exprimée par les paramètres rhéologiques des mortiers à base de sable SDC était légèrement plus élevée, et dans certains cas, beaucoup plus élevée que celle des mortiers utilisant du sable SN. L'utilisation d'un superplastifiant performant permet de diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des mortiers. Saffidine *et al.* [64] ont montré que l'utilisation du sable SDC entraîne une augmentation de 50% des propriétés rhéologiques du mortier par rapport à l'utilisation du sable SN. En outre, une augmentation de la concentration volumique des fines dans le sable SDC conduit à un béton avec un seuil de cisaillement et une viscosité plastique élevés [65]. Selon Westerholm *et al.* [65] le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du mortier pour différents granulats fins augmentent respectivement de 96 Pa à 550 Pa et de 1.3 Pa.s à 8.8 Pa.s. Ils ont conclu que le mortier avec du sable SDC présente généralement une viscosité plastique plus élevée que le mortier de référence avec du sable SN. De même, Esping [66] a révélé que l'augmentation de la surface spécifique des fillers calcaires de 2000 à 6000 m²/kg peut doubler le seuil de cisaillement et augmenter la viscosité plastique comme le montre la **figure 2.2**.

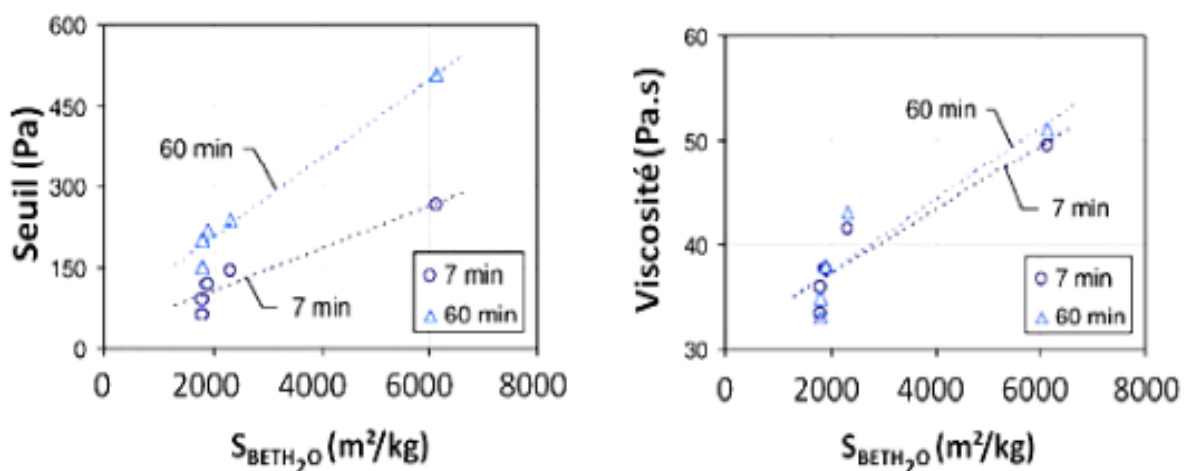


Figure 2.2 : Évolution des propriétés rhéologiques des BAP en fonction de la surface spécifique des fillers calcaires [66].

2.2.3. Absorption d'eau

L'absorption d'eau dans le béton est la capacité du matériau à absorber et retenir l'eau dans ses pores. Elle influence la porosité, la durabilité et la résistance du béton. La forme angulaire et la texture rugueuse du sable SDC, influençant la compacité du béton. Bederina *et al.* [67] ont montré que l'absorption d'eau dans le sable SDC est de l'ordre de 4.3% au lieu de 0.58% pour le sable SN. Plusieurs recherches [68,69] ont été menées sur l'effet du sable SDC sur la demande en eau et en ciment. L'étude de Nanda *et al.* [45], sur l'effet des fines de sable SDC sur l'absorption, a révélé que le béton contenant 75% de sable SDC absorbe 7% d'eau alors que celui sans sable SDC n'absorbe de 1.7%. Les résultats illustrés sur la **figure 2.3** montre que l'ajout de 15 % de fines calcaires en substitution du sable SDC a un effet insignifiant sur l'absorption d'eau par capillarité. Toutefois, les mélanges de béton contenant du ciment, avec ou sans fines, présentent des valeurs d'absorption capillaire d'eau supérieures à celles des autres mélanges.

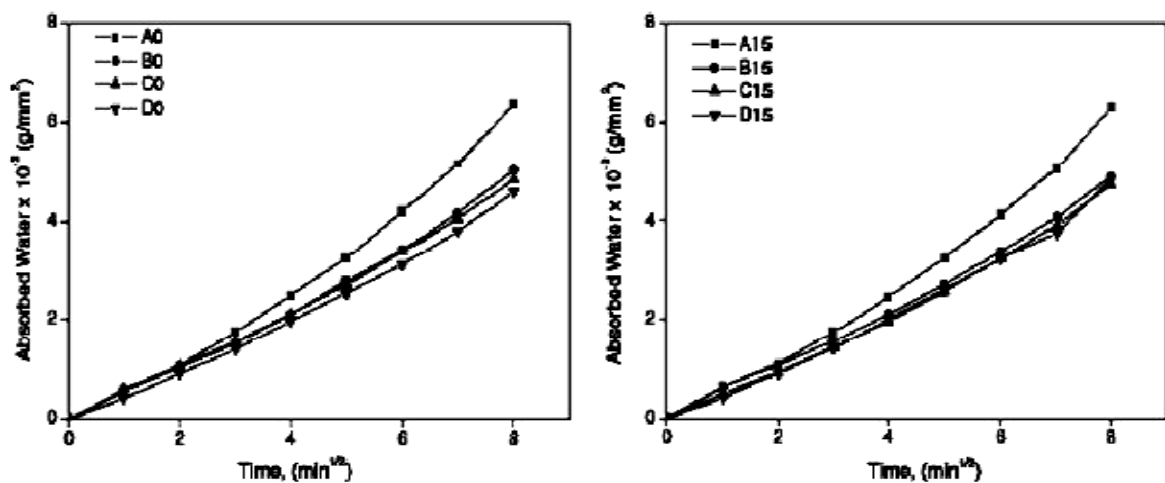


Figure 2.3: Coefficients d'absorption capillaire à 90 jours des bétons avec et sans fines calcaires substituées au sable SDC [68].

Benyamina [69] montre que l'ajout de fines calcaires au sable SDC réduit l'absorption d'eau par capillarité dans les mélanges de bétons autoplaçants. D'après les résultats de la **figure 2.4**, le béton autoplaçant de référence sans fines présente un coefficient d'absorption d'eau capillaire supérieur à 5.89×10^3 g/cm par rapport aux mélanges riches en fines calcaires. De plus, lorsque la teneur en fines calcaires passe de 0% à 20%, le coefficient d'absorption diminue de 5.89×10^3 g/cm à 4.75×10^3 g/cm, respectivement. Cette diminution est attribuée au remplissage des pores par les fines calcaires, ce qui réduit la porosité de la pâte dans les mélanges par conséquent, l'absorption capillaire diminue. Dans l'étude de Çelik et Marar [70], pour un rapport eau/ciment de 0.5 et une teneur en ciment de 420 kg/m^3 , l'ajout de 15% de

finer comble les vides et diminue légèrement l'absorption d'eau du béton de 2% par rapport au béton de référence sans fines. Au-delà de ce seuil, l'absorption commence à augmenter pour atteindre un écart de 12% à 30%. En revanche, dans l'étude de Benyamina [69], pour un rapport eau/ciment de 0.4 et une teneur en ciment de 490 kg/m³, un pourcentage élevé de fines calcaires de 20% est bénéfique pour la durabilité du béton ; il réduit l'absorption d'eau capillaire, la migration des chlorures et la porosité du béton respectivement de 20%, 49.5% et 12%.

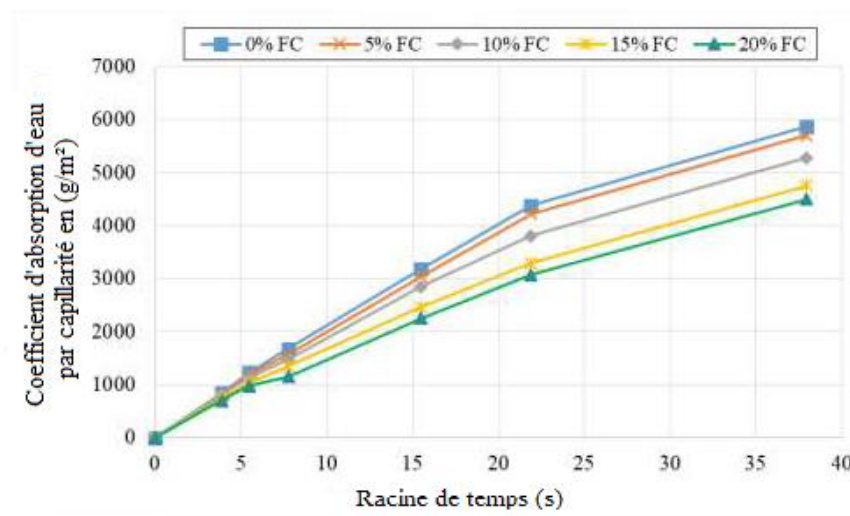


Figure 2.4 : Absorption capillaire d'eau des différents mélanges de béton autoplaçant à base de sable SDC avec différents teneurs en fines [69].

2.2.4. Perte de masse

La perte de masse dans le béton à base de sable SDC correspond à la réduction de son poids due à l'évaporation de l'eau ou à la dégradation du matériau. Elle est influencée par la porosité et la texture angulaire du sable utilisé. Cette perte affecte la durabilité et la stabilité dimensionnelle du béton. L'étude de Bedday [71] montre que les mortiers contenant 20% de fines avec une surface spécifique de Blaine de 3000 cm²/g subit une perte de masse d'environ 4 % et atteint 6% pour les mortiers contenant 30% de fines. L'augmentation du besoin en eau, au-delà de l'optimum, est nécessaire pour faciliter la mise en place du mortier. L'étude de Elat et al. [72] indique que le mortier composé uniquement de sable SN présente une perte de masse plus élevée que les autres formulations comme c'est illustré sur la **figure 2.5**. Cette différence s'explique par la perméabilité accrue du mortier à base de sable SN et la libération rapide de l'eau due à son réseau poreux. En effet, plus la masse volumique du matériau est faible, plus il tend à être poreux, favorisant ainsi l'évaporation de l'eau [73-75].

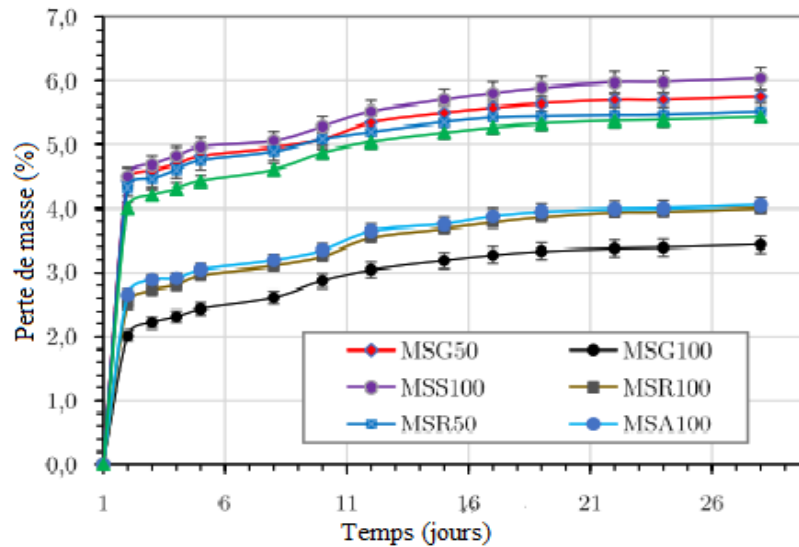


Figure 2.5: Évolution de la perte de masse des différents mortiers [72].

(MSG100: Mortier sable de Gracam 100%; MSR100: Mortier sable de Raze 100%; MSA100: Mortier sable de Arab contractor100%. MSG50: 50%; MSS100: Mortier sable de Sanaga ; MSR50:50%

2.2.5. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion dans le béton à base de sable SDC mesure sa capacité à supporter des forces de traction. Elle est influencée par la granulométrie du sable, qui affectent l'adhérence interne du mélange. Les recherches de Benabed et *al.* [56] et de Makani [76] sur la résistance à la traction des mortiers et bétons, utilisant du sable SDC et du sable SN avec des taux de substitution allant de 20% à 75%, ont révélé une augmentation de la résistance à la traction d'environ 1 % à 1.33%. Lokeswaran et *al.* [77] ont conclu que la présence élevée de particules fines dans le sable SDC a un impact significatif sur la résistance à la flexion du béton après 7 et 28 jours de durcissement, comparable à celle du mélange conventionnel. Il a été observé que le béton produit avec 50% de sable SDC en remplacement partiel du sable SN présente une résistance similaire que le béton standard. De plus, une amélioration significative de la résistance à la flexion de 14% a été enregistrée. En outre, la substitution de 60% du sable SN par du sable SDC engendre une amélioration de la résistance à la flexion de 4.5 MPa à 7.62 MPa [78].

Des travaux similaires [79] ont montré que la résistance à la traction par flexion des mortiers à base de sable SDC augmente avec l'âge, quel que soit le type de ciment utilisé. Cette augmentation est attribuée à l'évolution de l'hydratation au fil du temps. Pour les mortiers contenant des fines de calcaire et du ciment CEM1 32.5, une amélioration significative de la résistance a été observée dès l'âge de 2 jours. Le taux d'augmentation varie selon le pourcentage de filler ; environ 14%, 18% et 39% respectivement pour 10%, 15% et 20% de

fines. À l'âge de 90 jours, les mortiers contenant 15% de fines présentent une meilleure performance en termes de résistance à la traction par rapport aux autres mortiers avec ou sans fines. Lorsque les fines sont ajoutées au sable, elles peuvent diluer la matrice cimentaire, ce qui entraîne une diminution de la résistance à la traction par flexion. Cependant, le mortier contenant 5% de fines présente une augmentation de 3% de la résistance par rapport aux mortiers de référence. À l'âge de 90 jours, une réduction de la résistance à la traction par flexion est observée. Cette diminution est attribuée à l'effet de dilution résultant de l'ajout de fines dans le sable (figure 2.6).

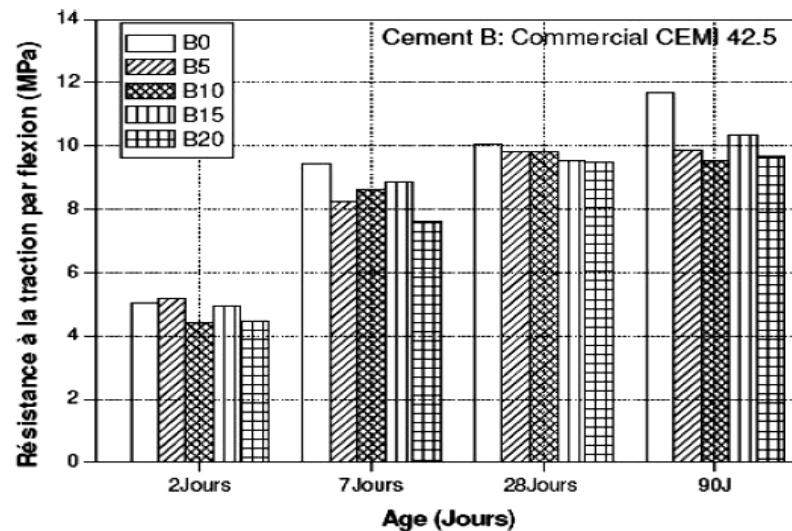


Figure 2.6: Développement de résistance à la traction par flexion à différents âges [79].
 (B0: mortier de référence; B5: mortier avec 5% de fines ; B10: mortier avec 10% de fines; B15: mortier avec 15% de fines; B20: mortier avec 20% de fines.

2.2.6. Résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons à base de sable SDC dépend de la nature des fines, en particulier de leurs coefficients d'activité [80]. Les travaux de Joudi et *al.*[81] sur l'influence des sable SDC, avec différents taux de fines ($d_m = 2\mu m$), sur les propriétés mécaniques des bétons ont révélé que les bétons sans fines présentaient des valeurs de résistance à la compression plus faibles que ceux contenant 12% de fines. En effet, l'ajout de fillers calcaires issus du sable SDC peut améliorer l'adhérence entre le ciment et les granulats dans le béton. Cependant, au-delà d'un certain pourcentage, les performances commencent à diminuer. Menadi et *al.* [68] ont révélé que lorsque le taux de fines atteint 15 % dans le béton, les propriétés mécaniques diminuent. Cette baisse de résistance est attribuée au fait que l'augmentation de la teneur en fines peut entraîner un enrobage insuffisant des particules d'agrégats par la pâte de ciment. De plus, ils ont trouvé que jusqu'à 15 % des fines ($< 80\mu m$) contenues dans le sable SDC peuvent être utilisées sans affecter la résistance à la compression

du béton. Debieb et *al.* [82] ont constaté que la résistance à la compression du béton avec fines à 7 jours et 28 jours était de 11.8% et 9.4% plus élevée que celle sans fines. Kenai et *al.* [83], ont étudié l'impact d'un filler calcaire substitué au sable SDC sur la résistance à la compression des mortiers et des bétons. Les résultats ont montré que l'ajout de fines calcaires au sable SDC jusqu'à 10% n'affecte pas la résistance à la compression du mortier. Cependant, lorsque les fines calcaires sont ajoutées à des taux de 10 à 20%, la résistance à la compression diminue. D'après la **figure 2.7**, l'ajout de fines de 0 à 15% dans le béton entraîne une augmentation de la résistance à la compression au jeune âge. Cette augmentation est attribuée à la surface rugueuse du sable SDC et à la réaction des fillers calcaires CaCO_3 avec le C_3A du ciment. Au-delà d'un taux de 15% de fines, la résistance à la compression diminue légèrement jusqu'à atteindre 20% de fines, devenant équivalente à celle du béton de référence [83].

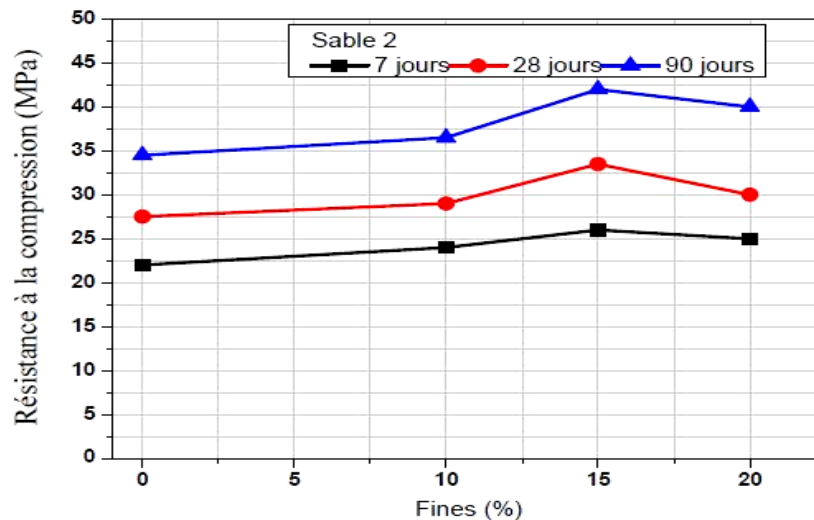


Figure 2.7: Évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de fines calcaires [83].

En étudiant l'influence de la source minéralogique de différents types de sable SDC tels que le Granit GS, le Calcaire LS et le laitier d'acier SS sur le comportement du béton, Al-Ameeri et *al.* [50] ont constaté que le sable SDC provenant du granit semblait offrir les valeurs les plus élevées de résistance à la compression. Les travaux de Leroy et *al.* [84] sur la résistance à la compression à 28 et 90 jours de différents types de bétons montrent que le béton fabriqué avec du sable SN a une résistance à la compression de 37 MPa, tandis que le béton composé de 25% de sable SN et 75% de sable SDC présente une résistance à la compression de 35 MPa. L'analyse indique qu'une substitution partielle de 75% du sable SN par du sable SDC peut être utilisée de manière efficace dans la fabrication de béton sans affecter sa résistance à la compression. D'un autre côté, Khouadjia et *al.* [85] mettent en évidence que le comportement

du béton, à la fois à l'état frais et durci, varie en fonction de la formulation du mélange et des caractéristiques des sables utilisés. Ils ont constaté que la meilleure résistance à la compression à 28 jours a été obtenue lorsque le béton contenait une faible teneur en particules fines (2,8%).

Les résultats obtenus par plusieurs chercheurs [55,59, 86] ont montré que la résistance à la compression du béton était plus élevée lorsque le taux de substitution du sable SN par le sable SDC atteignait 50%. Rajput [87] a mené une étude expérimentale sur des bétons ayant une teneur en sable SDC variant de 20% à 100%. Il a constaté que la résistance à la compression du béton augmente avec l'augmentation du sable SDC utilisé. Selon Bederina et al. [67] la résistance mécanique augmente avec l'augmentation du taux de substitution de SN par SDC. La **figure 2.8** présente les résultats de la résistance à la compression à 180 jours où le mortier composé avec 100% de sable SDC donne une augmentation de 25% pour une cure à l'air libre et 34% pour une cure sous l'eau. Ceci est dû à la forme angulaire des grains de sable SDC qui rend le mélange de mortier plus compact et permet de réduire la propagation de la fissure dans ce dernier. De plus, certains chercheurs [54, 88] ont remarqué qu'il existe un taux optimal de substitution du sable SN par du sable SDC qui confère au béton une meilleure compacité et par conséquent des valeurs de résistance à la compression plus élevées.

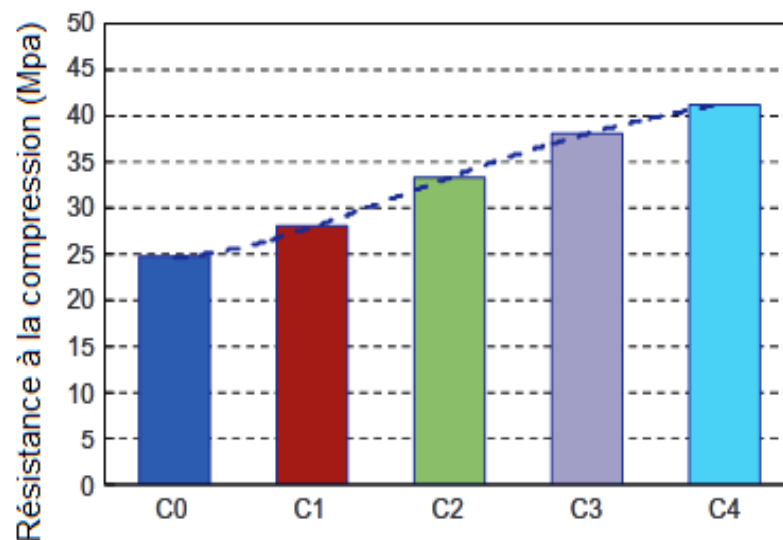


Figure 2.8: Résistance de compression de béton a 180 jours [67].

C0: sable avec 0% calcaire +100 silice ; C1: sable avec 25% calcaire +75 silice; C2: sable avec 50% calcaire +50 silice; C3: sable avec 75% calcaire +25 silice); C4: sable avec 100% calcaire +0 silice.

2.2.7. Chaleur d'hydratation

La chaleur d'hydratation dans le béton est l'énergie libérée lors de la réaction chimique entre le ciment et l'eau. Elle influence le durcissement et le développement de la résistance du béton. D'après une étude sur l'influence du type de sable sur la chaleur d'hydratation du mortier [58], le mortier avec du sable SDC génère une chaleur d'hydratation supérieure à celle avec un sable SN. La chaleur d'hydratation se produit plus tôt pour les mortiers contenant du sable SDC comme illustré dans la **figure 2.9**. Ceci a été expliqué par la présence des fines calcaires dans le sable SDC, qui jouent le rôle de germes dans l'hydratation des grains de ciment et forment d'autres sites de nucléation pour favoriser la formation des hydrates. L'utilisation de sable SDC entraîne une légère accélération de l'hydratation du ciment lorsqu'il est combiné avec du calcaire finement broyé [54].

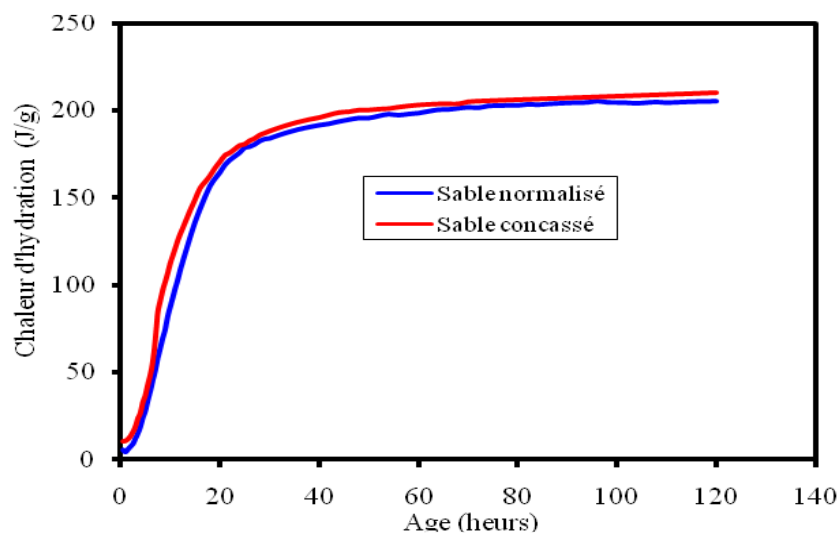


Figure 2.9: Evolution de la chaleur d'hydratation du ciment calcaire avec le sable normalisé et le sable SDC [54].

Rahal et al. [89] ont étudié l'impact des fillers calcaires et siliceux sur les propriétés mécaniques et calorimétriques du béton. Ils ont constaté que l'incorporation de filler calcaire dans le ciment Portland augmentait son degré d'hydratation au jeune âge. Pour un ciment Portland riche en C_3A (PC1), le remplacement de 20% de filler quartz (Q) ou de calcaire (C) accélère l'apparition du second pic du flux de chaleur par rapport au ciment ordinaire. Cependant, lorsque le dosage d'addition est élevé à 40%, ce pic est réduit par rapport à celui du ciment témoin (PC1). De plus, un troisième pic apparaît, attribué à la transformation de l'ettringite en monosulfoaluminate. Pour un ciment pauvre en C_3A (PC2), l'ajout de 20% de quartz ou de calcaire réduit le second pic du flux de chaleur. Cependant, lorsque le dosage en quartz atteint 40%, ce pic s'accélère. En revanche, une élévation du dosage en calcaire à 40% diminue et retarde le flux de chaleur, comme illustré dans la **figure 2.10**.

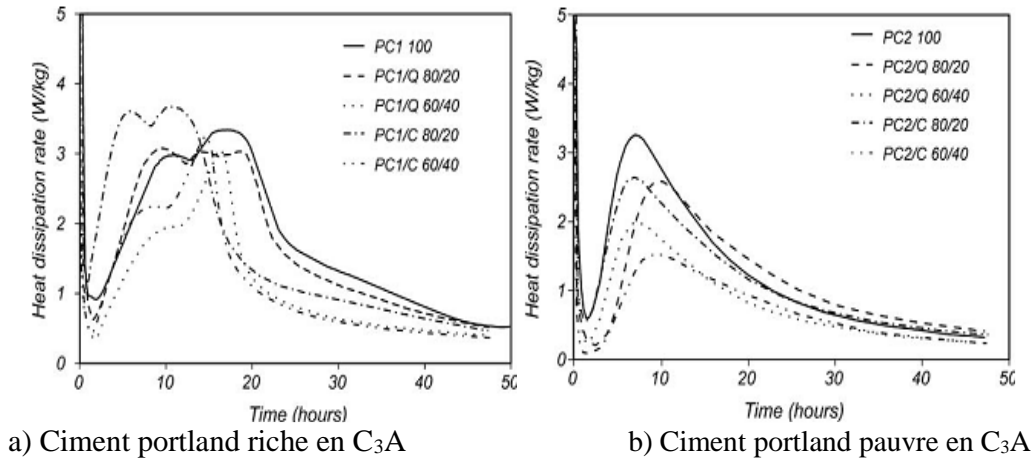


Figure 2.10 : Influence des fillers de quartz (Q) et de calcaire (C) sur le flux de chaleur d'un ciment PC1 riche en C_3A et un ciment PC2 pauvre en C_3A [79].

2.2.7. Retrait

Le retrait du mortier et du béton est principalement affecté par la teneur en sable SDC, particulièrement sa fraction fine. Des études [59,86] ont montré que le retrait du ciment augmente avec l'augmentation de la surface spécifique des particules. Cette augmentation pourrait être due à une déshydratation rapide du $CaCO_3$, qui modifie la phase du CSH. Dans le même contexte, les travaux de Bonavetti et Irassar [55] montrent que l'augmentation de la teneur en fines dans le sable SDC est probablement la principale cause du retrait élevé dû à la demande élevée en eau. Ils ont constaté que les mortiers avec une teneur en fines supérieure à 10% conduisent à un retrait important par rapport aux mortiers sans fines. Ils ont conclu que le retrait du mortier à base de sable SDC est directement lié à l'eau présente dans les pores de petite taille de 3 à 30 nm. De plus, Kantro [90] n'a trouvé aucune augmentation du retrait par dessiccation à 4 jours pour 5.3% de poudre de calcaire. Néanmoins, une légère augmentation du retrait a été trouvée à 11, 18 et 25 jours, pouvant être attribuée à la finesse du ciment. Kou et Poon [48] ont conclu que les valeurs de retrait des bétons à base du sable SDC étaient inférieures à celles des bétons à base du sable SN. Ces résultats s'expliquent par le fait que le béton à base de sable SDC contient plus de fines que le sable SN, ce qui conduit à des valeurs de retrait plus faibles. D'autre part, Khatib et *al.* [91] ont étudié le retrait sur 180 jours de mortiers avec et sans sable SDC et avec différents types de ciments. Les résultats ont montré que le sable SDC contenant 15% de poudre entraîne une augmentation du retrait de 0 à 22% à tous les âges et pour tous les ciments utilisés, ce qui a été expliqué par la formation de carboaluminates suite à l'incorporation de ce sable. En effet, les impuretés présentes dans les granulats peuvent également affecter le retrait du béton. Plus la teneur en argile et en limon est

élevée, plus la déformation due au retrait est importante [92]. Ils concluent qu'une teneur plus élevée en argile rétractant dans le calcaire entraîne une pression de désolidarisation plus élevée et augmente le retrait de séchage du béton.

Aquino et *al.* [93] ont découvert que malgré la similarité de taille et de volume des pores entre le sable SDC et le sable SN, ces deux types de sable présentent un comportement de retrait différent lors du séchage dans le béton. Pour un même rapport eau/ciment, les mélanges de béton incorporant du sable SDC développent moins de retrait que ceux avec du sable SN. Cette réduction devient significative et atteint 15% pour un taux de remplacement supérieur à 40%. Les chercheurs expliquent ce résultat par le module d'élasticité plus élevé du sable SDC et la porosité plus élevée du sable SN de 0.025 ml/g contre 0.021 ml/g pour le sable SDC. Ils considèrent que plus il y a de pores à la surface du sable, plus la pâte adhère et plus elle subit de retrait. De plus, ils estiment que la teneur en eau supplémentaire dans ces pores pourrait être préjudiciable et augmenter le retrait lorsque l'eau s'échappe des granulats. Les recherches de Bonavetti et *al.* [55] ont montré que les mortiers contenant plus de 10% de fines calcaires présentent des retraits plus élevés que ceux sans fines ou avec seulement 5% de fines. Ce phénomène peut être attribué au pourcentage élevé de fines dans le sable, ce qui favorise l'absorption d'eau. D'autres chercheurs [94,95] ont expliqué cette augmentation du retrait dans les mortiers contenant plus de 10% de fines calcaires par la formation de carboaluminates ou un taux élevé de carbonatation. Les résultats de la **figure 2.11** montrent que le retrait augmente très rapidement pour le béton contenant 100% de sable SDC par rapport au béton composé à 100% de sable SN. Cette différence peut s'expliquer par la teneur élevée en fines dans les sable SDC qui est environ 7.4% pour le sable SDC, contre 1.4% pour le sable SN [72].

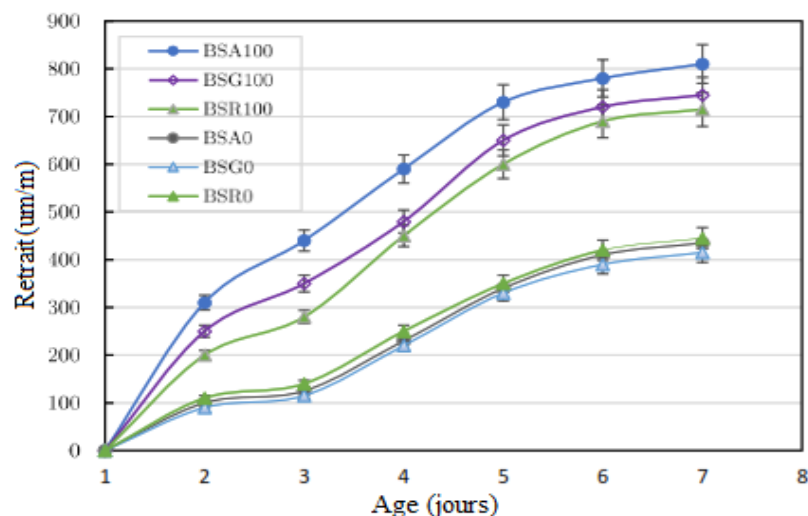


Figure 2.11: Évolution du retrait des bétons à base de sable SDC [72].

BSA100: 100% SA: GA; BSG100: 100% SG: GG; BSR100: 100% SA: GR; BSA0: 100% SS: GA; BSG0: 100% SS: GG; BSR0: 100% SS: GR; B5: B (Béton), S (sable), (A, G et R) désigne la carrière

2.3. Apport des additions minérales

2.3.1. Ouvrabilité

L'ouvrabilité est une propriété essentielle du béton, définie comme la facilité avec laquelle il peut être manipulé et mis en place dans les coffrages. Cette caractéristique peut être mesurée à l'aide de divers instruments, tels que le cône d'Abrams, le test d'étalement et le maniabilimètre LCPC [13]. L'ajout de la fumée de silice (microsilice) dans les bétons et mortiers influence fortement leur ouvrabilité, principalement en raison de la très grande finesse des particules de fumée de silice. Plusieurs études ont montré que l'incorporation de fumée de silice dans les bétons et mortiers entraîne une diminution significative de leur ouvrabilité. Cela s'explique par l'augmentation de la surface spécifique des particules de fumée de silice, ce qui augmente la demande en eau dans le mélange. Kwan [96] a constaté que l'effet de la fumée de silice sur l'ouvrabilité varie considérablement en fonction du rapport eau/liant. Les bétons avec des rapports intermédiaires tirent le meilleur parti de l'ajout de fumée de silice en termes de maniabilité, comme illustré dans la **figure 2.12**, tandis que cet effet est moins marqué pour les bétons avec des rapports faibles ou élevés

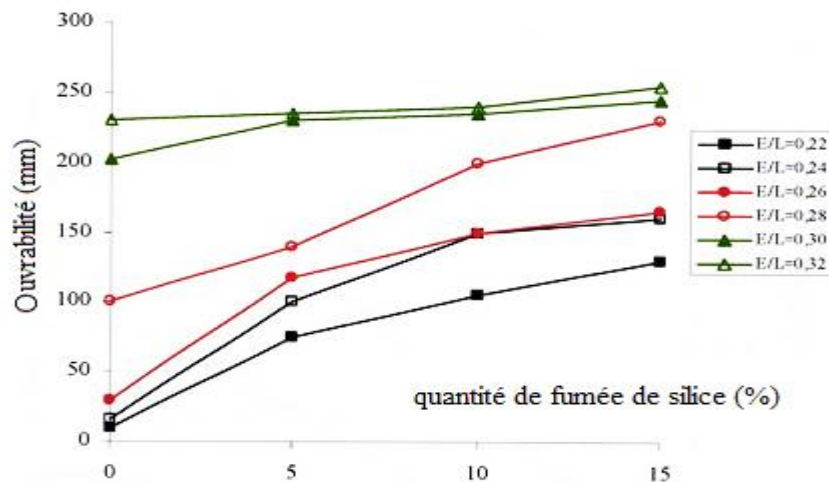


Figure 2.12 : Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant [96].

L'utilisation croissante de la pouzzolane naturelle entraîne une réduction des diamètres d'étalement, attribuée à la demande élevée en eau et en superplastifiant de la pouzzolane utilisée. Ce phénomène peut s'expliquer par la finesse accrue de cette addition minérale par rapport à celle du ciment, ainsi que par la présence d'alumine (Al_2O_3) dans la pouzzolane naturelle. Ce composant chimique exerce une influence sur la consommation de superplastifiant, ce qui a un impact négatif sur l'étalement [97]. L'incorporation de la pouzzolane naturelle dans le ciment présente des avantages pour les propriétés rhéologiques du

béton à l'état frais. La pouzzolane contribue à obtenir une ouvrabilité satisfaisante avec une légère perte pour des taux élevés. Pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactant.

Plusieurs recherches [98] ont été effectuées pour modifier les propriétés rhéologiques et mécaniques en ajoutant des particules fines de laitier. Il a été constaté que cette incorporation augmente l'étalement de la pâte à l'état frais et densifie la microstructure grâce à l'activité hydraulique latente du laitier. Les ciments contenant du laitier présentent une demande en eau plus faible que les ciments purs en raison du retard de l'hydratation du laitier. L'ajout d'un laitier moins réactif que le ciment réduit la formation d'ettringite aux premiers stades de l'hydratation, entraînant ainsi une amélioration de l'ouvrabilité du mortier [99]. Shafigh et *al.* [100] ont conclu que le niveau optimal de substitution du laitier pour obtenir une maniabilité maximale dans le cas d'un béton léger se situe entre 20 et 30%. L'étude de Lohani et *al.* [101] montre qu'en utilisant du laitier de haut fourneau, la demande en eau diminue d'environ 3% par rapport à l'utilisation de ciment. Cette réduction est due à la surface lisse des particules de laitier, qui ralentit la réaction chimique et prolonge le temps de prise. Arivalagan [102] a constaté que l'affaissement du béton augmente proportionnellement au taux de remplacement du ciment par le laitier de haut fourneau. Sethy et *al.* [103] ont étudié la variation du dosage en superplastifiant à base de polycarboxylate en fonction du taux de substitution du ciment par le laitier de haut fourneau. Ils ont observé que la demande en superplastifiant diminue à mesure que le dosage de laitier augmente. Cette réduction peut être attribuée au remplissage des vides entre les particules de ciment et les particules de laitier, améliorant ainsi la distribution granulométrique et augmentant la fluidité du béton sans nécessiter une forte dose de superplastifiant. Ce résultat a été aussi confirmé par Abdulkareem et *al.* [104].

Touguay et *al.* [105] ont montré que l'ajout de fines calcaires dans les ciments et les mortiers réduit considérablement leur maniabilité. Cette dernière diminue progressivement, passant de 55% pour le béton de référence à 45 % pour une teneur de 10%, et atteignant 36 % pour une teneur de 20% de fines calcaires.

2.3.2. Paramètres rhéologiques

Les additions minérales, comme la fumée de silice la pouzzolane naturelle ou le laitier, modifient les paramètres rhéologiques du béton en influençant sa fluidité, sa viscosité et sa consistance. Cette interaction est cruciale pour optimiser la performance et la durabilité du béton. Selon certains chercheurs, [53,98,106], l'incorporation de fumée de silice dans le béton augmente le seuil de cisaillement et la viscosité, tout en renforçant la compacité des mélanges.

Cependant, Carlsward et *al.*[107] ont conclu que la fumée de silice n'entraîne pas de changement significatif de la viscosité en comparaison avec la rhéologie d'un mélange standard. Dans le même sens, Ferraris et *al.* [106], ont montré que l'ajout de la fumée de silice dans les pâtes de ciment ou les bétons entraîne une augmentation de la demande en eau et de superplastifiant. Cette observation souligne l'effet de la fumée de silice sur la modification des propriétés rhéologiques des mélanges cimentaires [107]. Les travaux d'Aitcin et *al.* [108] montrent qu'une augmentation du dosage en fumée de silice, sans l'ajout de superplastifiant, entraîne une augmentation rapide de la viscosité. De même, Park et *al.* [98], ont constaté que l'incorporation de la fumée de silice dans le ciment augmente le seuil de cisaillement et la viscosité plastique proportionnellement au taux de remplacement du ciment par cet ajout (figure 2.13).

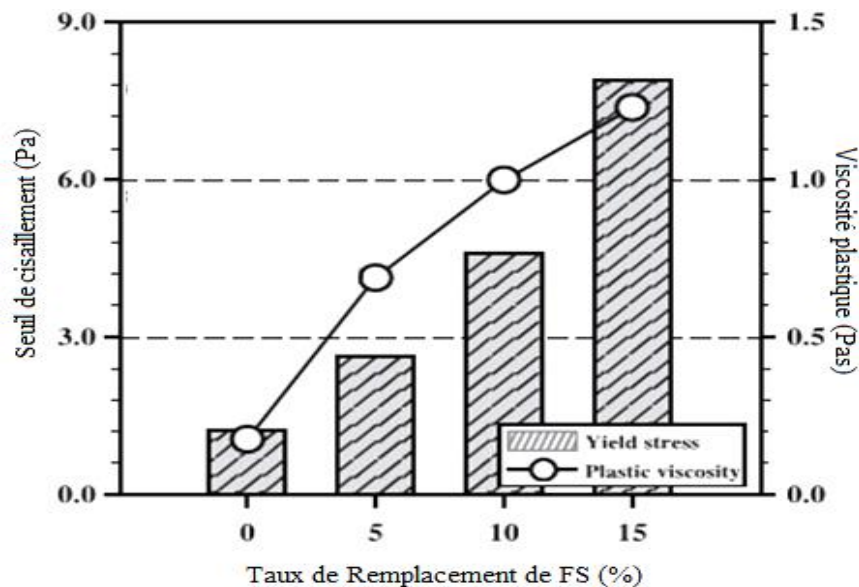


Figure 2.13 : Effets de la fumée de silice sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment [98].

Kesseir et *al.* [109], ont révélé que lorsque le rapport eau/liant (E/L) reste constant, une concentration accrue en pouzzolane naturelle améliore les propriétés rhéologiques des mortiers. Cependant, si le rapport (E/L) augmente, cela entraîne une réduction de la viscosité plastique et le seuil de cisaillement des compositions. L'étude réalisée par Bouglada et *al.* [110], a impliqué la fabrication de ciments où 20% du clinker a été substitué par de la pouzzolane naturelle, des fillers calcaires et du laitier de haut fourneau. Les résultats ont indiqué que les mortiers contenant de la pouzzolane et des fillers calcaires présentaient des propriétés rhéologiques supérieures par rapport au mortier témoin. Cette augmentation a été attribuée à la plus grande demande en eau des fillers calcaires et de la pouzzolane, due à leurs distributions granulométriques et à leurs surfaces spécifiques élevées.

Plusieurs recherches [94, 100, 111, 112,113] ont exploré l'impact du laitier sur les propriétés rhéologiques du béton. Ces études visent à comprendre comment le laitier en tant qu'additif minéral modifie la maniabilité, la viscosité et le seuil de cisaillement du béton, contribuant ainsi à améliorer ses propriétés pour diverses applications de construction. Zhang *et al.* [114] ont constaté que l'incorporation de 35% de laitier ultrafin dans le béton entraîne une diminution notable dans la valeur de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement. Ces résultats indiquent que le laitier ultrafin pourrait être avantageux pour optimiser les propriétés rhéologiques du béton, améliorant ainsi sa maniabilité et son application dans le domaine de la construction. Boukendakdji *et al.* [115] montraient que l'augmentation de la quantité de laitier réduit le seuil de cisaillement et la viscosité du béton (**figure 2.14**). En outre, ils ont également observé que lorsque la teneur en laitier est plus élevée, le seuil de cisaillement et la viscosité des bétons sont plus faibles, cette constatation a également été rapportée par Sethy *et al.* [103]. Adjoudj *et al.* [116], ont étudié l'impact de différentes additions minérales sur la viscosité des mortiers. Les résultats obtenus ont montré que le laitier de haut fourneau et les fillers calcaires améliorent la viscosité, ce phénomène étant attribué à l'effet de remplissage significatif de ces deux matériaux. D'autres recherches [86,98], ont mis en évidence une réduction de la viscosité plastique dans les pâtes de ciment incorporant du laitier de hauts fourneaux ayant une surface spécifique importante (5962 cm²/g) comparativement à celle du ciment ordinaire (3290 cm²/g). Cette diminution de viscosité a été attribuée à la présence de petites particules sphériques de laitier (taille moyenne de 8.07 µm) se logeant entre les plus grosses particules de ciment (taille moyenne de 18.07 µm), facilitant ainsi le mouvement relatif entre les particules et réduisant la résistance au flux.

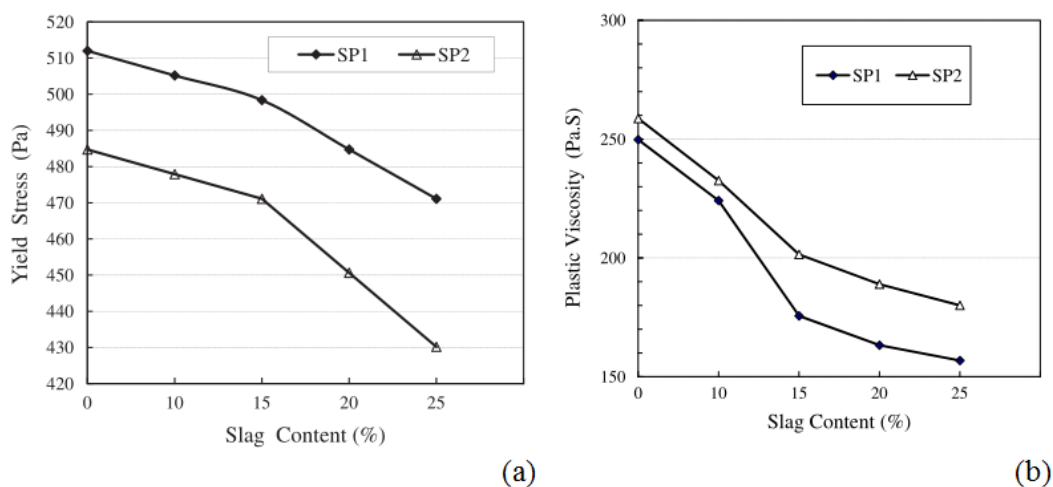


Figure 2.14: Influence du laitier de haut fourneau sur la rhéologie des bétons (a) Seuil de cisaillement ; (b) Viscosité [115].

EL Barrak [117] a constaté que les fillers calcaires sont compatibles avec le ciment. En outre, leur utilisation permet de limiter les problèmes d'instabilité de béton tels que le ressuage et la ségrégation. De plus, il est possible d'optimiser la viscosité des matériaux cimentaires en renforçant la cohésion du mélange par l'introduction de ces additifs minéraux [116]. Taleb et *al.*[118] ont observé que la substitution du ciment par des fillers calcaires, jusqu'à un taux de 20%, n'a pas eu d'incidence sur la viscosité du béton. Cependant, au-delà de ce taux, les effets positifs de cette substitution sur la rhéologie du béton se sont estompés, entraînant ainsi une augmentation du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique du matériau. El Hilali [111] a étudié l'impact de la granulométrie des fillers calcaires sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants. Il a découvert que plus les particules de calcaire sont fines, plus la viscosité et le seuil de cisaillement du béton tendent à se réduire. Esping [66] a constaté une amélioration des propriétés rhéologiques du béton avec l'augmentation de la finesse des fillers. Cette observation a été confirmée par Petit et *al.*[112], qui ont constaté qu'un ajout significatif de ce composant très fin augmente la viscosité de la pâte de ciment ainsi que le ratio eau/ciment, ce qui influe sur les propriétés du béton. Par ailleurs, Vance et *al.* [119] ont observé que l'introduction de fillers calcaires aux particules plus grosses que celles du ciment (**figure 2.15**) entraîne une réduction dans la valeur du seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Cette diminution est attribuée aux particules grossières qui favorisent un espacement accru entre les particules de ciment, diminuant par conséquent la résistance au cisaillement.

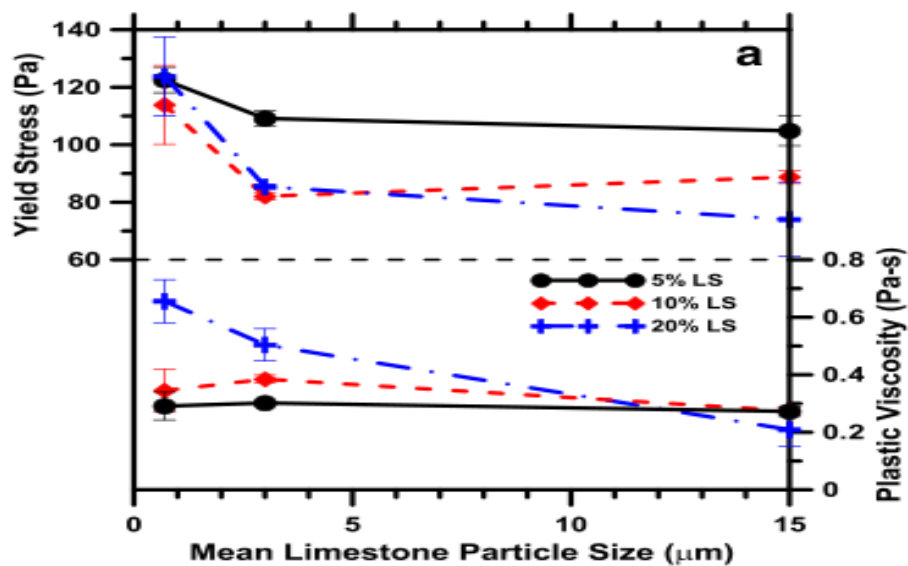


Figure 2.15: Impact de la granulométrie des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des bétons analysés [119]

2.3.3. Absorption d'eau

Les additions minérales, diminuent l'absorption d'eau du béton en réduisant sa porosité. Elles comblent les vides dans la matrice, rendant le béton plus dense et moins perméable. Cette diminution de l'absorption renforce la durabilité et la résistance du béton. Plusieurs études [98,120] ont montré que l'ajout de laitier dans les mélanges de béton, qu'ils soient binaires, ternaires ou quaternaires, réduit l'absorption d'eau. Cette diminution est principalement due à la structure vitreuse et à la finesse supérieure des particules de laitier par rapport à celles de la pouzzolane, du calcaire et même du ciment ordinaire, ce qui diminue le besoin en eau du mélange. Khatib et Clay [121] ont étudié l'incorporation du métakaolin (MK) dans les bétons à haute performance (BHP). Ils ont mesuré l'absorption capillaire sur des échantillons de BHP contenant jusqu'à 20% de MK en substitution du ciment. Leurs résultats ont montré que la pénétration de l'eau par capillarité est réduite pour les BHP à base de MK. Abdul Razak et *al.* [122] ont trouvé que le remplacement de 10% du ciment par le MK dans les BHP entraîne une diminution significative de l'absorption d'eau et de la capillarité du béton. D'après l'étude de Siddique et Klaus [123], lorsque le ciment est remplacé par 5% et 10% de MK dans les bétons autoplaçants (BAP), la capillarité diminue. Cependant, une augmentation de la capillarité a été observée pour un taux de substitution de 15%. L'étude de Ramezani pour et Bahrami [124] confirme les mêmes tendances concernant la profondeur de pénétration de l'eau et la capillarité lorsque le ciment est remplacé par 10% de MK.

2.3.4. Perte de masse

L'effet des additions minérales sur la perte de masse du béton se traduit par une réduction de l'évaporation d'eau et de la dégradation du matériau. Selon l'étude de Zenati et *al.* [125], les mélanges contenant un taux élevé de laitier présentent une plus grande perte de masse due à l'évaporation de l'eau non chimiquement liée. Cette évaporation se produit à partir de la porosité ouverte, en raison de l'hydraulicité latente du laitier. Les travaux de Laakri [126] ont montré que les mortiers contenant des additions minérales présentent une plus grande perte de masse aux premiers jours d'hydratation. En particulier, le mortier M23 (50% C; 20% PZ ; 30% LH) présente un léger décalage par rapport aux mortiers M20 (80% C; 20% PZ), M10 et M22 (60% C; 20% PZ ; 20% LH). Au huitième jour, la masse se stabilise à une valeur d'environ 7% selon la **figure 2.16**.

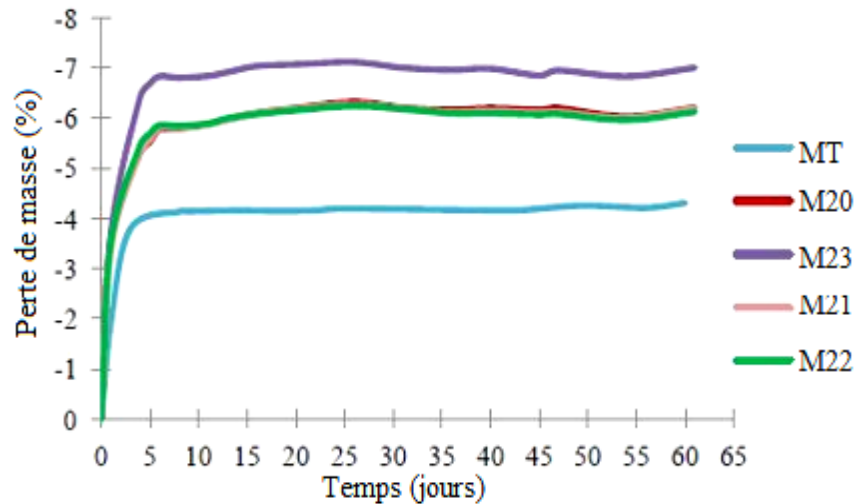


Figure 2.16: Évolution de la masse des mortiers [126].

2.3.5. Résistance à la traction par flexion

Les travaux de Laakri [126] ont montré que l'incorporation de l'addition minérale réduit légèrement les résistances des mortiers à 7 et à 28 jours. Cette diminution de résistance est proportionnelle au taux de substitution des additions. Cependant, à 90 jours, le mortier (M20) contenant 20% de pozzoulane naturelle et celui (M21) contenant 20% de pozzoulane naturelle avec 10% de laitier présentent une amélioration de leurs résistances, atteignant des niveaux similaires à ceux du mortier de référence (MT). En revanche, le mortier (M23) avec 20% de pozzoulane et 30% de laitier présente les résistances les plus faibles, tandis que le mortier (M22) avec 20% de pozzoulane et 20% de laitier gagne des résistances supérieures à celles du mortier de référence. À long terme (365 jours), les trois mortiers développent des résistances très similaires, tandis que le mortier M22 obtient les meilleurs résultats en traction, avec une résistance comparable à celle du témoin, comme illustré dans la **figure 2.17**.

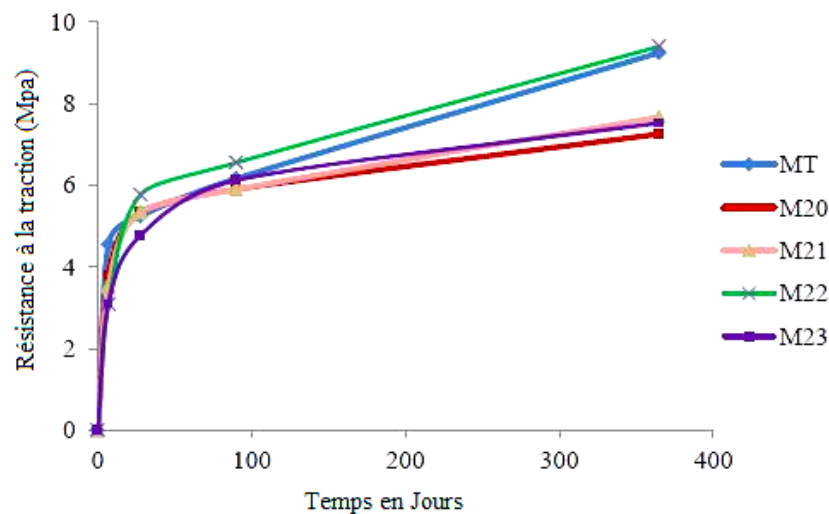


Figure 2.17: Résistances à la traction des mortiers ternaires en fonction du taux de substitution des additions minérales [126].

2.3.6. Résistances à la compression

Menendez et *al.* [127], affirment que l'accélération de l'hydratation des particules du clinker surtout les C_3S contribuent au développement de la résistance au jeune âge. Selon Kerbouche et *al.* [128], les mortiers contenant 5% et 10% de fumée de silice atteignent des résistances très proches de celles du mortier témoin après 2 et 7 jours, respectivement 92% et 96%, comme illustrés sur la **figure 2.18**. Cette similarité s'explique par la réaction pouzzolanique qui se produit rapidement. À long terme, les résistances de ces mortiers dépassent celles du mortier de référence, avec une augmentation de 13% pour un dosage de 5% et de 27 % pour un dosage de 10% de fumée de silice, particulièrement à l'âge de 90 jours. L'augmentation de la résistance peut être attribuée à la haute réactivité pouzzolanique de la fumée de silice, qui réagit rapidement pour consommer la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment. De plus, sa grande surface spécifique agit comme un filler entre les grains de ciment, rendant ainsi la pâte plus compacte et homogène.

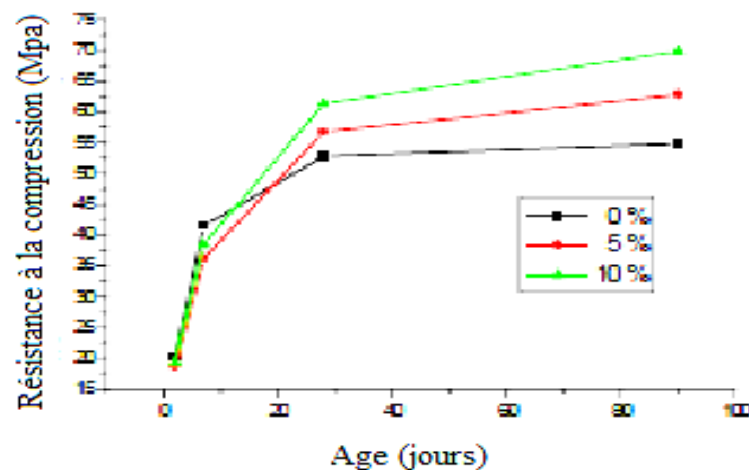


Figure 2.18: Variation de la Résistance à la compression du mortier formulé avec divers pourcentages de fumée de silice [128].

Fodil et *al.* [129] ont révélé que l'incorporation de la pouzzolane naturelle avait initialement un effet négatif sur la résistance à la compression du béton aux âges de 7, 14, 28 et 60 jours, indépendamment du taux de substitution étudié (10 %, 20 % et 30 %). Cependant, après 90 jours, les résistances des bétons contenant 10% et 20% de pouzzolane ont augmenté. Cette observation suggère que la pouzzolane peut contribuer à améliorer la résistance mécanique à long terme en utilisant des taux optimaux selon la **figure 2.19**.

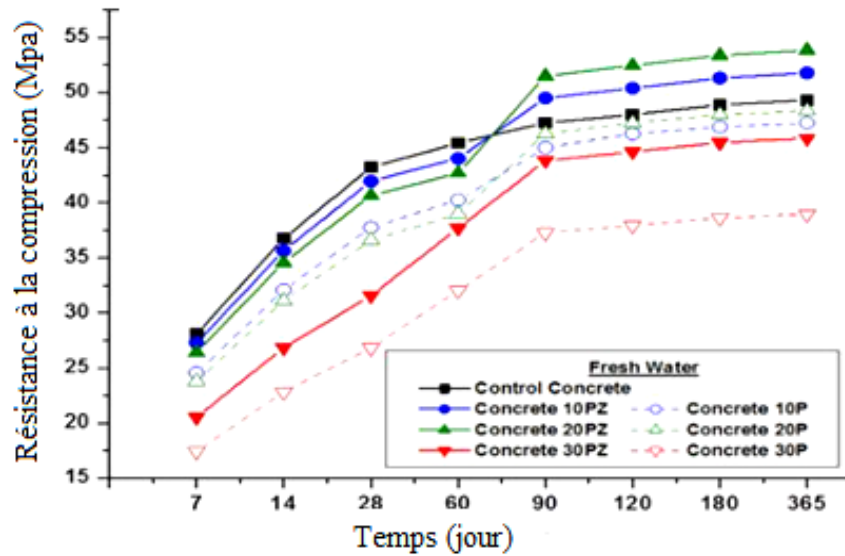


Figure 2.19 : Variation de la résistance à la compression des bétons formulés avec divers pourcentage de la pouzzolane naturelle [129].

Plusieurs études [130-132] ont souligné l'importance de choisir un taux optimal d'addition minérale dans le mélange pour améliorer les performances mécaniques. Les résultats des essais de compression des bétons contenant de la pouzzolane naturelle illustrés dans la **figure 2.20** ont révélé une amélioration des résistances entre 28 et 365 jours avec un optimum pour le mélange (LWC20) contenant 20% de pouzzolane [132]. Arroudj et *al.* [131] ont opté pour un taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle de 20%. Ce dosage de 20% semble être le dosage optimal pour obtenir des performances mécaniques comparables à celles d'un béton de référence. De plus, une forte teneur en aluminates dans les mélanges à base de pouzzolane peut également être à l'origine de cette chute de résistance pour des dosages élevés [131]. En outre, la résistance à la compression du ciment composé diminue lorsque le dosage en pouzzolane augmente ; Cette diminution de résistance est attribuée au rapport E/C qui augmente en augmentant le dosage en pouzzolane sous l'effet de la dilution [133].

L'addition de pouzzolane au-delà de 15% diminue significativement la résistance à la compression à 28 jours [134]. Le développement de la résistance des ciments composés n'est pas seulement affecté par l'activité pouzzolanique de la pouzzolane et la composition du clinker, mais aussi par la distribution des tailles des particules et de leur interaction.

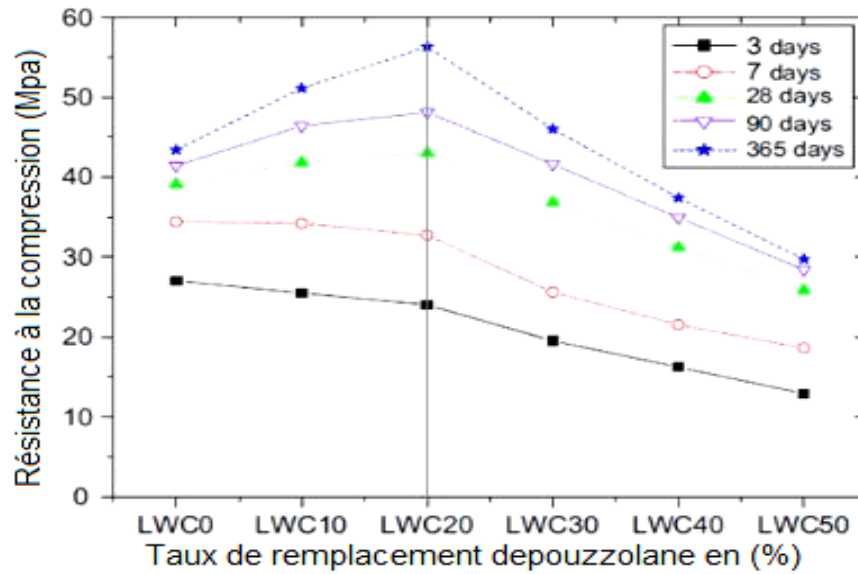


Figure 2.20: Évaluations des propriétés mécaniques des bétons incorporant de la pouzzolane naturelle de Bouhamidi [126].

L'étude de Uzzal et *al.* [135], ont révélé que les bétons contenant du laitier de haut fourneau avec des taux de substitution de 30% et 50% présentaient une résistance à la compression inférieure d'environ 14% par rapport au béton témoin à 7 jours. Cependant, cette résistance augmentait plus rapidement avec le temps que celle du béton témoin. À 28 jours, l'augmentation était d'environ 36% comparée à 19% pour le béton témoin. Cette différence est attribuée à la cinétique plus lente de durcissement du laitier. En effet, l'incorporation du laitier améliore considérablement la résistance à long terme par rapport au ciment ou aux fillers calcaires, grâce à son potentiel hydraulique latent.

Suresh et Nagaraju [136] ont montré que le béton contenant 50% de laitier de haut fourneau atteint généralement entre 45% et 55% de sa résistance finale après respectivement 7 et 28 jours. Entre 28 et 90 jours, la résistance de ce béton augmente de 10% à 20%. En revanche, un béton composé uniquement de ciment Portland atteint environ 75% de sa résistance finale à 28 jours avec une augmentation plus modeste de 5% à 10% entre 28 et 90 jours.

L'étude menée par Gupta et *al.* [137] a mis en évidence l'importance de la finesse du laitier de haut fourneau dans l'amélioration de la résistance initiale du béton. Les résultats montrent qu'un remplacement de 20% du ciment par du laitier très fin (G20F556) (**figure 2.21**), avec une finesse d'environ 556 m²/kg, est idéal pour obtenir une résistance élevée au jeune âge et renforcer ses propriétés mécaniques et sa durabilité à long terme. Lorsque la finesse du laitier est élevée, la surface disponible pour la réaction d'hydratation augmente,

favorisant la formation de produits d'hydratation dans la matrice cimentaire. Cette répartition améliorée des produits d'hydratation contribue à renforcer la résistance du béton. De plus, la réduction du volume des pores grâce à cette réaction d'hydratation plus efficace contribue également à améliorer la durabilité du matériau. De même, Pietro et *al.*[138] a révélé l'impact des différentes tailles de particules de laitier de haut fourneau sur la résistance du béton. Selon ces résultats, les particules fines de laitier moins de 10 μ m sont bénéfiques pour la résistance initiale du béton. En revanche, les particules plus grosses (plus de 45 μ m) contribuent à améliorer la résistance à long terme du matériau.

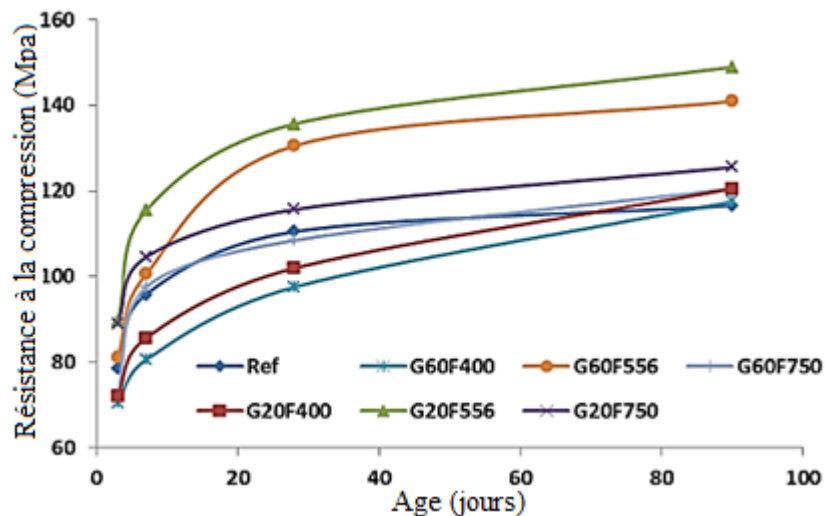


Figure 2.21: Variation de la résistance à la compression des mortiers contenant du laitier de haut fourneau en relation avec la finesse, le taux de substitution et l'âge [137].

(G: taux ; F: finesse)

Liu et *al.* [139] ont constaté que l'incorporation de laitier dans le liant du béton peut augmenter sa résistance à la compression jusqu'à 9% lorsque la proportion de laitier atteint 40%. L'amélioration observée est due à une réaction hydraulique secondaire en présence du $\text{Ca}(\text{OH})_2$, qui génère un CSH supplémentaire et densifie la matrice cimentaire. Par ailleurs, Arun Kumar et *al.* [140], ont montré que lorsque le taux de substitution de laitier dépasse 45%, la résistance à la compression du béton diminue par rapport au béton témoin. De même, les recherches de Benmammar et *al.* [141] ont révélé que les bétons contenant du laitier de haut fourneau présentent des résistances à la compression inférieures à celles du béton de référence durant la phase de durcissement. Cette différence peut être attribuée, d'une part, à l'absence de production de portlandite lors de l'hydratation des laitiers. Par conséquent, l'utilisation d'un activateur est nécessaire pour compenser cette absence et améliorer les propriétés mécaniques du béton. D'autre part, la cinétique d'hydratation plus lente des laitiers, due à leur faible teneur en chaux par rapport au ciment, contribue effectivement à cette réduction de résistance.

Dinakar et *al.* [142] ont mis en évidence que l'ajout d'un adjuvant à base de polycarboxylate permet d'obtenir une résistance à la compression élevée dans les bétons avec un taux de substitution du ciment par le laitier de haut fourneau pouvant atteindre 80%. En effet, l'utilisation d'un taux de laitier supérieur à 60% de la masse du liant peut contribuer à améliorer la résistance du béton.

Plusieurs études [143-145] ont identifié un taux de substitution optimal du ciment par des fillers calcaires, qui améliore la compacité du béton et par conséquent augmente sa résistance à la compression. Les recherches de Madani et *al.* [143] ont révélé que la résistance à la compression du béton atteint son niveau le plus élevé lorsque 5% du ciment est substitué par des fillers calcaires. Cependant, au-delà de ce pourcentage, la résistance à la compression commence à diminuer. Mikhailova et *al.* [144] ont constaté que les bétons contenant 25% de fillers calcaires présentent des résistances à la compression optimale. Ces études suggèrent qu'il existe un taux de substitution spécifique des fillers calcaires qui peut maximiser la résistance à la compression du béton. Demirhan et *al.* [145] ont montré que la résistance à la compression du béton et du mortier diminue significativement à long terme quand la proportion de fillers calcaires remplaçant le ciment dépasse les 20%. De même, Taleb [146], dans son étude, a observé que le remplacement du ciment par des fillers calcaires conduit généralement à une diminution de la résistance du matériau. El Bahi et *al.* [147] ont remarqué qu'après 28 jours, le béton avec 10% de fillers calcaires présentait une résistance à la compression optimale. En revanche, le béton avec 20% de fillers calcaires offrait une résistance similaire à celle du béton de référence sans additifs. Avec le temps, la résistance de tous les bétons contenant des fillers calcaires s'est améliorée, dépassant celle du béton de référence, indépendamment du pourcentage de remplacement utilisé (**figure 2.22**).

D'autres études [111, 124, 148] ont montré que les fillers calcaires améliorent l'hydratation des composés C_3A et C_3S et créent des sites de nucléation pour les produits d'hydratation grâce à la finesse de leurs particules.

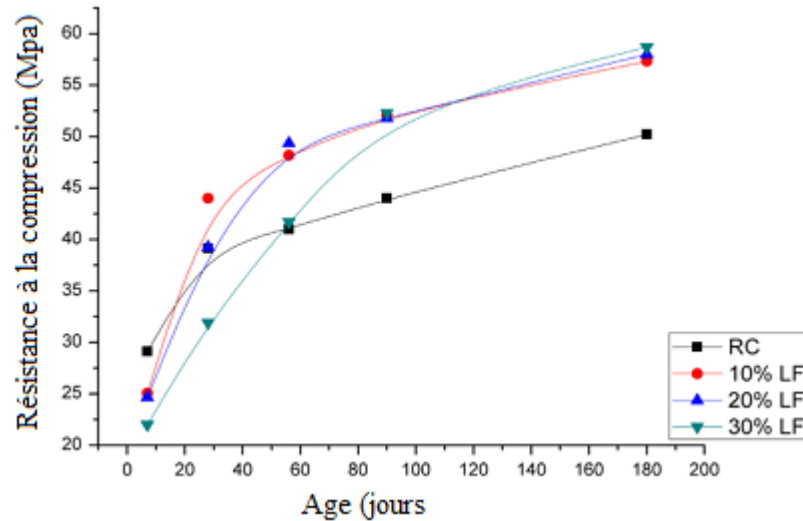


Figure 2.22: Impact du taux de remplacement du ciment par des fillers calcaires (LF) sur la variation de la résistance à la compression du béton [147].

2.3.7. Chaleur d'hydratation

Lorsqu'on remplace une partie du ciment par une pouzzolane, la chaleur générée pendant l'hydratation diminue. Cette réduction de la chaleur d'hydratation contribue à minimiser les risques de fissuration thermique dans le béton. En général, la chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est environ la moitié de celle du ciment Portland [149].

Lors de l'hydratation des ciments au laitier, les courbes calorimétriques présentent des différences significatives par rapport à celles du ciment ordinaire. La période d'induction, qui correspond au début de l'hydratation, peut-être plus longue pour les ciments au laitier. Cela signifie que le processus d'hydratation démarre plus lentement. En effet, les ciments au laitier présentent souvent deux pics d'accélération distincts pendant la période d'hydratation. Le premier pic est associé à l'hydratation du clinker, tandis que le second correspond à celle du laitier [150]. Plusieurs études [151-154], montre que l'ajout de laitier dans le ciment réduit la chaleur d'hydratation, surtout aux premiers âges, comme le montre la **figure 2.23**. C'est pourquoi les laitiers sont couramment utilisés dans les constructions en béton massif.

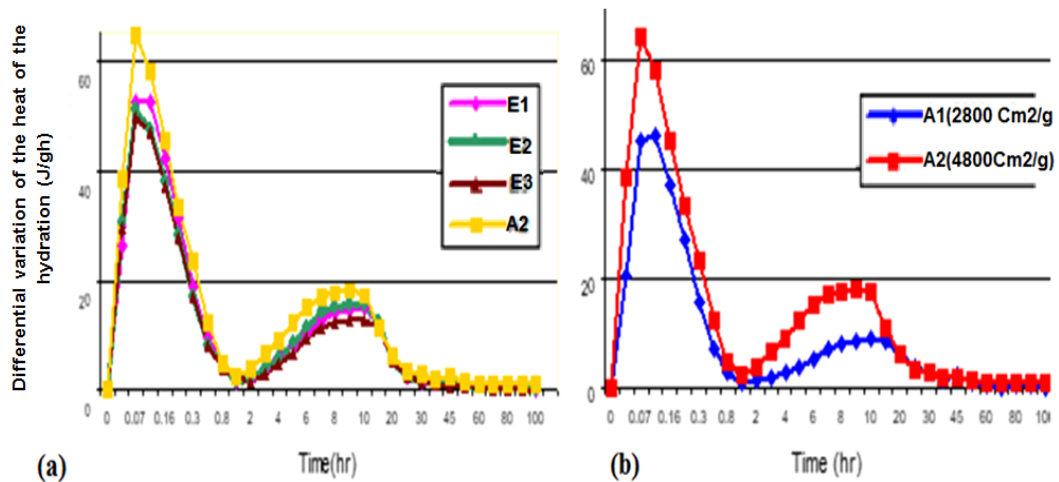


Figure 2.23 : Dégagement de chaleur de ciment ternaire. a : type d'addition, b : finesse [152].
A(clinker); E1 (5% laitier+ 5% roche volcanique); E2 (10% laitier+ 10% roche volcanique); E3 (15% laitier+ 15% roche volcanique)

Les travaux de Diederich [150] sur l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement auto-plaçant du béton montrent que l'ajout de fillers calcaires accélère le processus d'hydratation du ciment (**figure 2.24**). Cette accélération a un impact positif sur les résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours), Cependant, à long terme, cet effet tend à devenir négligeable.

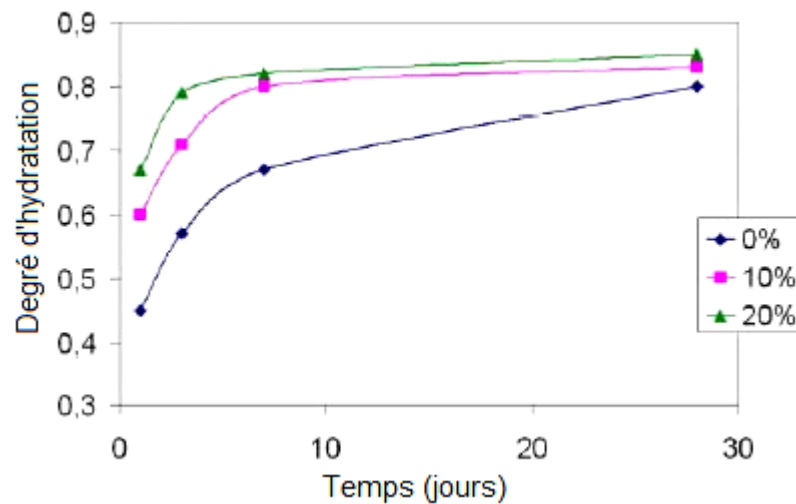


Figure 2.24: Évolution du degré d'hydratation en fonction du dosage en filler [150].

2.3.8. Retrait

Itim et *al.* [43] ont étudié l'effet de l'addition minérale sur le retrait dans les mortiers. Leur résultat montre que le calcaire a un comportement de retrait similaire à celui du ciment ordinaire, tandis que le laitier réduit le retrait final proportionnellement aux taux de

substitution. La pouzzolane naturelle entraîne une augmentation du retrait à 10% de substitution, mais une fois ce taux dépassé, sa valeur diminue. Les pertes d'eau sont plus significatives au jeune âge pour le calcaire et le laitier. Par conséquent, une cure prolongée est nécessaire pour les éprouvettes de laitier et de calcaire, tandis que celles à la pouzzolane nécessitent un peu moins de cure pour éviter toute perte d'eau qui pourrait affaiblir l'hydratation [149]. De même, Laakri [126] montre que le retrait total de mortier non adjuvanté suit une allure croissante dans le temps (**figure 2.25**).

Suntharalingam et Takahashi [155], ont étudié l'effet de différents laitiers de haut-fourneau sur le retrait des mortiers. Les résultats ont montré que les comportements varient considérablement en fonction du type de laitier utilisé. Cependant, dès que du laitier est incorporé au mélange, le retrait devient plus important que pour le mortier sans laitier. Les auteurs concluent que la taille des particules de laitier semble ne pas avoir d'impact significatif sur le retrait. Cependant, le matériau avec la plus grande valeur de retrait correspond à celui contenant le laitier de haut-fourneau le plus cristallisé de l'étude. Il est donc possible que la teneur en minéraux du laitier cristallisé puisse servir d'indicateur pour évaluer le degré de retrait du matériau et sa réactivité.

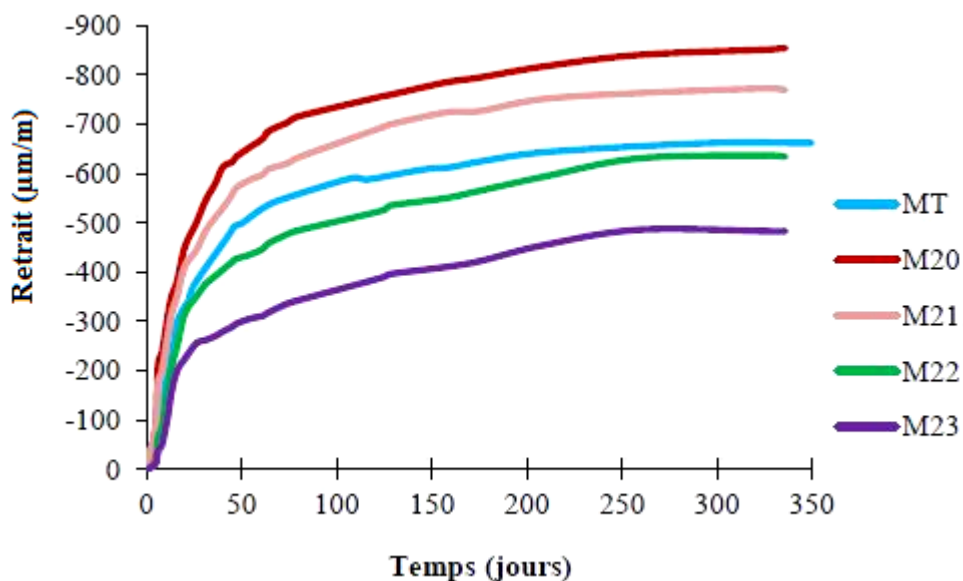


Figure 2.25: Variation du retrait total sur mortiers à 20°C [126].

(MT: béton de référence; M20: 20%PZ; M21: 20%PZ+10%LHF ; M22: 20%PZ+20%LHF; M23: 20%PZ+30%LHF).

Saito et *al.* [156] montrent que le laitier ne semble pas être le seul facteur contribuant à l'augmentation du retrait. La réaction hydraulique du laitier conduit à la formation de la phase CSH, qui entraîne des réseaux poreux plus étroitement compactés. La porosité réduite du matériau entraîne des forces capillaires plus fortes et une auto dessiccation accrue, ce qui se

traduit par un retrait élevé. La réaction plus lente des laitiers peut expliquer pourquoi ce retrait se manifeste ultérieurement par rapport à celui observé dans un matériau contenant uniquement du ciment. Contrairement à ce dernier, le mortier contenant du laitier présente une évolution du retrait à long terme, au-delà de 42 jours [157]. Plusieurs chercheurs [157, 158] combinaient les laitiers avec des polymères super-absorbants, afin de palier partiellement l'augmentation du retrait. Certains ont observé que pour des taux de substitution élevés du ciment par des LHF (85%), le retrait est très faible au jeune âge. Cette réduction du retrait est due à la faible quantité d'hydroxyde de calcium provenant de la réaction d'hydratation du ciment, qui est insuffisante pour activer complètement le laitier. En conséquence, le laitier se comporte alors comme un filler. Jianyong et *al.* [159] montrent que la taille de particule moyenne de $2,5\mu\text{m}$ est particulièrement importante, car elle peut influencer la réactivité du laitier et son effet sur les propriétés du béton, comme illustré sur la **figure 2.26**. Selon Lim et *al.* [160] à long terme, l'augmentation de la teneur en laitier dans la formulation ne conduit pas forcément à un retrait plus important. Ils ont observé un retrait maximal avec une substitution de 50% de laitier, attribuant ce phénomène à un retrait plus faible. L'étude de Mehta [161] met en évidence que le mortier composé de 80% de ciment et 20% de pouzzolane présente les valeurs de retrait les plus élevées. L'incorporation de 20% de pouzzolane finement broyée en substitution du ciment permet d'affiner la porosité. Cela crée des tensions internes supplémentaires, qui s'ajoutent à celles causées par la perte d'eau, augmentant ainsi le retrait.

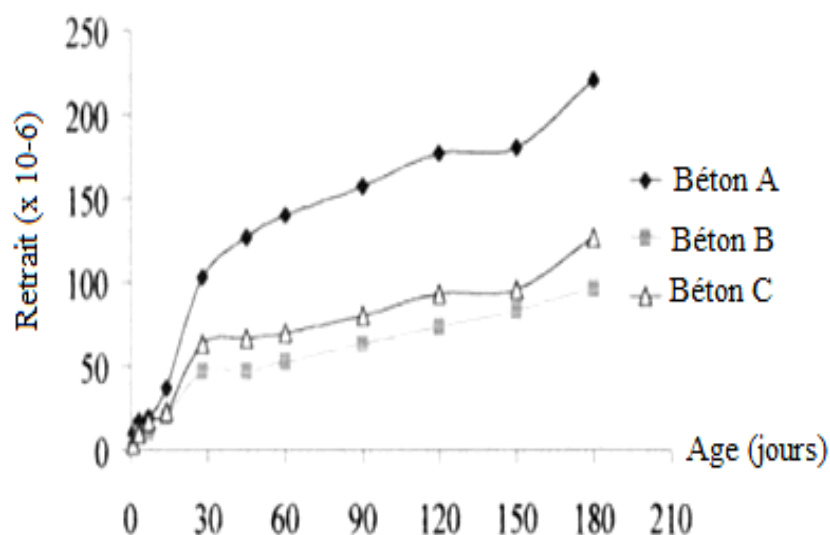


Figure 2.26: Retrait d'un béton contenant du ciment (Béton A); d'un béton contenant du ciment et du LHF (Béton B) et d'un béton contenant du ciment, du LHF et FS (Béton C) [159].

2.4. Apport combiné du sable SDC et additions minérales

2.4.1. Ouvrabilité

L'addition de la fumée de silice dans les bétons et mortiers utilisant du sable SDC entraîne une diminution encore plus importante de l'ouvrabilité par rapport aux mélanges utilisant du sable SN. Cela est dû à la finesse de la fumée de silice et à la rugosité du sable SDC, qui ensemble augmentent la surface spécifique du mélange. Nehdi [162] a observé que les bétons composés de ciment Portland ordinaire, de fumée de silice et de fines calcaires subissaient des pertes rapides et significatives de consistance. Mane et *al.* [163] ont étudié la possibilité de substituer le sable SN par du sable SDC dans le béton. Ils ont remplacé divers pourcentages de sable SN par du sable SDC (allant de 0% à 100%) avec un rapport E/C de 0.45. De plus, 20% du ciment a été partiellement remplacé par des additions minérales (cendres volantes, fumée de silice, laitier de haut fourneau et le métakaolin). Les résultats indiquent que plus le pourcentage de remplacement du sable SN par du sable SDC augmente, plus la maniabilité du béton diminue (**figure 2.27**). Cette diminution est principalement due à la forme angulaire et à la surface rugueuse du sable SDC, qui entraînent une friction interne accrue, réduisant ainsi les propriétés d'écoulement du béton.

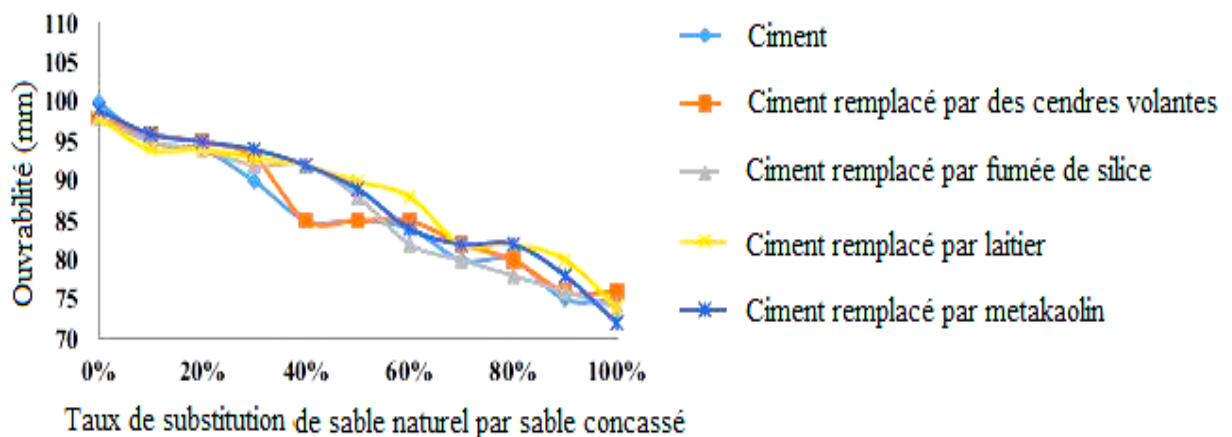


Figure 2.27: Variation de l'affaissement des bétons à base de sable SDC et d'additions minérales [163].

L'incorporation du laitier de haut fourneau (LHF) dans les mortiers et bétons, en particulier avec du sable SDC, influence de manière significative l'ouvrabilité. En tant que sous-produit de la fabrication du fer, le laitier de haut fourneau agit comme un liant hydraulique lorsqu'il est activé chimiquement. Cependant, ses effets sur l'ouvrabilité dépendent de la quantité utilisée ainsi que de la nature des matériaux employés. L'ajout de laitier de haut

fourneau (LHF) dans les bétons utilisant du sable SDC améliore généralement l'ouvrabilité. Cette diminution s'explique par la finesse du laitier, qui accroît la surface spécifique du mélange et, par conséquent, la demande en eau pour obtenir une consistance adéquate. De plus, la nature angulaire et la granulométrie irrégulière du sable SDC rendent le mélange encore plus rigide. Verma et *al.* [164] ont étudié l'effet du remplacement partiel du sable SN par du sable SDC en présence d'additions minérales. Les additions minérales utilisées incluent les cendres volantes (FA) et le laitier de haut fourneau (LHF). Le ciment a été remplacé par trois proportions de cendres volantes (15%, 20%, 25%) et deux proportions de LHF (40% et 50%). Dans chaque cas, 50% du sable SN a été substitué par du sable SDC. Les résultats montrent que les additions minérales améliorent à la fois la résistance à la compression et la maniabilité, grâce à la réduction du rapport eau/ciment.

2.4.2. Paramètres rhéologiques

L'effet combiné des additions minérales, comme la fumée de silice, et du sable SDC sur la rhéologie des bétons se révèle particulièrement pertinent pour les formulations de béton, notamment les bétons autoplaçants et à haute performance. La fumée de silice, en raison de sa finesse extrême et de sa nature pozzolanique, améliore la cohésion du béton frais en augmentant la viscosité et en réduisant la ségrégation et le ressuage. Son incorporation dans le béton agit comme un lubrifiant à l'échelle microscopique, comblant les vides entre les grains de ciment et les granulats, ce qui facilite la mise en œuvre tout en augmentant la densité du mélange.

Le sable SDC, quant à lui, présente des grains anguleux qui augmentent l'interaction particulaire, ce qui peut rendre le mélange plus cohésif mais moins fluide. Cette particularité peut augmenter la résistance au cisaillement du béton frais, rendant nécessaire l'ajout de superplastifiants pour maintenir une fluidité adéquate. L'utilisation conjointe du sable SDC et des additions minérales peut conduire à une diminution du seuil cisaillement et de la viscosité plastique, mais ces effets varient selon le pourcentage de remplacement et le type d'addition minérale utilisée. Ahari et *al.* [165] ont révélé que la fumée de silice et le laitier de haut fourneau réduisaient généralement la viscosité plastique et le seuil cisaillement par rapport aux mélanges contenant uniquement du ciment Portland, améliorant ainsi les caractéristiques d'écoulement. Cependant, le métakaolin, les cendres volantes de classe C et de classe F ont augmenté la viscosité plastique, rendant le béton à base du sable SDC plus résistant à l'écoulement. Ces ajouts cimentaires ont également entraîné une demande accrue de

superplastifiants pour maintenir un écoulement constant, indiquant des valeurs de contrainte de seuil plus élevées pour les mélanges de béton autoplaçant (BAP).

2.4.3. Absorption d'eau

Le laitier de haut fourneau est connu pour réduire la porosité capillaire des bétons et mortiers. En remplaçant partiellement le ciment Portland, le laitier réagit en présence de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libéré lors de l'hydratation du ciment pour former des produits de réaction cimentaire supplémentaires, notamment du silicate de calcium hydraté CSH. Cela contribue à la densification de la matrice du béton, réduisant ainsi le volume des pores capillaires qui permettent l'absorption d'eau. Mane *et al.* [78] ont constaté que les taux d'absorption d'eau sont élevés dans un béton sans sable SDC. Cela peut être dû à un remplissage sous-optimal du sable ; une répartition inadéquate des tailles de particules entraîne la formation de vides supplémentaires dans le béton, ce qui augmente son absorption d'eau [166]. En revanche, lorsque 60% du sable SN a été remplacé par du sable SDC, une diminution de l'absorption d'eau a été observée comme illustré sur la **figure 2.28**. Cela est attribué à l'effet de compactage des grains et à une distribution optimale des tailles de particules du sable SDC. Il a également été observé que le béton fabriqué en substituant le ciment par la fumée de silice et en utilisant du sable SDC présente des performances supérieures en absorption d'eau par rapport à celui où le ciment est substitué par des cendres volantes, du LHF ou du métakaolin. Cette amélioration est due à l'efficacité de la réaction pouzzolanique de la fumée de silice, qui produit un gel de CSH supplémentaire. Ce gel comble les micro-vides, rend le béton plus compact et optimise ainsi sa microstructure [167].

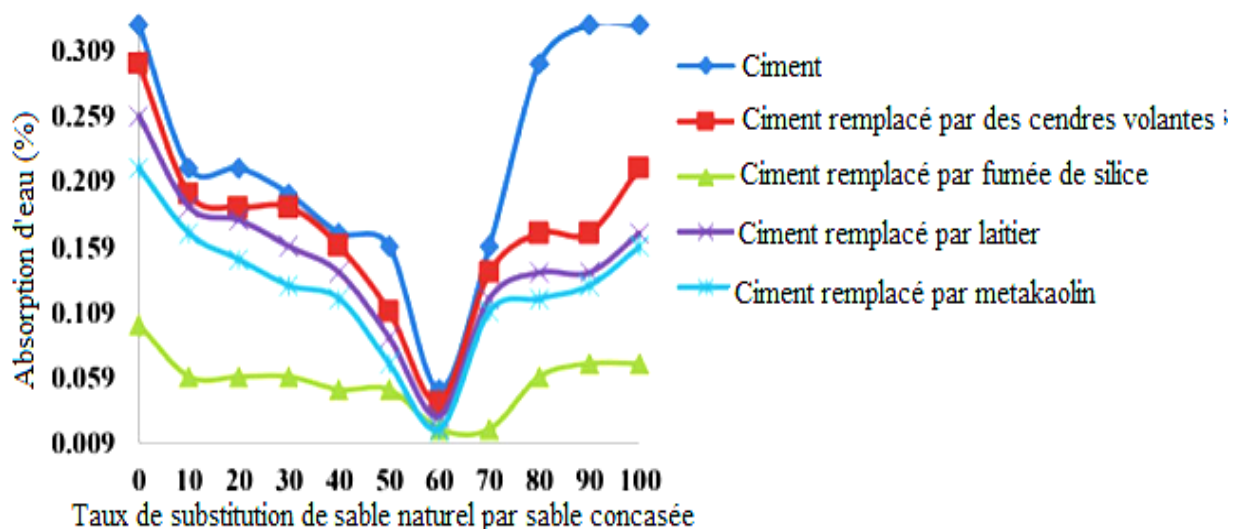


Figure 2.28 : Variation de l'absorption d'eau des bétons à base de sable SDC et d'additions minérales [78].

2.4.4. Pertes de masse

Gadri et Guettala [168] ont constaté une diminution significative de 4% pour le béton de référence. Au-delà de ce seuil, il a été observé que les deux types de béton contenant du sable SDC et du FS montrent des tendances similaires, comme illustré par les courbes superposées dans la **figure 2.29**. Une analyse comparative des pertes de masse et des déformations dues au retrait de ces matériaux révèle un phénomène irréversible. En effet, le matériau présentant un retrait plus important, à savoir le béton BS-SPE2, qui est un béton à base de sable SDC sans ajout de fumée de silice, a enregistré une perte de masse moindre. À l'inverse, les bétons contenant 5% et 8% de FS montrent une tendance opposée. Cette observation peut être expliquée par le fait qu'au-delà d'un certain pourcentage, la fumée de silice agit principalement comme un additif inerte de granulométrie fine. Le mécanisme de retrait, défini par la variation du volume du béton pendant le séchage, ne correspond pas nécessairement au volume d'eau évaporé [8].

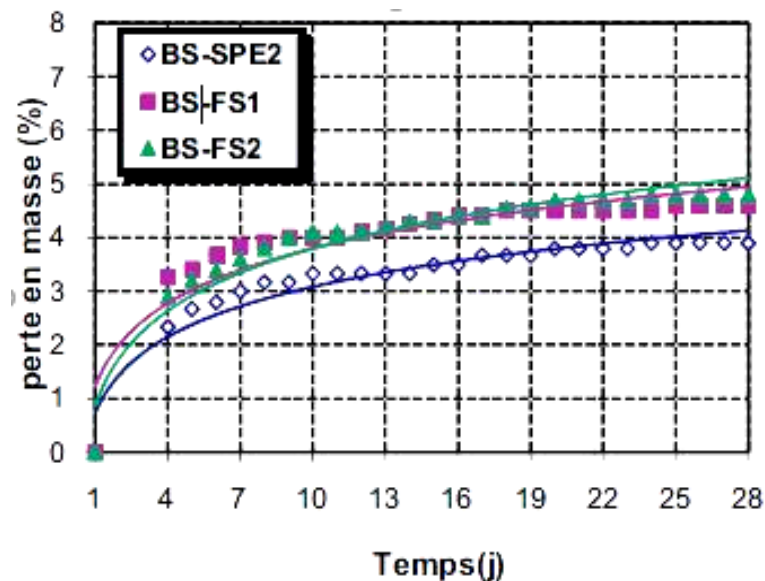


Figure 2.29 : Influence de la fumée de silice sur la perte de masse du béton à base de sable SDC [168].

BS-FS1 (calcaire +8% FS) ; BS-FS2 (calcaire +5% FS) ; BS-SPE2 (calcaire)

2.4.5. Résistance à la traction par flexion

D'après l'étude de Shanumugapriya et *al.* [169], la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance augmente proportionnellement à l'ajout de fumée de silice et de sable SDC. Le béton contenant 5% de fumée de silice montre une résistance maximale supérieure de 12% et 15% par rapport au béton conventionnel, respectivement aux âges de 7 et 28 jours. Pour un même pourcentage de fumée de silice, les augmentations de résistance enregistrées sont de 6%, 12%, 15% et 2% pour des remplacements partiels du sable SN par du

sable SDC aux proportions respectives de 10%, 30%, 50% et 70%. L'analyse des performances en flexion du béton à haute performance indique que le remplacement optimal est obtenu en substituant 50% du sable SN par du sable SDC. Il a également été noté que les particules ultrafines de fumée de silice, principalement composées de silice amorphe, contribuent à l'amélioration de la résistance à la flexion du béton grâce à des actions pouzzolaniques et physiques. La résistance à la traction par flexion du béton contenant de la fumée de silice a continué de croître jusqu'à l'âge de 28 jours, atteignant un maximum de 12% pour des taux de remplacement de 40% à 50% du sable SN par le sable SDC.

Mane et *al.* [163] ont étudié le remplacement partiel du sable SN par le sable SDC avec la substitution de 20% du ciment par les cendres volantes, la fumée de silice, laitier de haut fourneau (LHF) ou métakaolin. Ils ont observé une augmentation de la résistance à la traction jusqu'à un taux de substitution de 60%. Au-delà de ce seuil, la résistance à la traction diminue. La résistance maximale à la traction, atteignant 4.35 MPa, est obtenue lorsque 60% du sable SN est remplacé par du sable SDC. Des résultats similaires sont observés pour les bétons produits en substituant le ciment par des cendres volantes, de la fumée de silice, du LHF ou du métakaolin, avec des résistances à la traction respectives de 4.39 MPa, 4.72 MPa, 4.66 MPa et 4.70 MPa. Il est également constaté que le béton dans lequel le ciment est remplacé par la fumée de silice et le sable SN par du sable SDC présente une meilleure résistance à la traction que celui où le ciment est substitué par des cendres volantes, du LHF ou du métakaolin. Par conséquent, la résistance à la traction la plus élevée est obtenue dans le béton où le ciment est partiellement remplacé par de la fumée de silice et le sable SN par 60% de sable SDC, comme illustré dans la **figure 2.30**.

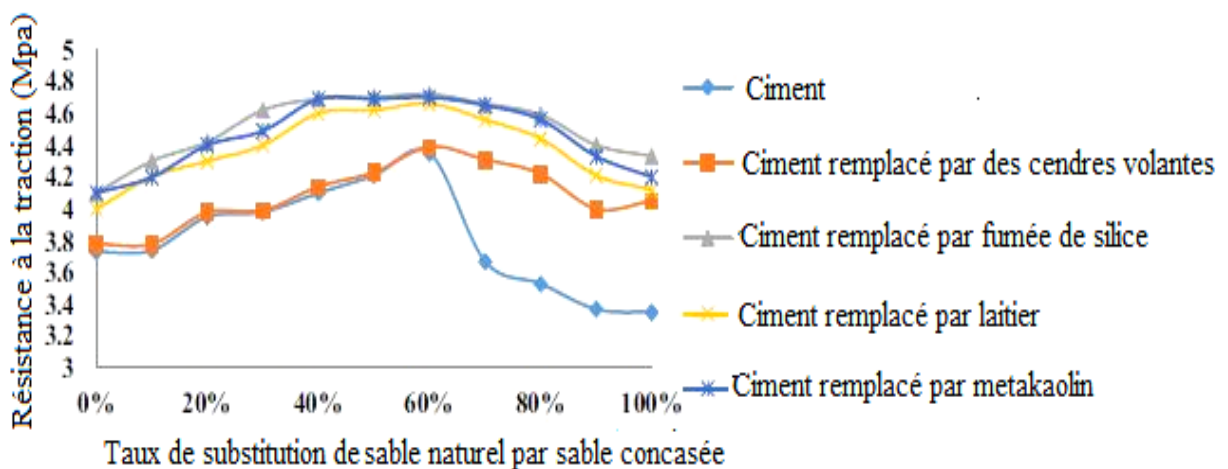


Figure 2.30 : Résistance à la traction des bétons en fonction du sable SDC et différents additifs minéraux [163].

2.4.6. Résistances à la compression

Meziane et *al.* [54] ont montré que les fines calcaires présentes dans le sable SDC contribuent positivement dans un ciment à base de pouzzolane naturelle à activer les grains de ciment et à compléter la distribution granulaire de la mixture. Ceci a été concrétisé par une élévation des résistances à la compression de 30% à 28 jours lorsque leur taux dépasse les 10%

Figure 2.31.

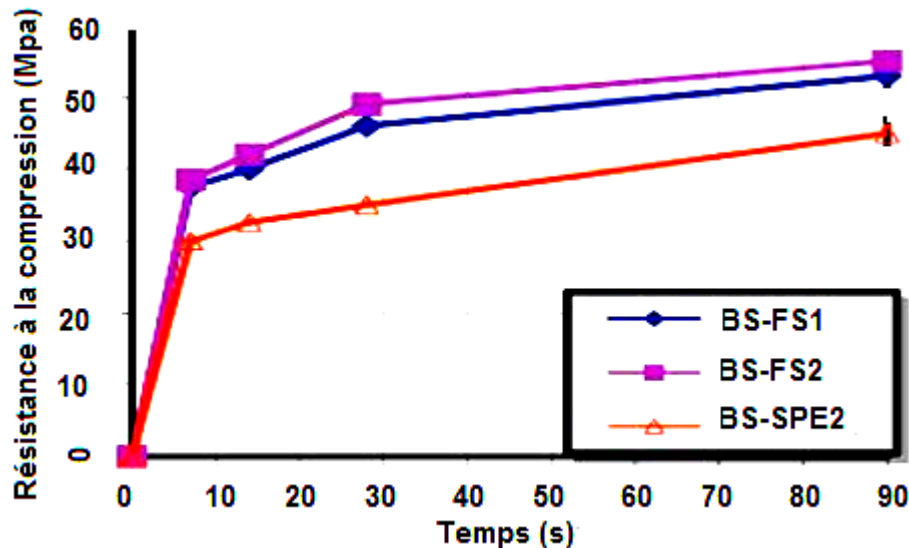


Figure 2.31 : Effet de fumé de silice sur la résistance à la compression de béton à base du sable SDC [54].

BS-FS1 (calcaire +8% de FS) ; BS-FS2 (calcaire +5% de FS) ; BS-SP2 (superplastifiant)

Selon l'étude de Gadri et Guettala [168], l'ajout de 5% de fumée de silice (17.5 kg/m^3) dans le béton à base de sable (SDC) a significativement amélioré la compacité et les propriétés mécaniques du béton. En outre, la résistance à la compression montre une augmentation notable avec le temps, passant de 49 MPa à 28 jours à 55 MPa à 90 jours. Shanumugapriya et *al.* [169] ont étudié le remplacement partiel du sable SN par le sable artificiel dans le béton à haute performance avec le fumé de silice. Ils ont montré que le remplacement partiel du ciment avec 5% de fumé de silice donne une résistance à la compression de 18.8%, supérieure que celle des bétons contenant 2.5% et 1.5% de fumé de silice. L'augmentation moyenne de la résistance à la compression du béton a été de 11, 12, 18.8 et 5% respectivement pour des remplacements de 10, 30, 50 et 70% du sable SN par le sable artificiel (**figure 2.32**). Par ailleurs, la résistance est optimale lorsque le taux de la substitution du sable SN par le sable artificiel est 50%.

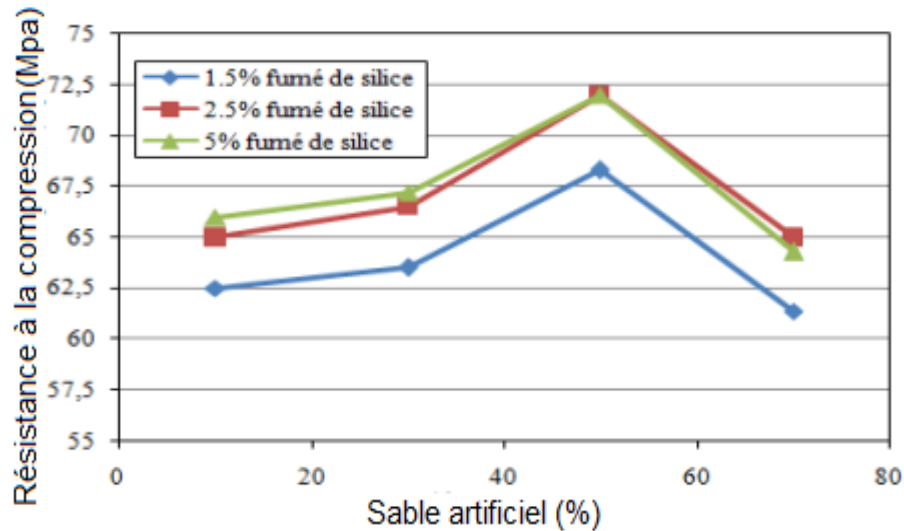


Figure 2.32 : Résistance à la compression du béton à haute performance à l'âge de 28 jours en fonction de proportion de sable artificiel et du taux de fumée de silice [167].

2.4.7. Chaleur d'hydratation

L'effet combiné des additions minérales, comme la fumée de silice, le métakaolin et les cendres volantes, avec le sable SDC a un impact notable sur la chaleur d'hydratation des bétons. Les additions minérales agissent en réduisant la chaleur libérée lors de l'hydratation initiale du ciment, car elles remplacent partiellement le ciment Portland, qui est le principal contributeur à la chaleur d'hydratation. Par exemple, la fumée de silice et le métakaolin réagissent de manière pozzolanique, formant des gels de CSH supplémentaires mais à un rythme plus lent que l'hydratation du clinker, ce qui modère le pic de chaleur en phase précoce.

Le sable SDC, en raison de sa composition minéralogique et de sa texture anguleuse, peut influencer la cinétique d'hydratation en augmentant la demande en eau du mélange. Cela entraîne un rapport eau-liant plus élevé, ce qui peut ralentir l'hydratation et diminuer la chaleur totale générée, bien que les premiers stades d'hydratation puissent être légèrement accélérés en raison de la surface rugueuse du sable SDC, qui favorise la nucléation des produits d'hydratation. Les études montrent que l'utilisation conjointe de ces composants modifie le profil thermique du béton, avec une réduction du pic de température et un allongement de la durée de montée en température. Meziane et *al.* [54] ont montré que le ciment ordinaire C1 est fortement influencé par le type de sable, ce qui se traduit par une augmentation du deuxième pic d'hydratation, qui survient 2,5 heures avant celui observé avec le sable normalisé. Concernant le mortier à base de ciment C2, composé de calcaire, la chaleur d'hydratation atteint un pic plus élevé lorsque le sable SDC est utilisé. En revanche, l'impact du sable SDC sur l'hydratation du ciment C3, contenant 18 % de pouzzolane naturelle, est plus modéré et

entraîne une augmentation uniforme de la chaleur d'hydratation à tous les temps de réaction. Par ailleurs, des recherches antérieures ont mis en évidence un effet bénéfique sur le développement de l'hydratation lorsqu'une petite quantité de fines calcaires est combinée avec des cendres volantes [170] ou de la pouzzolane naturelle [171]. Cette combinaison favorise une augmentation du volume des hydrates d'alumine, en raison de la plus grande disponibilité de ces additions minérales dans le ciment C3.

2.4.8. Retrait

Les propriétés hydriques des bétons composés de sable SDC, avec ou sans ajout de fumée de silice, présentent des différences significatives, que ce soit en termes de retrait ou de perte de masse. Les bétons incorporant de la fumée de silice, à savoir BS-FS1 (8% de FS) et BS-FS2 (5% de FS), présentent des déformations nettement inférieures à celles observées sur le béton sans fumée de silice (BS-SPE2 0% de FS). Les valeurs de retrait pour ces bétons ne dépassent pas 100 $\mu\text{m/m}$ à l'âge de 28 jours, comme illustré à la **figure 2.33**, ce qui constitue un résultat encourageant [168]. Umamaheswaran et *al.* [172] ont réalisé des essais de retrait sur des échantillons de béton de dimensions 70×70× 300 mm, conformément à la norme IS 1199:1959. Les essais ont été effectués après 14 jours. Le retrait c'est révélé légèrement plus faible dans le béton contenant du sable SN par rapport à celui utilisant du sable SDC, bien que cette différence soit marginale (0.003mm/m). Parmi les mélanges incorporant des additions minérales, la formulation à base de 10% de fumée de silice et de sable SDC, présente le taux de retrait le plus faible, avec une valeur de 0.011 %.

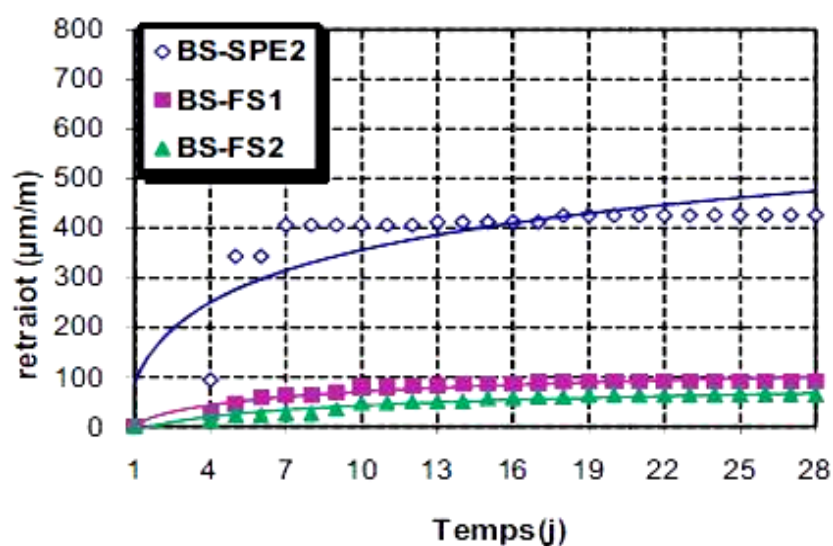


Figure 2.33 : Effet de fumé de silice sur le retrait du béton à base de sable SDC [168].
BS-FS1 (calcaire +8% de FS) ; BS-FS2 (calcaire +5% de FS) ; BS-SP2 (superplastifiant)

2.5. Conclusion

L'utilisation du sable SDC dans le béton, en présence d'additions minérales, a fait l'objet de nombreuses études à travers le monde. Selon les résultats de ces recherches, il est observé que les propriétés des mortiers et bétons à l'état frais et durci sont largement influencées par divers paramètres, tels que les caractéristiques du sable SDC utilisé, le type d'addition minérale, le taux de substitution de l'addition ou le dosage utilisé, ainsi que la finesse. Ces paramètres doivent être rigoureusement contrôlés afin d'obtenir un béton ou un mortier durable et performant.

Chapitre 3

Matériaux et méthodes d'essai

3.1. Introduction

L'identification des matériaux constituant les bétons et mortiers est cruciale. La compréhension approfondie des propriétés physico-chimiques de chaque composant est obtenue grâce à des analyses et essais normalisés réalisés au laboratoire Géomatériaux (LaG) de l'université de Chlef. Ceci permet d'interpréter les résultats des tests effectués sur les mélanges de ces matériaux. Les matériaux employés dans cette étude sont les suivants :

- Ciment Portland composé (CEM II/A 42.5) de la cimenterie d'Oued Isly (Chlef).
- Sable naturel SN provenant d'Oued Ras.
- Sable de déchet de carrière SDC provenant de la carrière d'Oued Fodda (Chlef).
- Fumée de silice commercialisé (FS).
- Pouzzolane naturelle de Beni Saf (NP).
- Laitier de haut fourneau broyé d'El-Hadjar (LHF)
- Adjuvants (super plastifiants) MEDAFLOW 30 provenant de GRANITEX.

3.2. Matériaux utilisés

3.2.1. Ciment

Un ciment Portland composé (CEM II/A 42.5), fabriqué par la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) et contenant 18% de calcaire, a été utilisé dans cette étude. Ses propriétés chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques physicochimiques et minéralogiques du ciment.

Caractéristiques chimiques										
Désignation	PAF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO _{libre}
%	4.49	21.14	5.66	3.27	62.30	0.74	1.58	0.81	0.11	0.7
Caractéristiques minéralogiques										
Désignation	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
%	41.8		33.3		5.1		10.7			
Caractéristiques physiques										
Désignation	Début de prise		Fin de prise		Expansion (mm)		Finesse de Blaine (cm ² /g)			
	3h5mn		5h45mn		1		3300			

3.2.2. Sables

Dans cette étude, deux types de sable ont été utilisés : un sable SN provenant d'Oued Ras et un sable SDC de nature minéralogique silico-calcaire provenant de la carrière d'Oued Fodda (Chlef). Les principales caractéristiques de ces sables sont résumées dans le tableau 3.2. L'analyse granulométrique des deux sables est présentée dans la **figure 3.1**. Pour cette étude, le sable SDC utilisé présente une teneur en fines de 15%. Ce pourcentage de fines est considéré comme acceptable pour une utilisation courante dans les mélanges de béton et de mortier, conforme aux normes de plusieurs pays à travers le monde. Par exemple, les normes britanniques (BS 822) autorisent jusqu'à 16% de fines dans le sable, tandis que la norme française NF P 18 541 [173] et la norme australienne imposent des limites de moins de 18% et 25%, respectivement. La norme indienne, quant à elle, permet jusqu'à 20% de fines dans le sable. La texture de la surface et la forme des particules de ces sables sont illustrées sur la figure 3.2.

Tableau 3.2 : Caractéristiques des deux sables utilisés.

Caractéristiques	Module de finesse	Equivalent de sable (%)	Poids volumiques spécifique (kg/m ³)	Poids volumiques apparent (kg/m ³)	Compacité
Sable SN	2.95	79	2608	1562	59
Sable SDC	2.62	81	2620	1470	56

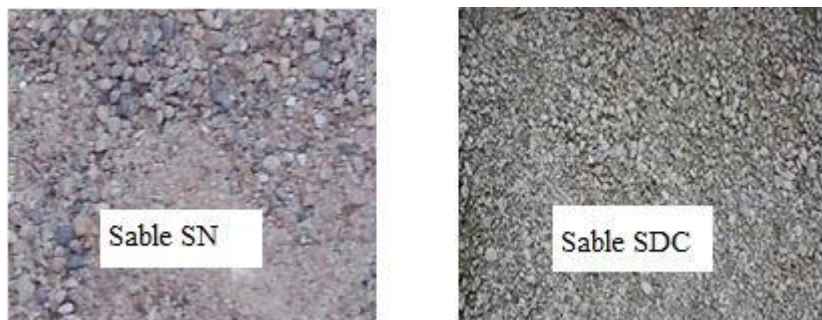


Figure 3.1 : Texture de la surface du sable naturel et concassé.

3.2.3. Additions minérales

Afin d'apporter à l'étude une pertinence et une généralisation suffisantes, il a été décidé d'entreprendre des travaux de recherche en intégrant des additions minérales présentant différentes finesses et natures minéralogiques, disponibles sous forme de gisements naturels ou de sous-produits industriels. L'objectif du programme expérimental est de mettre en évidence

tous les effets physiques et chimiques induits par les additions minérales sur la matrice cimentaire à l'état frais, et de comparer les résultats obtenus avec les études antérieures.

Trois additions minérales distinctes par leurs natures minéralogiques, morphologiques et chimiques ont été utilisées dans cette recherche ; une addition de laitier de haut fourneau broyé (LHF), une addition de pouzzolane naturelle (NP) et une addition de fumée de silice (FS). La **figure 3.2** présente les courbes granulométriques des matériaux utilisés, obtenues par granulométrie laser.

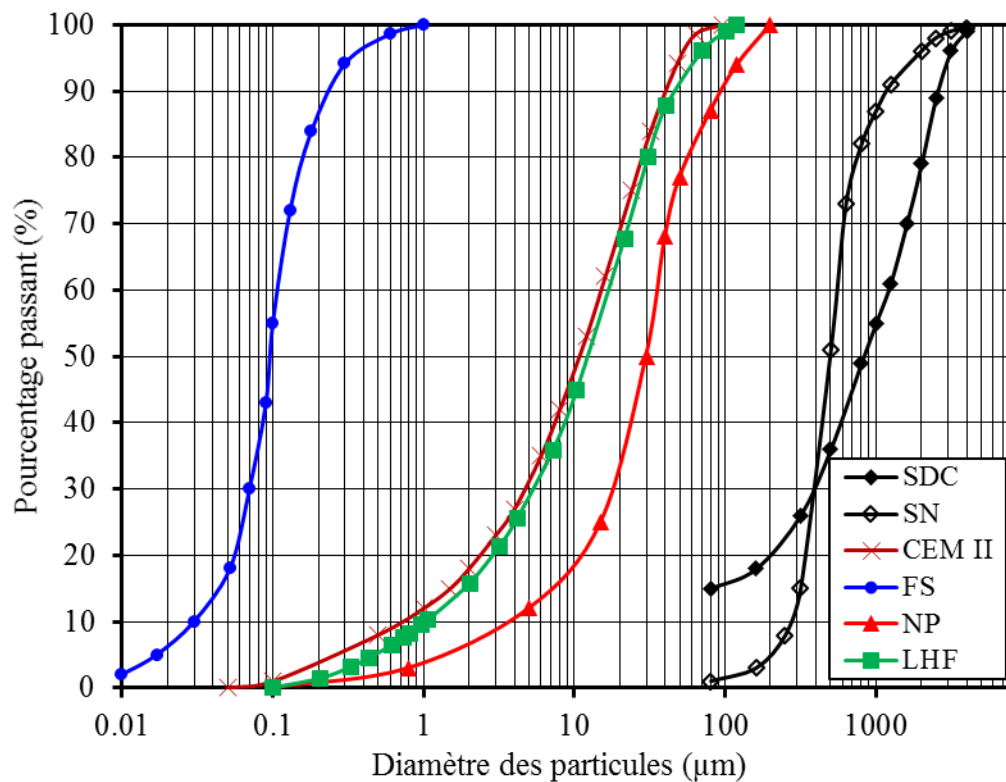


Figure 3.2 : Courbes granulométriques des matériaux utilisés.

3.2.3.1. Fumée de silice (FS)

La fumée de silice est un sous-produit issu de l'industrie de fabrication du silicium. Au cours des quinze dernières années, elle a fait l'objet d'études approfondies en raison de sa finesse exceptionnelle et de sa réactivité significative en présence de la chaux. Le tableau 3.3 résume les propriétés de cette addition.

Tableau 3.3 : Caractéristiques chimique et physico-mécaniques de fumée de silice.

Composition chimique									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	Total
89	0.3	0.9	0.3	1.5	0.6	1.7	0.3		
CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANIQUES									
Densité	Pouzzolanité	Surface Spécifique Blaine		Résistance Mécanique (granulat)					
2.24	95%	18200 cm ² /g							

3.2.3.2. Pouzzolane naturelle (NP)

La pouzzolane est une roche naturelle issue de projections volcaniques scoriacées. Sa couleur varie généralement du noir au rouge en fonction du degré d'oxydation du fer, se présentant respectivement sous forme de magnétite ou d'hématite. Les pouzzolanes résultent du broyage de la roche naturelle provenant du gisement volcanique de Bouhamdi, situé à 2500 m au sud de Beni-Saf, à l'ouest de l'Algérie. Le tableau 3.4 récapitule quelques caractéristiques de cette matière.

Tableau 3.4 : Caractéristiques chimique et physico-mécaniques de la pouzzolane.

Composition chimique									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	Total
40.40	17.5	10.5	10.5	3.8	3.4	1.5	0.4	4.31	98.31
CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANIQUES									
Densité	Taux de verre	Surface Spécifique Blaine		Résistance Mécanique (granulat)					
2.8	15%	3200 cm ² /g		33.2 cm ² /g					

3.2.3.3. Laitier des hauts fourneaux (LHF)

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit issu de la fabrication de fonte dans les usines sidérurgiques. Sa production est intrinsèquement liée à la fabrication de fontes qui serviront à la production ultérieure d'aciers. En Algérie, le complexe sidérurgique d'El-Hadjar génère un volume considérable de laitier, atteignant 700 000 tonnes par an, sous différentes formes. Ce matériau est actuellement utilisé de manière limitée, principalement dans des domaines tels que la construction de routes et dans l'industrie cimentière. Les particules de laitier se présentent sous la forme de grains transparents clairs et isotropiques, évoquant un aspect poreux du verre de forme angulaire. Les principales caractéristiques de cette matière sont répertoriées dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Caractéristiques chimique et physico-mécaniques du laitier.

Composition chimique									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	Total
40.20	5.85	1.9	42.2	4.72	0.12	0.43	1.54	0.8	99.76
CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANIQUES									
Densité	Taux de verre	Surface Spécifique Blaine		Résistance Mécanique (granulat)					
2.8	80%	3900 cm ² /g		45 cm ² /g					

3.2.4. Adjuvant

Le superplastifiant employé pour contrôler l'ouvrabilité du mortier dans cette étude, est fourni par l'entreprise GRANITEX et commercialisé sous le nom : Medaflow (30) à base de polycarboxylates d'Éther désigné par SP. Le tableau 3.6 présente certaines caractéristiques de ce produit.

Tableau 3.6 : Caractéristiques physico-chimiques de superplastifiant utilisé.

Caractéristique	Teneur en extrait sec %	Forme	Couleur	Ph	Densité g/cm ³
Medaflow 30	30	Liquide	Brun clair	6 à 6.5	1.07

3.2.5. Eau de gâchage

Pour la préparation des mortiers, de l'eau potable dont la température se situe entre 15 et 16 °C a été utilisée afin de maintenir une température constante de la pâte, après mélange, avoisinant les 20 °C. De plus, cette eau répond à toutes les exigences de la norme XP P18-303 [174].

3.3. Formulation et confection des éprouvettes

3.3.1. Formulation des mortiers

Dans cette étude, des éprouvettes de mortier ont été confectionnées avec divers mélanges. Les additions minérales ont été partiellement remplacées par 0%, 10%, 20% et 30% du ciment, et les propriétés du mortier à base de sable SDC ont été comparées à celles du mortier à base de sable SN. Un rapport E/C de 0.5 a été utilisé, avec l'introduction de divers dosages de superplastifiant pour maintenir une ouvrabilité constante pour tous les mélanges, correspondant à 80% d'étalement **tableau 3.7**. Les formulations des mélanges retenus sont présentées dans le **tableau 3.8**.

Tableau 3.7 : Dosage en superplastifiant pour étalement de 80%.

%	SP(%)		
	SDC-FS	SDC-NP	SDC-LHF
0	0.44	0.44	0.44
10	0.7	0.65	0.75
20	0.9	0.75	0.7
30	1	0.8	0.65

Tableau 3.8 : Proportions des mélanges des mortiers.

Mortiers	CEM II (g)	SN (g)	SDC (g)	Taux de remplacement (%)	FS (g)	NP (g)	LHF (g)	E/C
M0	450	1350	0	0	0	0	0	0.5
M1	450	0	1350	0	0	0	0	
M2	405			10	45	0	0	
M3	360			20	90	0	0	
M4	315			30	135	0	0	
M5	405			10	0	45	0	
M6	360			20	0	90	0	
M7	315			30	0	135	0	
M8	405			10	0	0	45	
M9	360			20	0	0	90	
M10	315			30	0	0	135	

3.3.2. Préparation des échantillons

Les mortiers à base de sable SDC et de sable SN sont réalisés conformément à la norme EN 196-1 [175]. Le mélange des composants du mortier est effectué pendant une durée de 4 minutes, conformément aux prescriptions normatives. La méthode de malaxage ainsi que les modalités d'incorporation de l'adjuvant pour la préparation des mortiers sont détaillées dans le **tableau 3.8**. La fabrication de chaque type de mortier a été réalisée en suivant les étapes suivantes :

1. Débutez en versant d'abord le ciment, le sable et l'addition dans la cuve du malaxeur, puis effectuez un malaxage à sec pendant 1 minute à une vitesse lente.
2. Ajouter les deux tiers de l'eau de gâchage et procéder au malaxage pendant 1 minute à une vitesse lente.
3. Incorporer le tiers restant de l'eau de gâchage, ainsi que la quantité de superplastifiant, de manière progressive tout en continuant le malaxage pendant 1 minute.
4. Malaxer à vitesse rapide pendant 1 minute.
5. Le mortier est désormais prêt à être testé pour son ouvrabilité et ses propriétés rhéologiques.

Tableau 3.9 : Méthode de malaxage et procédure d'incorporation de l'adjuvant.

Opérations	Introduire (Ciment, sable et Addition)	Verser (2/3 E)	Verser (1/3E+SP)		Préparation des échantillons	
Durée						
	0	1min	2min	3min	4min	5min
Malaxeur	Vitesse lente		Vitesse Lente	Vitesse Rapide		

3.3.3. Conditions de conservation des éprouvettes

Après le remplissage, les moules ont été conservés dans l'ambiance du laboratoire. Après 24 heures, ils sont démoulés et conservés sous les conditions relatives à chaque essai.

- Les échantillons destinés aux essais d'ouvrabilité et de rhéologique sont exécutés directement après le malaxage.
- Les échantillons destinés aux essais mécaniques sont conservés dans l'eau dans l'ambiance de laboratoire jusqu'au jour de l'essai.
- Les échantillons destinés à l'essai d'absorption sont conservés dans l'eau jusqu'à 28 jours.
- Les échantillons destinés à l'essai de retrait sont conservés dans les conditions de laboratoire à l'air libre.

3.4. Essais effectués

3.4.1. Essai d'ouvrabilité

Suite au malaxage des divers mortiers, la fluidité a d'abord été évaluée à l'aide de l'essai d'étalement effectué sur une table à secousses, comme illustré à la **figure 3.2**. Cet essai a été conduit conformément aux normes ASTM C230 [176].

L'essai consiste à verser le mortier préparé dans un moule tronconique. Après démoulage sur la table à secousses, le mortier est soumis à 15 chocs en 15 secondes, puis le diamètre de la galette ainsi formée est mesuré, comme illustré à la **figure 3.2**. L'étalement en pourcentage correspond à l'augmentation du diamètre de la galette par rapport au diamètre initial, selon la formule suivante :

$$E (\%) = 100 \frac{(D_f - D_i)}{D_i} \quad (3.1)$$

D_f : diamètre final.

D_i : diamètre initial.

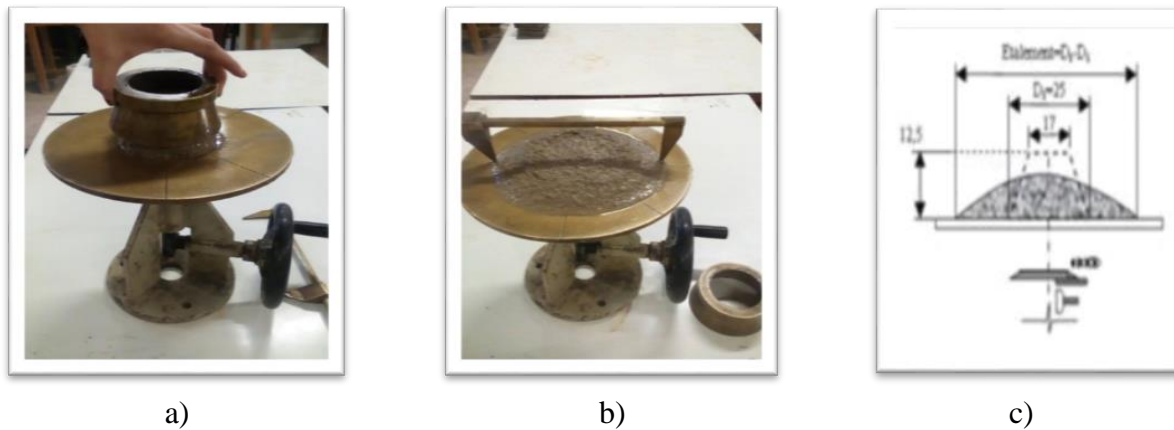


Figure 3.3: Démarches de l'essai d'étalement à la table à secousses du mortier.

3.4.2. Essai de la rhéologie

3.4.2.1. Rhéomètre utilisé

Pour déterminer expérimentalement les propriétés rhéologiques des mortiers, telles que la viscosité plastique et le seuil de cisaillement, un rhéomètre rotatif est utilisé. Ce rhéomètre se compose de trois parties principales : un agitateur de marque Heidolph-RZR 210 2 Control Z, doté de deux vitesses de rotation, avec une plage de vitesses allant de 4 à 540 tr/min (± 1 tr/min) et un couple maximal de 740 N.cm ($\pm 0,1$ N.cm). Un croisillon de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur est utilisé pour cisailier le mortier, tandis qu'un récipient cylindrique de 10 cm de diamètre et 13 cm de hauteur sert de contenant, comme illustré à la **figure 3.3**. Le rhéomètre Heidolph-RZR 2102 Control Z permet de mesurer les contraintes de cisaillement appliquées au mortier en imposant des taux de cisaillement spécifiques. En analysant la courbe représentant les contraintes de cisaillement en fonction de ces taux, il est possible de caractériser le comportement rhéologique de chaque mortier. Ce rhéomètre est contrôlé par un logiciel via un ordinateur.

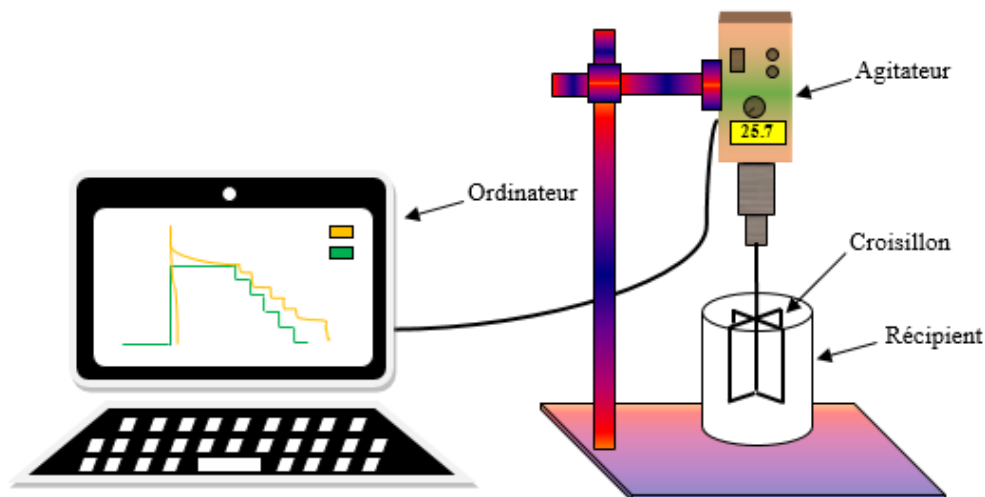


Figure 3.4 : Dispositif du rhéomètre utilisé.

3.4.2.2. Procédure de l'essai

Pour évaluer les paramètres rhéologiques, le mortier est versé en deux couches successives dans le récipient, chaque couche étant compactée à l'aide d'une tige. Le croisillon est ensuite placé au centre du récipient et immergé dans le mortier de manière à ce que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon soit à niveau avec la surface du mortier. Le récipient doit être immobilisé pour prévenir tout déplacement. À l'aide du logiciel et du rhéomètre, la rotation du croisillon est alors lancée en suivant un profil de vitesse préétabli.

3.4.2.3. Profil de vitesse

Le profil de vitesse sélectionné repose sur une série d'essais visant à identifier celui qui fournit les mesures les plus stables tout en minimisant le phénomène de ségrégation [176].

Ce profil doit comporter un nombre suffisant de points pour caractériser adéquatement le comportement du mortier. Les paliers de vitesse définis doivent être espacés de manière à permettre une distinction claire entre les différentes paires (Ω , M). La **figure 3.4** illustre le profil retenu pour la conduite des essais.

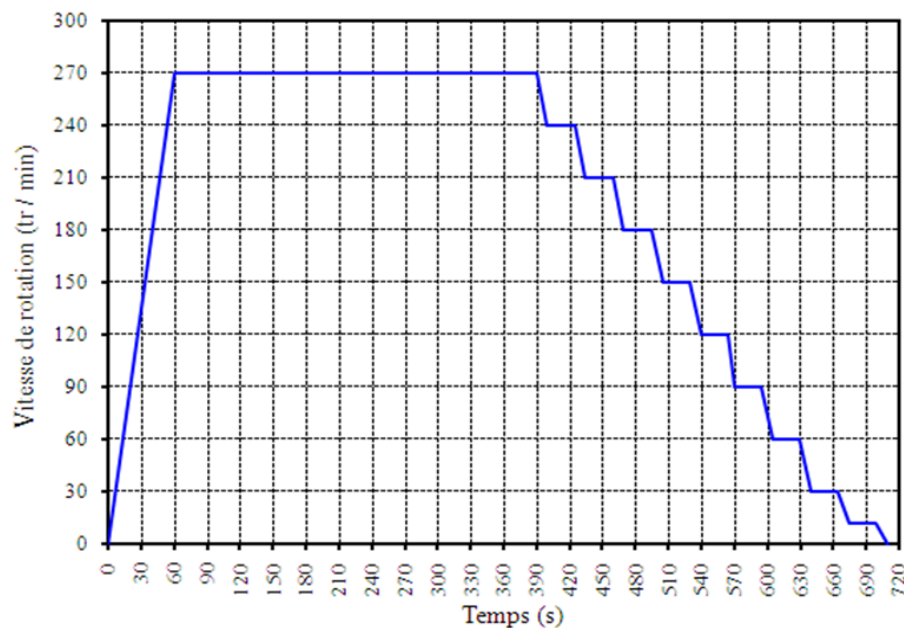


Figure 3.5 : Profil de vitesse [177].

3.4.2.4. Déroulement de l'essai

Pour analyser le comportement rhéologique des divers mortiers, les étapes suivantes ont été suivies :

- 1^{ère} étape : Il est nécessaire de préchauffer le rhéomètre en le faisant fonctionner à sa vitesse maximale de 400 tours par minute pendant une durée suffisante avant de procéder aux essais.
- 2^{ème} étape : Ensuite, il convient de mesurer les couples à vide (M_{vide}) correspondant aux vitesses imposées, conformément au profil présenté dans la **figure 3.4**.
- 3^{ème} étape : Remplir le récipient de mortier en deux couches jusqu'à son niveau supérieur, en piquant 15 fois à l'aide d'une tige appropriée ; positionner et centrer le croisillon de manière à ce que l'extrémité supérieure de ses ailes soit à la hauteur du bord du récipient ; mesurer ensuite les couples totaux correspondant aux vitesses imposées (M_{total}).
- 4^{ème} étape : Analyser les mesures des couples (M) en fonction de la vitesse imposée. Les valeurs des couples M sont calculées en soustrayant M_{vide} de M_{total} .

3.4.3. Essai de la perte de masse

La mesure de la perte de masse est effectuée sur les mêmes éprouvettes de retrait libre, de dimensions 40x40x160 mm. Les éprouvettes sont mesurées au moyen d'une balance de précision avec une résolution de 0.1 g (**figure 3.5**). La perte de masse à un instant donné est déterminée en prenant la moyenne des résultats obtenus sur deux éprouvettes. Le calcul est présenté sous forme de pourcentage en référence à la masse initiale de l'éprouvette :

$$\frac{\Delta m}{m_0} = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100 \quad (3.2)$$

Avec :

- $\frac{\Delta m}{m_0}$: la perte de masse [%]
- m_0 : la masse initiale de l'éprouvette avant dessiccation.
- m_t : la masse mesurée à l'instant t.



Figure 3.6 : Éprouvettes conservé dans l'air libre.

3.4.4. Absorption par immersion

L'absorption d'eau par immersion dans le béton est associée aux mouvements capillaires au sein des pores ouverts du matériau. Pour évaluer cette absorption, une éprouvette de béton est immergée dans l'eau jusqu'à ce que sa masse se stabilise (**figure 3.6**). Cette méthode respecte les exigences de la norme NF EN 206-1 [178].

Elle est exprimée en pourcentage de la masse sèche de l'éprouvette et en tant qu'indicateur de la porosité, l'absorption d'eau sert à évaluer la qualité du béton. L'absorption d'eau par immersion quant à elle est également exprimée en pourcentage de la masse sèche et se calcule selon la relation suivante :

$$Abs = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.3)$$

Où : m_h : Masse de l'éprouvette après immersion en g.

m_s : Masse de l'éprouvette après séchage en g



Figure 3.7 : Description-schématique de l'essai d'absorption d'eau par immersion.

3.4.5. Essai de résistance à la flexion

La résistance à la traction par flexion a été mesurée sur des éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions 40x40x160 mm pour chaque variable, conformément à la norme NF EN 196-1 [175]. Cet essai a été réalisé à l'aide d'une presse de flexion à trois points d'une capacité de 50 kN, illustrée à la **figure 3.7**. La procédure de l'essai est décrite comme suit :

- Placer le prisme dans le dispositif de flexion de manière à ce que la face latérale de moulage repose sur les rouleaux d'appui avec son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci.

- Appliquer une charge verticale à l'aide du rouleau de chargement sur la face latérale du prisme, en l'augmentant à un rythme de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$ jusqu'à la rupture.
- Conserver les demi-prismes en conditions humides jusqu'à la réalisation des essais de compression.
- La résistance à la flexion R_f (en N/mm^2) est calculée en utilisant la formule suivante :

$$R_f = \frac{1.5 Fl}{b^3} \quad (3.4)$$

Avec :

R_f : la résistance à la flexion, en N/mm^2 ou en MPa.

b : la côté de la section carrée du prisme en mm.

F : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en N.

l : la distance entre les appuis en mm.

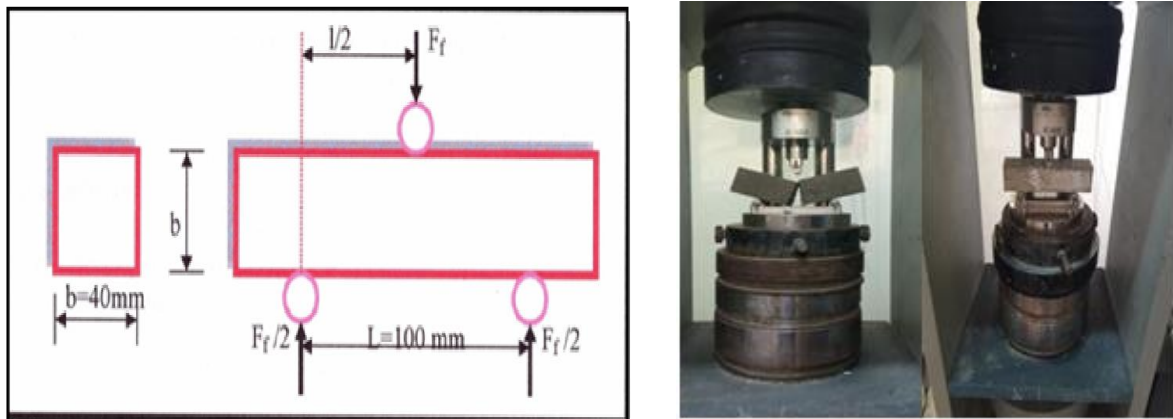


Figure 3.8 : Déroulement de l'essai de flexion en trois points.

3.4.6. Essai de résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée sur les demi-éprouvettes de mortier issues de l'essai de flexion en trois points, conformément à la norme NF EN 196-1 [175]. Cette évaluation a été réalisée à l'aide d'une presse de compression, illustrée à la **figure 3.8**. Le protocole de l'essai est décrit comme suit :

- Positionner chaque demi-prisme de manière latérale avec une précision de $\pm 0,5 \text{ mm}$ par rapport aux plateaux de la machine, et aligner longitudinalement de manière à ce qu'une partie du prisme dépasse les plateaux d'environ 10 mm.
- Élever la charge à une vitesse constante et contrôlée tout au long de l'application jusqu'à ce que la rupture survienne. Ajuster la vitesse de charge pour compenser toute diminution à l'approche de la rupture [93].

- La résistance à la compression R_c (en N/mm²) est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (3.5)$$

Avec :

R_c : Résistance à la compression en (MPa).

F_c : charge de rupture en (N).

b : cote de l'éprouvette égal à 40 mm.

Pour un Age d'écrasement de 3, 7, 28, 90 jours .

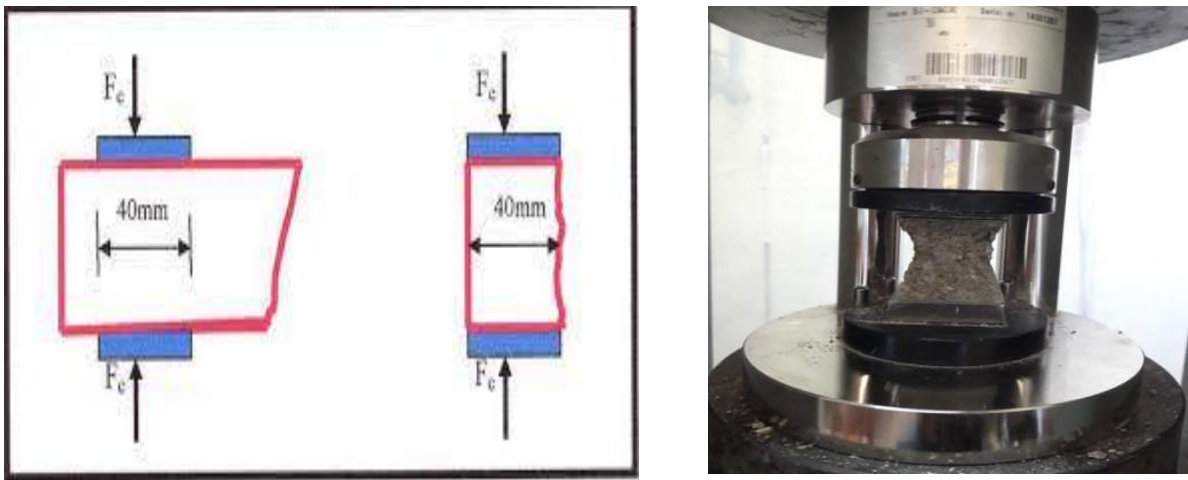


Figure 3.9 : Déroulement de l'essai de compression.

3.4.7. Retrait

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément de béton qui n'est soumis à aucune contrainte mécanique externe, dans un environnement thermodynamique constant. On distingue deux types de retrait : le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturée. La mesure de cette déformation est d'une importance capitale pour évaluer la durabilité et la performance à long terme des ouvrages en béton tels que les ponts et les structures hydrauliques, etc.. Pour mesurer le retrait de séchage, on a utilisé des éprouvettes prismatiques de dimensions 40x40x160 mm. Ces éprouvettes sont recouvertes aux deux extrémités par une couche étanche pour éviter la dessiccation et prévenir l'effet de bord lors des mesures. Après le coulage, les éprouvettes sont démoulées le premier jour et conservées dans des conditions ambiantes de laboratoire. Lors de la mesure du retrait, les éprouvettes sont placées dans un bâti de mesure de déformations de retrait équipé d'un comparateur de précision de 1 μm (**figure 3.9**). Cette méthode respecte les exigences de la norme NF P 15-433[179].

La déformation du retrait est évaluée en mesurant la variation de longueur des éprouvettes. La variation de longueur est calculée par différence entre la mesure initiale à l'instant (t_0) et la mesure à l'instant (t). Les mesures de retrait sont effectuées à partir de 24 heures après le coulage du mortier. La déformation est donc calculée à partir de la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.6)$$

Avec :

ΔL : variation de longueur exprimée en μm .

L : longueur entre les deux bords de l'éprouvette égale à 160 mm.

ε : déformation de retrait exprimée en $\mu\text{m/m}$.

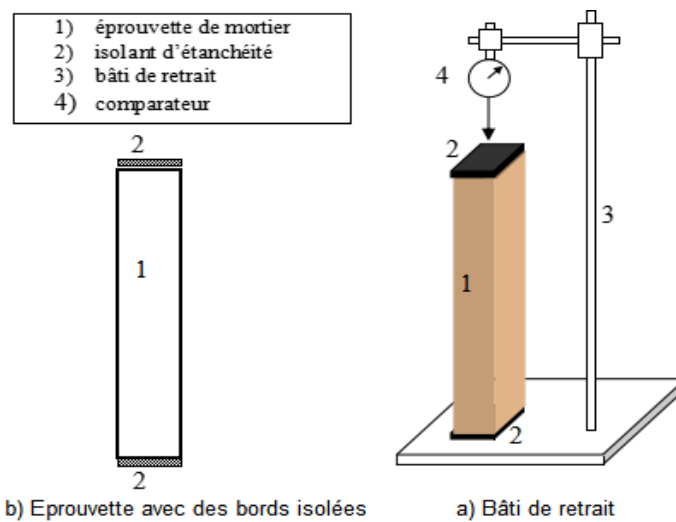


Figure 3.10 : Schéma du dispositif de mesure de retrait

3.5. Conclusion

Ce programme expérimental a pour objectif d'évaluer l'impact du remplacement partiel du ciment par des additions minérales en présence du sable SDC. La rhéologie, les résistances mécaniques et les propriétés physiques du mortier seront mesurées. Pour ce faire, une formulation de mortier intégrant différents taux d'additions a été adoptée, avec un rapport E/C de 0.5. Toutes les manipulations ont été effectuées conformément aux normes en vigueur. Les essais ont été effectués sur deux à trois éprouvettes pour vérifier la répétitivité des essais. Les résultats seront détaillés dans le chapitre quatre, où une analyse des données fournira une compréhension approfondie de l'effet de chaque niveau de substitution du ciment par des AM sur les propriétés du mortier.

Chapitre 4

Analyse et discussion des résultats

4.1. Introduction

Dans cette étude, les résultats des essais effectués à l'état frais et durci sur des mortiers seront présentés. Ces mortiers sont formulés avec du sable (SDC) et du sable (SN), en combinaison avec différentes additions minérales, telles que la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et le laitier de haut fourneau, ainsi qu'un superplastifiant à base de polycarboxylate. Ces additions ont été intégrées dans la composition des mortiers par substitution partielle du ciment, avec des taux de 10%, 20% et 30%.

Les essais ont été réalisés pour déterminer le comportement global des mortiers et évaluer simultanément l'influence de deux facteurs ; le type et le dosage des additions minérales (AM) ainsi que le type de sable (SDC, SN) sur les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement, viscosité plastique et besoin en eau), les propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion) et les propriétés physiques (retrait, perte de masse et absorption). De plus, une corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction a été établie pour les mortiers contenant du sable SDC en fonction de la teneur en AM.

4.2. Effet combiné sable SDC-addition minérale

4.2.1. Besoin en superplastifiant

La **figure 4.1** récapitule les résultats de l'étalement obtenus par la table à secousses selon la norme ASTM C230 [88,176] pour les différents mortiers en fonction du dosage en superplastifiant. Le but de l'essai est de trouver le dosage en superplastifiant qui donne un mortier de consistance plastique correspondant à un étalement de 80%. D'après les résultats obtenus, on constate que l'ouvrabilité s'améliore avec la présence du sable SDC et les additions minérales tout en augmentant le dosage en superplastifiant. Le mélange composé totalement du sable SDC présente la meilleure ouvrabilité et nécessite le minimum de superplastifiant pour tous les mortiers utilisés. Un mortier à base du sable SN a besoin de 2.2% de superplastifiant pour atteindre un étalement de 80%, tandis que le mortier avec 100% de sable SDC atteint cette valeur avec seulement de 0.44%.

Il a été montré que le sable SDC diffère du sable SN par sa forme des particules, sa composition minérale et sa teneur en fines [70,180,181]. Les particules fines contenues dans ce sable peuvent agir comme des roulements à billes pour réduire la friction entre les particules

plus grosses et améliorer la maniabilité du béton. Cepuritis et *al.* [182] ont observé que l'ajout de fines au mélange de béton peut améliorer sa maniabilité. D'autres travaux [183,184] ont noté une augmentation de 22% de l'ouvrabilité pour le béton avec du sable SDC par apport au SN.

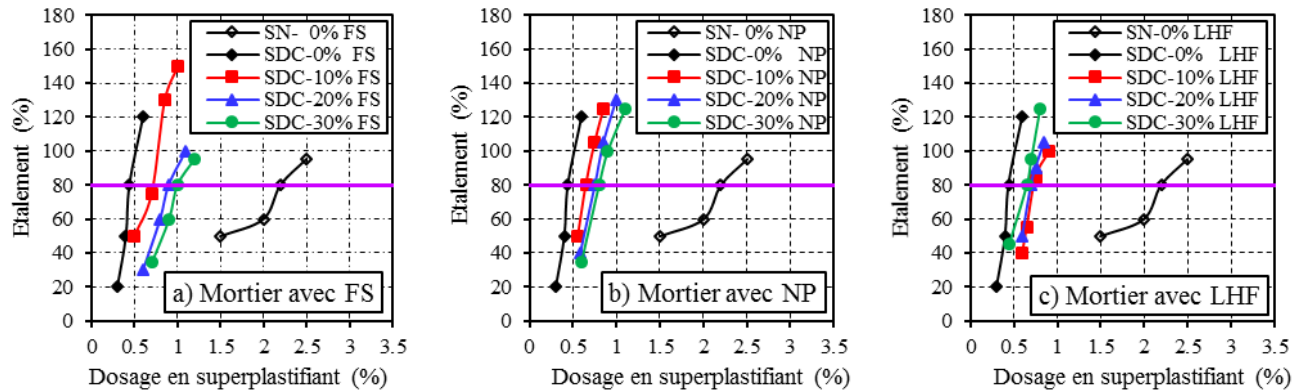


Figure 4.1 : Etallement des mortiers en fonction du dosage en superplastifiant pour les différents sables et les additions minérales utilisés.

A partir des résultats de la **figure 4.1**, on trace pour chaque addition minérale le dosage en superplastifiant correspondant. Le mortier à base du sable SDC nécessite un besoin en superplastifiant croissant lorsqu'on lui ajoute des additions minérales. En mélangeant la fumée de silice avec le sable SDC, le mortier perd sa maniabilité et le dosage en superplastifiant augmente de 60%, 200% et 227% pour une teneur en FS de 10%, 20 et 30% respectivement. La grande finesse de la FS, comparée à celle du ciment ordinaire, crée une forte demande en eau de lubrification là où la quantité d'eau de gâchage devient insuffisante, ce qui nécessite l'ajout de superplastifiant. Malgré cette demande, tous les mortiers fabriqués avec le sable SDC nécessitent moins de superplastifiant que celui avec le sable SN.

En remplaçant le ciment par la pouzzolane naturelle, l'ouvrabilité diminue d'une façon remarquable et d'autant plus pour 10% de substitution. Ce résultat peut être traduit par la présence d'alumine (Al_2O_3) dans la pouzzolane naturelle. Ce composant chimique a une influence sur l'adsorption du superplastifiant qui pénalise l'étalement [184]. L'utilisation de la pouzzolane naturelle dans le mortier à base du sable SDC présente une meilleure ouvrabilité et permet d'économiser l'utilisation excessive de superplastifiant. De même, elle permet pour une faible utilisation du NP, des dosages en superplastifiant tolérables qui gardent l'ouvrabilité acceptable.

En outre, en augmentant le taux de substitution du LHF, un léger dosage en superplastifiant doit être ajouté pour garder la même ouvrabilité au mortier à base du sable SDC. Ce dosage augmente de 0.44% à 0.75%, 0.7% et 0.65% respectivement en substituant le ciment ordinaire par 10%, 20% et 30% de LHF ce qui encourage la présence des taux élevés de ce matériau. On peut conclure que l'addition du laitier de haut fourneau broyé avec une large distribution granulométrique augmente la quantité de l'eau libre ce qui offre un bon comportement rhéologique des ciments composés [116]. Cela s'accorde avec les petites particules sphériques de laitier (taille moyenne 8.07 μm) observées par Zang et Han [114] entre de grosses particules de ciment (taille moyenne 18.07 μm). Shafigh et *al.*[100] ont conclu que la gamme de 20 à 30% représente le niveau optimal de substitution du laitier pour atteindre une maniabilité maximale. Dans cette étude, les résultats de la **figure 4.2** montrent qu'un taux de 10% conduit à une ouvrabilité maximale avec un dosage minimum de superplastifiant. La même observation a été faite par Boukendakdji et *al.* [185], où la substitution du ciment par le LHF est avérée être très bénéfique pour le béton autoplaçant. Une amélioration de la maniabilité a été observée en utilisant 20% de laitier de hauts fourneaux.

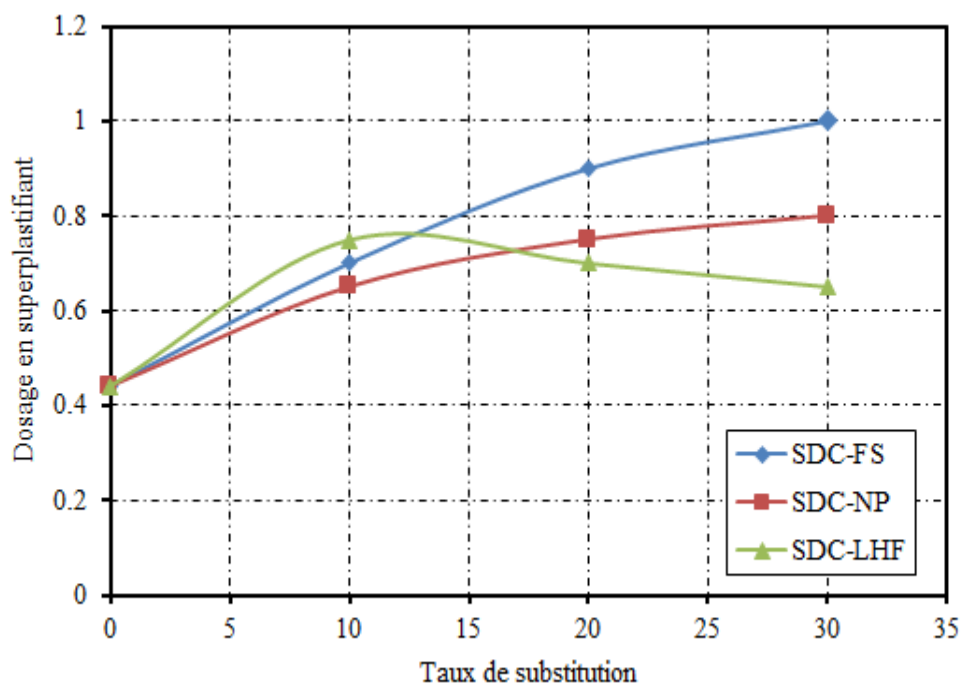


Figure 4.2 Variation des dosages en superplastifiant des différents mortiers pour atteindre une consistance plastique.

4.2.2. Paramètres rhéologiques

Pour les mortiers plastiques étudiés, les dosages appropriés en superplastifiant ont été choisis en fonction du type de sable et le taux de substitution de chaque addition utilisée. Les mortiers frais ont été introduits dans le rhéomètre et les paramètres rhéologiques de chaque mortier ont été mesurés en fonction du couple enregistré et du taux de cisaillement. Les paramètres rhéologiques peuvent être déduits par un simple ajustement des résultats. Le seuil de cisaillement est la contrainte minimale à laquelle la pâte commence à s'écouler, sa valeur dépend de la taille et de la rugosité des grains solides ainsi que des interactions entre ces particules. D'autre part, la viscosité plastique caractérise l'augmentation de la contrainte lorsque la vitesse de cisaillement augmente.

À partir des résultats illustrés dans les **Figures.4.3** et **4.4**, on conclut que les valeurs du seuil de cisaillement et la viscosité plastique varient en fonction de la composition de chaque mortier. En remplaçant le sable SN par le sable SDC, la viscosité plastique passe de 4 Pa.s à 4.6 Pa.s et le seuil de cisaillement de 12.4 Pa à 19 Pa respectivement. Ceci est dû à la granulométrie du sable SDC et à sa texture rugueuse qui résiste au cisaillement des couches dans le rhéomètre. Selon les travaux de Saffidine et *al.* [64], l'utilisation de sable SDC entraîne une augmentation de 50% dans les propriétés rhéologiques du mortier par rapport à l'utilisation du sable SN.

Les **figures 4.3** et **4.4** montrent que les paramètres rhéologiques du mortier à base de sable SDC diminuent lorsque le ciment est remplacé par 10%, 20% et 30% de FS. Cette diminution atteint 8%, 23% et 26% pour la viscosité plastique et 10%, 14% et 31% pour le seuil de cisaillement pour les taux de substitution respectivement utilisés. Avec 10% de FS, le mortier a une viscosité légèrement élevée par rapport à celle d'un mortier à base de sable SN et devient plus faible pour des teneurs plus élevées. Des tendances similaires sont également observées pour le seuil de cisaillement. Cette constatation est soutenue par les résultats de Zang et Han [114] dans lesquels la viscosité et le seuil de cisaillement peuvent être diminuées pour 10% de FS où la viscosité plastique a diminué de 4.45 Pa.s à 3.54 Pa.s et le seuil de cisaillement de 8.3 Pa à 2.2 Pa. Dans le même contexte, lorsque 12% de FS remplace le ciment ordinaire dans un béton autoplaçant, la viscosité plastique diminué de 2.3 fois [165]. Pour les mélanges ternaires contenant du FS et de laitier de hauts fourneaux, des viscosités inférieures à celles du mélange témoin ont été enregistrées [186]. Certaines recherches [106,187] ont montré que la viscosité plastique diminuait légèrement avec l'ajout d'une petite quantité de FS.

Lorsque le ciment est substitué par la pouzzolane naturelle, les paramètres rhéologiques du mortier à base de sable SDC contenant 10% de NP conservent des valeurs sensiblement proches de celles d'un mortier témoin comme le présentent les **figures 4.3** et **4.4**. Dès que ce taux est dépassé, une chute de ces paramètres est enregistrée. La viscosité plastique mesurée est de 4.64, 4.7, 4.19 et 3.74 Pa.s respectivement pour un mortier témoin et celui contenant 10, 20 et 30% de NP. De même, le seuil de cisaillement prend les valeurs de 18.9, 19.5, 14.2 et 12 Pa. Lorsque le mortier est formulé avec du sable SN, les paramètres rhéologiques sont plus élevés en présence de faibles taux d'additions minérales et deviennent plus faibles pour des taux élevés de 30%. Dans une étude sur l'effet des NP sur la rhéologie des pâtes cimentaires, Mansour et Ghernouti [188] ont conclu que le taux de remplacement de 10% semble être le taux optimal pour un meilleur écoulement de la pâte. Nous pouvons conclure que l'élévation des paramètres rhéologiques en présence de sable SDC peut être réduite en utilisant certains matériaux cimentaires.

La présence de LHF dans la composition du mortier a un effet significatif sur l'amélioration des propriétés rhéologiques et notamment le seuil de cisaillement. Le mortier à base de sable SDC enregistre une viscosité plastique comprise entre 4.6 et 4.7 Pa.s pour des teneurs en LHF de 0%, 10% et 20%, par contre une teneur élevée de 30% provoque une chute à 4.4 Pa.s. Parallèlement, le seuil de cisaillement prend des valeurs de 19, 17, 15 et 13.6 Pa pour des teneurs en LHF de 0%, 10%, 20% et 30% respectivement. Ces résultats concordent avec ceux de Zhang et *al.* [114] qui ont observé une diminution de la viscosité et du seuil de cisaillement lors de l'ajout de 35% de LHF ultrafin. De même, Boukendakdji et *al.* [185] ont remarqué que plus la teneur en laitier est élevée, plus le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des bétons sont faibles. Park et *al.* [98] ont montré que les paramètres rhéologiques diminuent jusqu'à une teneur en laitier de 30%. D'autres résultats montrent que le LHF et les fillers calcaires améliorent la viscosité du fait de l'importance de l'effet filler des deux ajouts [98]. Le LHF contribue efficacement à améliorer la rhéologie des pâtes cimentaires, avec sa grande finesse, le LHF comble les vides entre les grosses particules et libère l'eau pour la lubrification. De plus, sa faible activité hydraulique au jeune âge et sa faible absorption de superplastifiant conduisent à une augmentation de la fluidité du mélange.

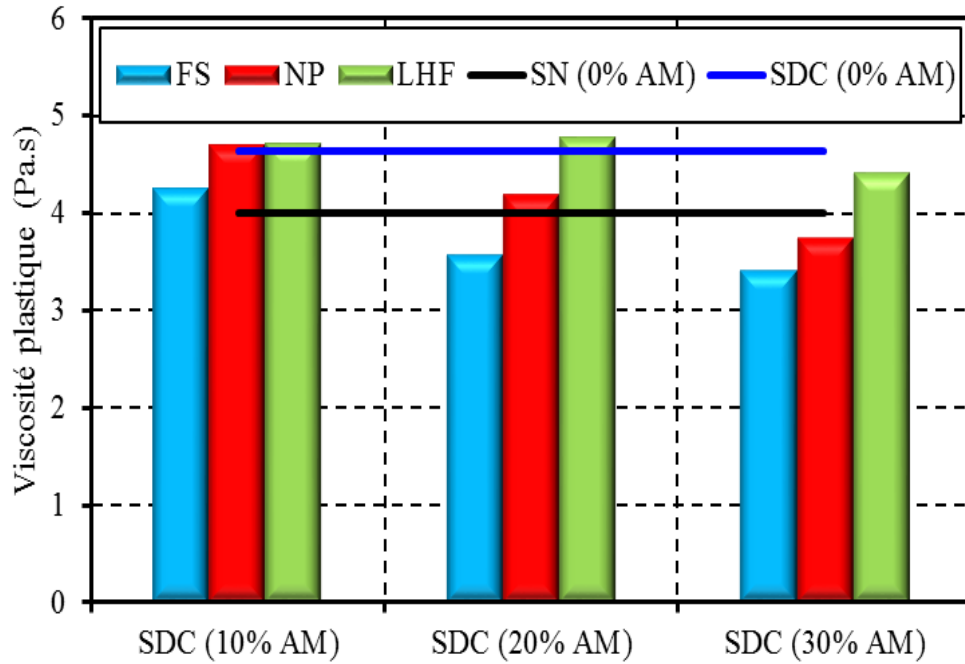


Figure 4.3: Viscosité plastique des mortiers basée sur différents sables et divers AM.

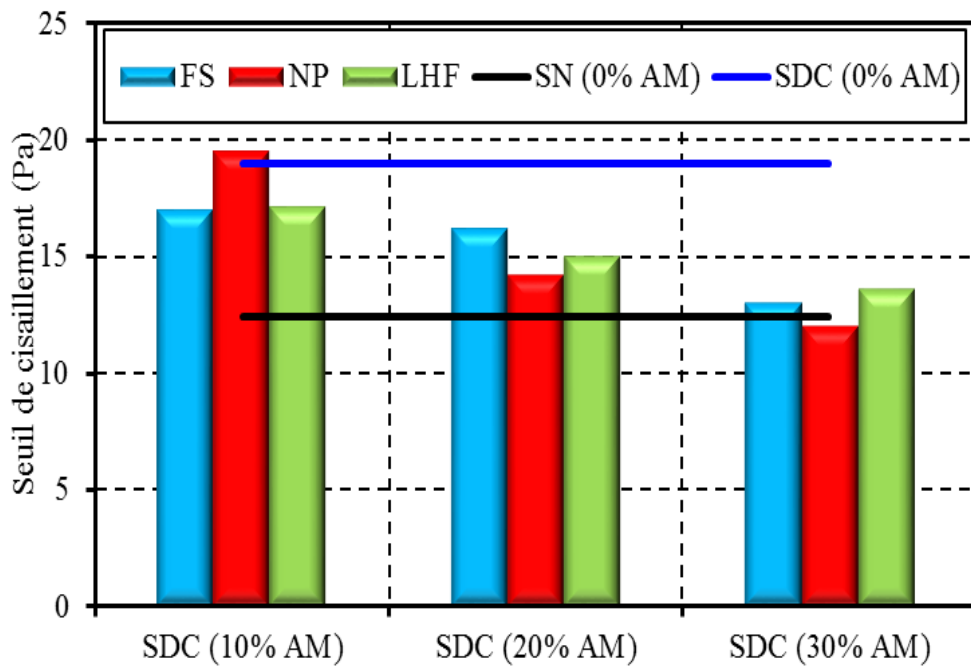


Figure 4.4 : Seuil de cisaillement des mortiers basée sur différents sables et divers AM.

4.2.3. Absorption d'eau

Lorsque les mélanges de mortier sont durcis sous l'eau, ils subissent un gain de poids causé par l'absorption d'eau à travers les pores de la pâte de ciment. Ce phénomène reflète l'évolution de la microstructure de la pâte et l'effet apporté par la présence du sable SDC ainsi que par les additions minérales utilisés. Les **figures 4.5, 4.6 et 4.7** présente les résultats d'absorption d'eau pendant 28 jours de durcissement. Au premier jour, une forte absorption allant de 0.5% à 1% est observée pour tous les mortiers, puis cette absorption se poursuit avec une vitesse décroissante au fur et à mesure de l'hydratation du ciment. A 28 jours, le mortier à base de ciment ordinaire atteint une absorption de 2.55% avec le sable SN et 2% avec le sable SDC, cette réduction est justifiée par la teneur élevée des fines calcaires dans le SDC qui contribue à densifier la matrice et réduire la porosité. Arroudj et *al.* [131] ont observé que la quantité de portlandite augmentait au jeune âge lorsque le sable de dune broyé était ajouté au ciment, ce qui augmentait l'effet de nucléation. Le taux d'absorption d'eau maximal recommandé pour les bétons de poids moyen selon la norme ASTM-C90 [189] est limité à 240 kg/m³, ce qui justifie la pertinence de tous les mortiers testés à base de sable SDC et d'additions minérales. Ces résultats d'absorption d'eau sont cohérents avec ceux trouvés par Meyyapan et *al.* [190] dans laquelle le volume des pores du béton contenant du sable SDC et 0.75 % de fibres de basalte a été réduit jusqu'à 31%. De plus, les valeurs minimales d'absorption d'eau sont observées lors du remplacement de 60% du sable SN par du sable SDC [78].

Lorsque le ciment est remplacé par 10, 20 et 30% FS dans le mortier à base de sable SDC, la pâte de ciment devient encore plus dense et sa capacité d'absorption d'eau diminue. D'après les résultats de la **figure 4.5** les mortiers atteignent une réduction d'absorption d'eau de 6%, 27% et 20% à 28 jours pour un taux de substitution de 10%, 20% et 30% respectivement. En outre, 20% de FS est le taux optimal où son amélioration de l'activité physique comble le maximum de vides et son activité pouzzolanique crée de nombreux produits d'hydratation. Il a été observé, par des images au microscope électronique à balayage SEM [78], que la microstructure du béton avec 60% de sable SDC et 20% de FS était extrêmement fine et une formation significative de gel CSH était observée. Ainsi, la matrice était extrêmement dense avec des produits d'hydratation fortement compactés, sans fissures ni vides, ce qui justifie la réduction de l'absorption d'eau.

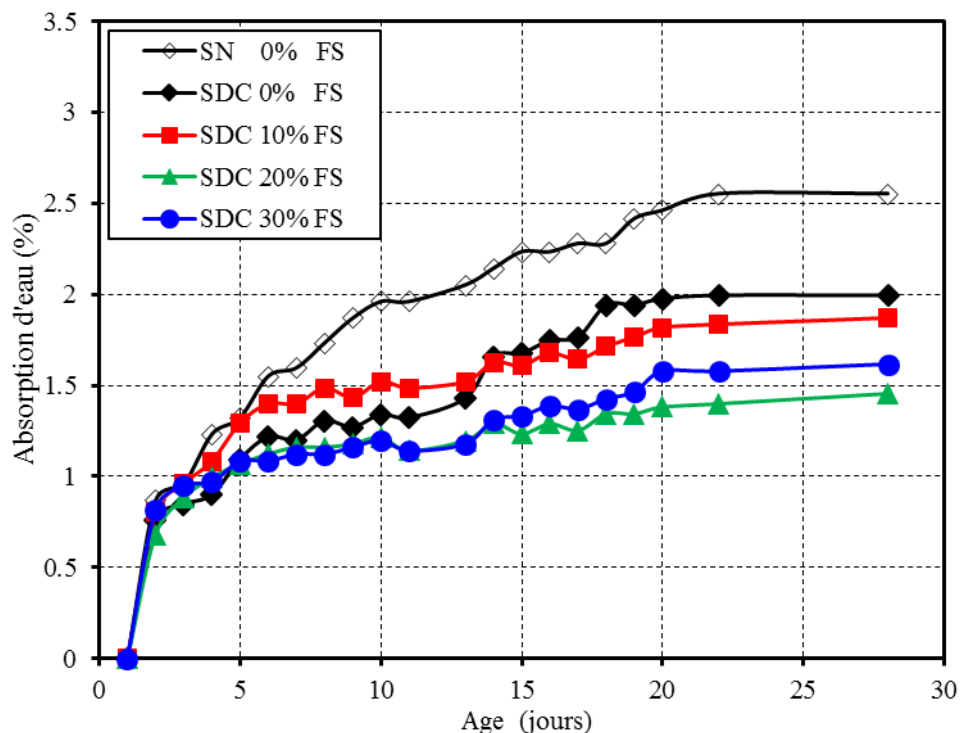


Figure 4.5 : Absorption d'eau au cours du temps en fonction des différents sables et FS.

Lorsque le ciment est remplacé par 10 %, 20 % et 30 % de NP, l'absorption d'eau du mortier est réduite respectivement de 14%,18% et 33%. D'après les résultats de la **figure 4.6**, on peut constater que l'utilisation d'un taux de substitution de 30% permet d'obtenir de meilleures propriétés. Cette substance est moins fine et moins active que la fumée de silice, mais elle représente un gain économique appréciable en remplaçant jusqu'à 30% de ciment. Basha et *al.* [191] ont conclu qu'un béton contenant 15% de zéolite offrait une grande protection contre le gel dégel grâce au développement de gels CSH formés par son activité pouzzolanique, ce qui permet de réduire la porosité du béton.

L'utilisation de LHF pour fabriquer un mortier joue un rôle fondamental dans l'amélioration de la porosité à 28 jours. À cet âge, le mortier absorbe 1.83%,1.64% et 1.53% lorsque le ciment est remplacé respectivement par 10%, 20% et 30% de LHF comme illustré dans la **figure 4.7**. Le LHF contribue par sa finesse et son hydraulicité à rendre la pâte de ciment moins absorbante aux âges avancés, notamment pour une teneur élevée en LHF. Cela concorde avec certains résultats [163,191] où le béton produit en remplaçant 60% de ciment ordinaire par du LHF montre une baisse d'absorption de 21% avec le sable SN et de 90% avec 60% du sable SDC. En comparant les valeurs d'absorption d'eau et de vides d'un béton contenant 15% de LHF avec le béton témoin, une baisse de 10% et 22% respectivement est enregistrée [192].

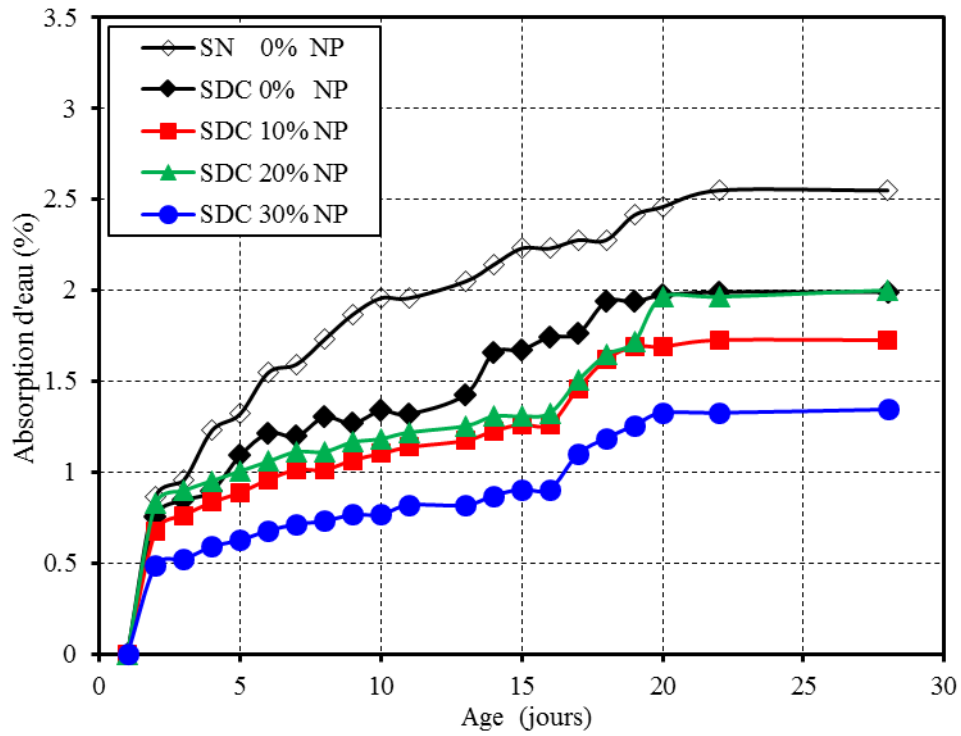


Figure 4.6 : Absorption d'eau au cours du temps en fonction des différents sables et NP.

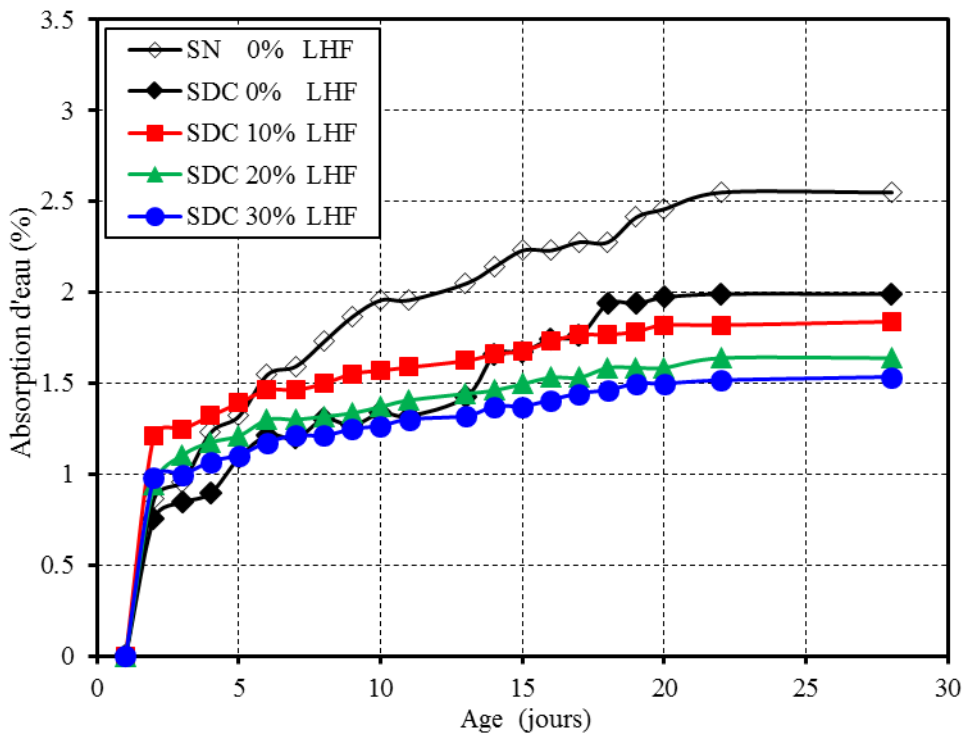


Figure 4.7 : Absorption d'eau au cours du temps en fonction des différents sables et LHF.

4.2.4. Perte de masse

Les résultats de la perte de masse pour les différents mélanges des mortiers jusqu'à l'âge de 28 jours sont suivis et représentés sur les **figures 4.8, 4.9 et 4.10**. Ces résultats montrent que la perte de masse augmente au cours du temps, cela est dû à la perte d'eau par dessiccation de la pâte de ciment pendant leur conservation. D'après les résultats trouvés, cette perte commence dès le premier jour où une perte comprise entre 1.7% et 2.8% est enregistrée. Ce phénomène s'atténue dans le temps en fonction de l'avancement de l'hydratation et de la qualité des produits formés. A 28 jours, le mortier de ciment ordinaire atteint une perte de masse de 6.2% en présence du sable SN et seulement de 5.2% lorsqu'il est réalisé avec le sable SDC.

La substitution du ciment par la FS dans un mortier à base du sable SDC rend la matrice plus résistante et les pertes de masse enregistrées sont de 5.2% à 4.9, 5.5, 6.4% pour un taux de substitution de 0, 10, 20 et 30% respectivement comme illustré dans la **figure 4.8**. On peut conclure que 10% de FS est un taux optimal pour rendre cette substance efficace avec suffisamment de chaux pour son activation. La réaction pouzzolanique du FS apporte plus d'hydrates à la matrice avec une porosité plus fine qui prévient le séchage. Au-delà de ce taux, le FS ne joue plus que le rôle d'une addition inerte plus fine. Ces résultats concordent avec ceux de Gadri et guettala [168] qui ont observé une augmentation de perte de masse lors de l'ajout de 5 et 8% de FS.

Dans les mortiers à base du sable SDC, le NP affine la porosité de la pâte et réduit ainsi son séchage. La perte de masse enregistrée est de 5.2% à 3.9, 4.2 et 4.6% lorsque le ciment est remplacé par 0, 10, 20 et 30% de cette substance respectivement (**figure 4.9**). Le rôle pouzzolanique joué par cette substance semble avoir une grande influence sur la qualité de la microstructure de la pâte. Un taux d'incorporation allant de 10 à 20% semble être le plus optimal et le mortier conserve son humidité maximale jusqu'à 28 jours.

Pour les mortiers à base du sable SDC et LHF, les mortiers produits ne subissent pas de séchage important comme c'est le cas avec le mortier témoin. Après 28 jours de cure, la perte de masse est de 5.2, 4.5, 4.9 et 5.3% lorsque le ciment est remplacé par 0, 10, 20 et 30% de LHF respectivement comme le montre la **figure 4.10**. L'hydraulicité et la finesse de ce matériau sont responsables de cette amélioration tout en utilisant moins de 30% de LHF.

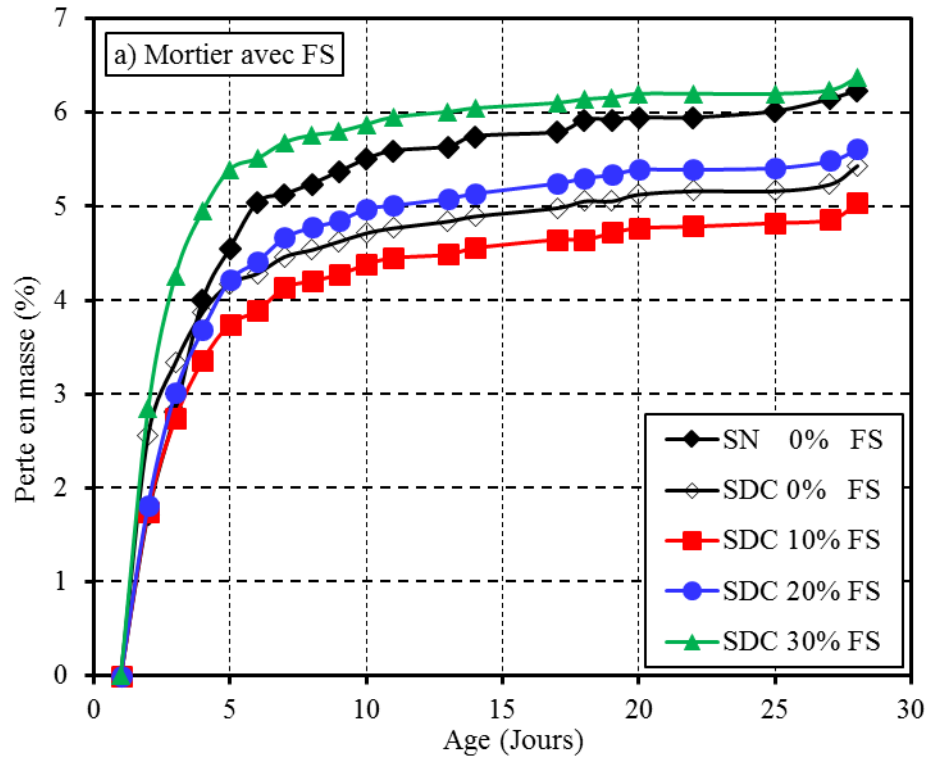


Figure 4.8 : Perte de masse au cours du temps en fonction des différents sables et FS.

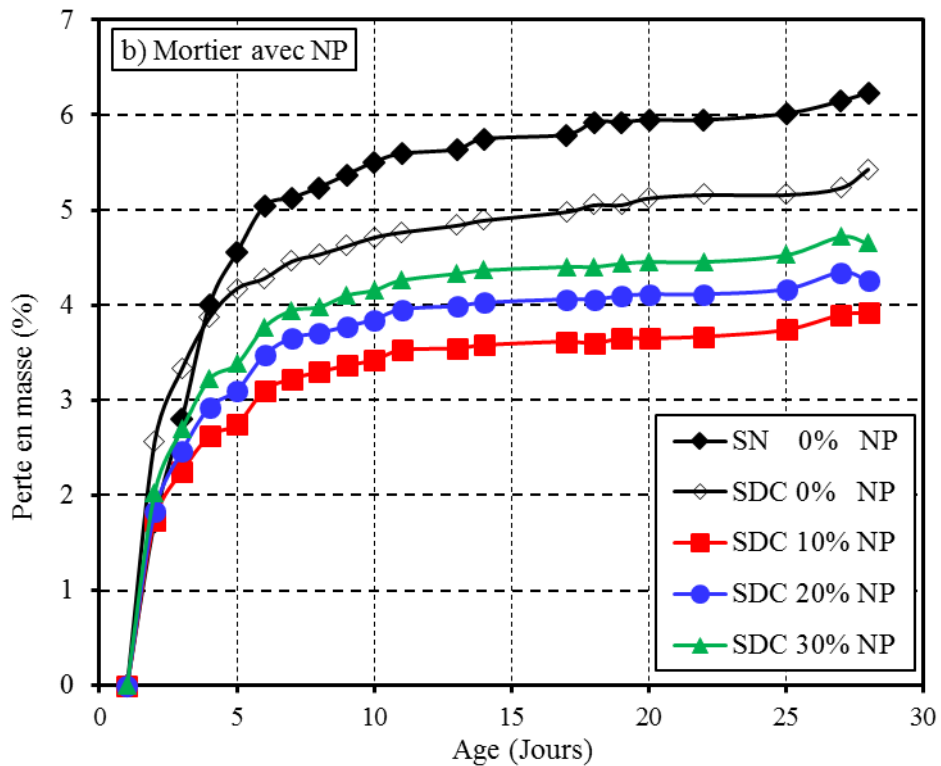


Figure 4.9 : Perte de masse au cours du temps en fonction des différents sables et NP.

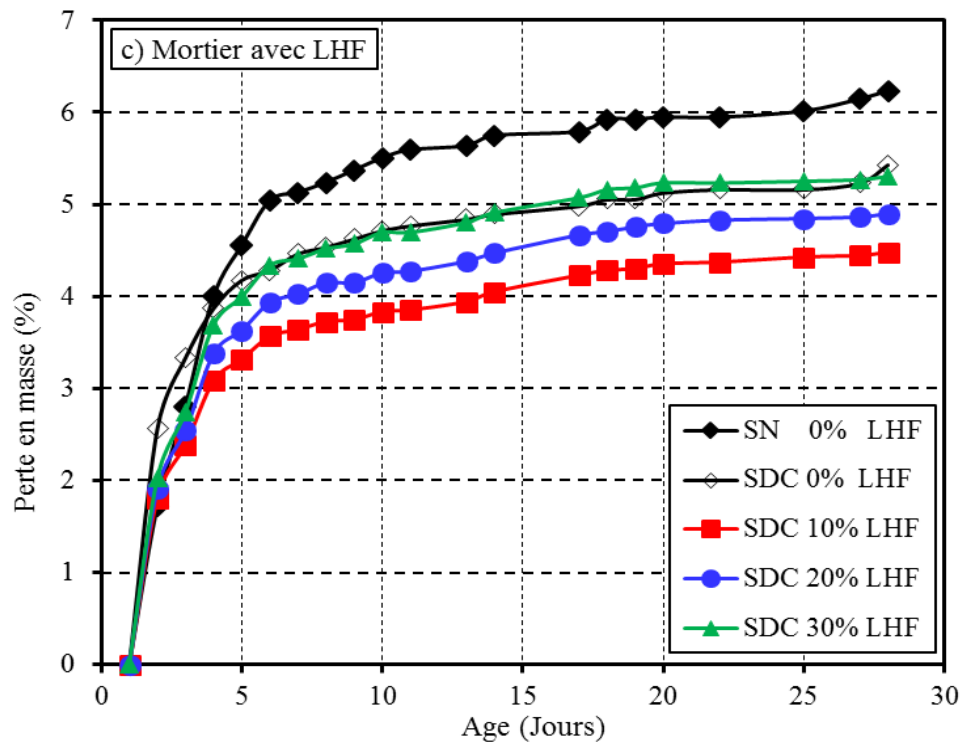


Figure 4.10 : Perte de masse au cours du temps en fonction des différents sables et LHF.

4.2.5. Résistance à la traction par flexion

Les figures 4.11, 4.12, et 4.13 présentent les résultats de la résistance à la flexion pour tous les mortiers étudiés. Le sable SDC confère au mortier une résistance à la flexion supérieure à celle du sable SN. Dès le troisième jour, le mortier à base du sable SDC atteint une résistance à la flexion deux fois supérieure à celle du mortier à base du sable SN. Au fil du temps, cette différence diminue mais reste supérieure à 2 MPa. Ce résultat est similaire à celui trouvé pour la résistance à la compression, où le sable SDC est très bénéfique pour améliorer la compacité de la pâte de ciment et développer la résistance mécanique. À 90 jours, les valeurs optimales des additions minérales (AM) utilisées génèrent une résistance à la flexion supérieure de 2 MPa en présence de 10% de FS, 1 MPa pour 10% de NP et une résistance similaire pour 10% et 20% de LHF.

Dans une étude similaire, Lokeswaran et al. [77] ont rapporté que la plus grande proportion de fines particules de sable SDC avait influencé de manière significative le développement de la résistance à la flexion après 7 et 28 jours de durcissement. Une résistance comparable entre le béton normal et celui produit avec 50 % de sable SDC, en remplacement partiel du sable SN, a également été signalée. De même, une amélioration significative de la résistance à la flexion de 14% a été enregistrée. De plus, il a été constaté que le remplacement

de 60% de sable SN par du sable SDC augmentait la résistance à la flexion de 4.5 à 7.62 MPa. Cette élévation peut atteindre 7.89 MPa et 7.67MPa si 20% de ciment est remplacé par du FS ou du LHF [77]. Dans une autre étude, les résistances augmentent progressivement de 5% à 15% pour un mélange avec de la zéolite comparé au mélange témoin [191]. Cela peut être attribué à la capacité de remplissage des additions minérales dans les vides du béton. Ce qui révèle l'efficacité de ces matériaux dans la résistance à la flexion pour un taux de substitution de 15%.

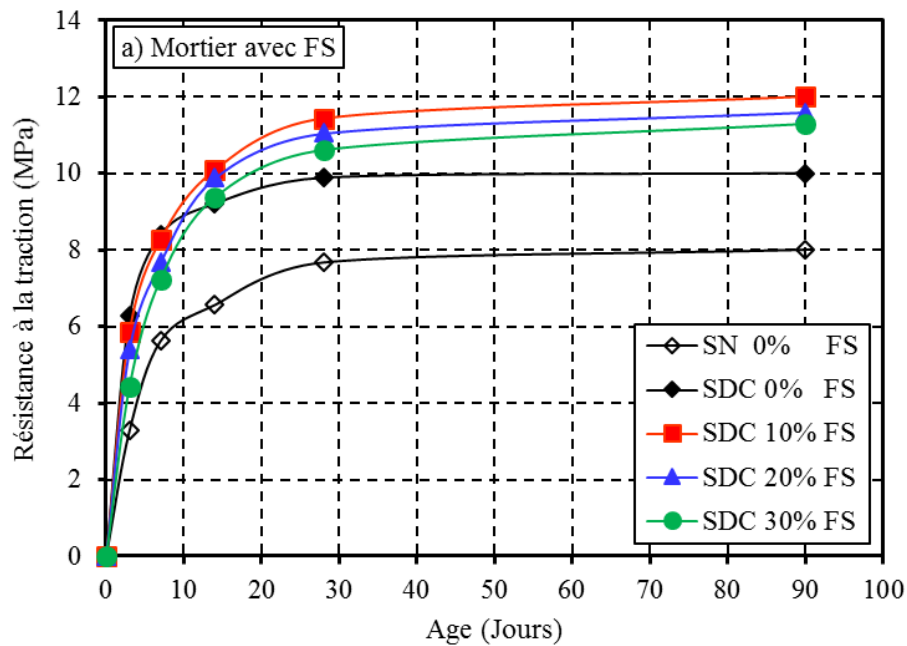


Figure 4.11 : Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction des différents sables et FS.

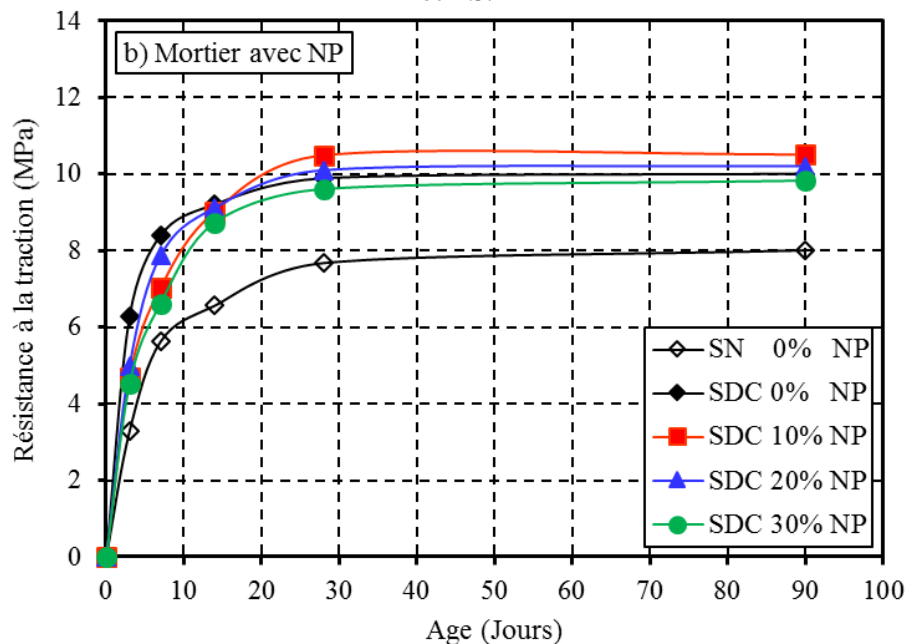


Figure 4.12 : Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction des différents sables et NP.

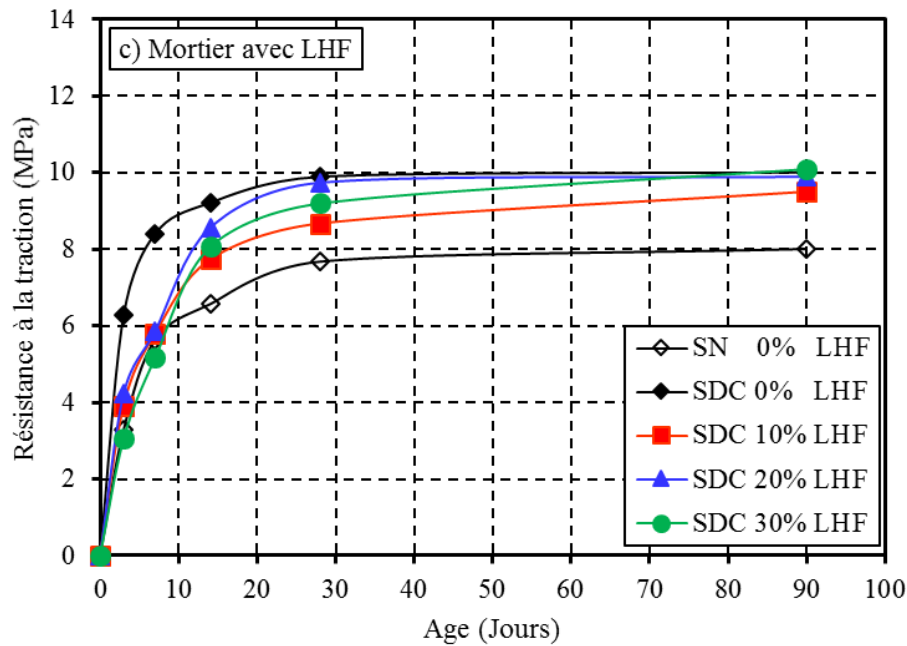


Figure 4.13 : Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction des différents sables et LHF.

4.2.6. Résistance à la compression

Les figures 4.14, 4.15, et 4.16 présente les résultats de la résistance à la compression des mortiers à base du sable SN et du sable SDC avec la substitution du ciment par trois additions minérales (AM). Les premiers résultats montrent l'avantage considérable du sable SDC, qui rend la résistance du mortier 2 fois plus élevée que celle du sable SN à 3 jours et 1.5 fois plus élevée à 90 jours. Ce sable composé de fines particules de roche calcaire, joue un rôle fondamental dans l'hydratation du ciment. Ses fines créent des sites de nucléation supplémentaires favorisant l'hydratation et comblant les interstices entre les grains de ciment, ce qui justifie ce gain considérable en résistance mécanique. Malhotra et *al* [193], ont rapporté que la résistance à la compression du béton mélangé avec du sable SDC contenant 7% de poudre de pierre était supérieure à celle du sable SN. D'autres travaux [44,67,87,194], indiquent que la résistance mécanique augmente avec l'augmentation du taux de remplacement du sable SN par le sable SDC et atteint sa valeur maximale pour 100% de sable SDC.

En remplaçant le ciment ordinaire par 10%, 20% et 30% de FS, les résistances à la compression à 90 jours du mortier à base de sable SDC s'améliorent respectivement de 42%, 34% et 27%. Ce gain de résistance est lié à l'effet physico-chimique fourni par ce matériau. Ainsi, la matrice cimentaire devient plus dense et les produits d'hydratation plus abondants.

Avec un NP moins actif que le FS, l'amélioration de la résistance à la compression à 90 jours est 36%, 25% et 16 % plus élevée pour les mêmes taux utilisés. Lorsque le ciment est remplacé par du LHF, les gains de résistance à la compression sont de 14%, 21% et 27%. À partir de ces résultats, il devient clair que 10% de FS ou de NP représentent les valeurs optimales de ces produits, tandis qu'en présence de LHF, cela peut aller jusqu'à 30%.

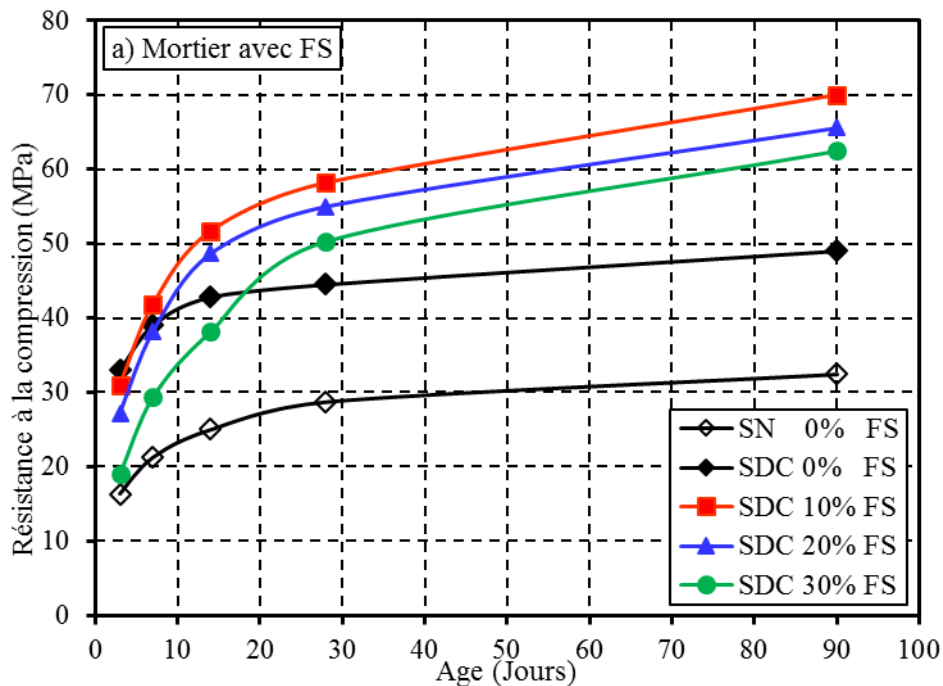


Figure 4.14 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des différents sables et FS.

L'amélioration de la résistance à la compression dans le mortier à base des additions minérales (AM) est principalement attribuée à l'activité de leurs réactions hydrauliques et pouzzolaniques, qui produisent un gel CSH supplémentaire qui est responsable du comblement des micro-vides, entraînant ainsi un mortier plus dense avec une microstructure améliorée [163, 103]. Ces résultats obtenus confirment les recherches précédentes présentées par Khoudjia *et al.* [85], où une amélioration de 6% et 9.9% est constatée lorsque le ciment est remplacé par 10% de NP ou 15% de LHF. De même, une résistance à la compression plus élevée de 48 MPa a été obtenue en remplaçant 20% de ciment par du FS dans un béton contenant 60% du sable SDC [163]. Le même résultat a été observé dans le béton contenant 10% de zéolite et 60% du sable SDC [195]. Le sable SDC modifie la microstructure interne et la morphologie du béton, ce qui entraîne un mortier plus dense avec un minimum de vides.

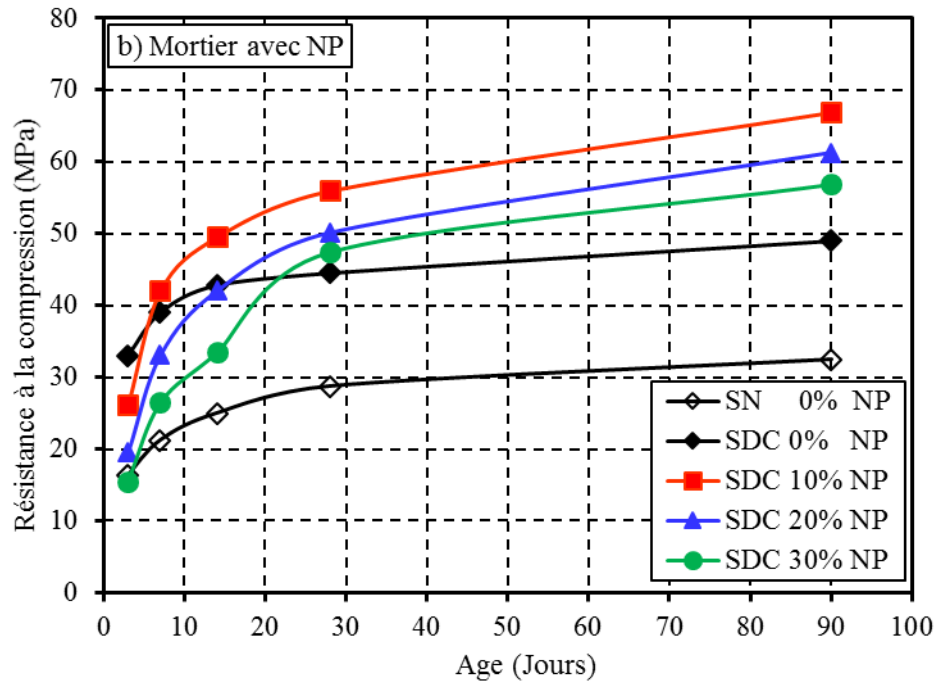


Figure 4.15 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des différents sables et NP.

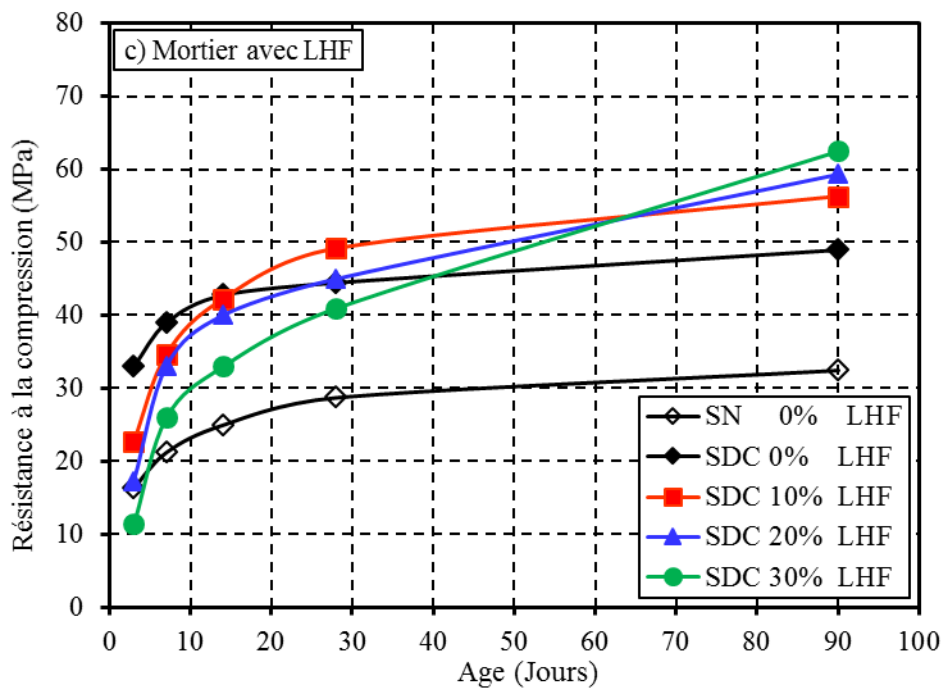


Figure 4.16 : Résistance à la compression des mortiers en fonction des différents sables et LHF.

4.2.7. Retrait

Le retrait de la pâte de ciment est la conséquence de la déformation de la microstructure causée par le séchage. L'évaporation de l'eau présente dans les interstices de la pâte crée un déséquilibre de la pression capillaire, entraînant une contraction des produits d'hydratation et une déformation microstructurale. Les résultats de cette déformation, du premier jour jusqu'à 28 jours, sont illustrés dans les **figures 4.17, 4.18 et 4.19**. Il est facile de constater que le mortier contenant du sable SDC est moins déformable et que son retrait progresse lentement, contrairement à celui contenant du sable SN. Les particules de sable SDC, avec leur structure angulaire, gênent la déformation due au retrait en formant un système de freinage contre cette déformation. De plus, sa contribution à la promotion de l'hydratation du ciment et sa teneur en fines rendent la microstructure de la pâte moins poreuse et plus résistante au séchage. Le travail de Kou et Poon [48] a confirmé ce résultat, où les bétons à base de sable SDC ont montré un retrait inférieur à ceux du béton témoin. Cela est probablement dû au fait que le sable SDC utilisé avait une plus grande distribution de taille de particules et donc une surface spécifique plus forte que le sable SN. Il a été suggéré que la surface spécifique des granulats est l'une des propriétés qui affectent le retrait du béton [196], et en général, le sable avec une faible surface spécifique entraîne un retrait plus faible du béton produit, comme c'est le cas du sable SDC. D'autre part, certaines études [55] ont révélé un plus grand retrait en présence d'un sable SDC riche en fines, directement associée à l'eau présente dans les petits pores de 3 à 30 nm et à la formation de carboaluminates. D'un autre côté, Khatib et *al.* [91] ont montré que l'utilisation d'un sable SDC contenant 15% de fines entraîne une augmentation du retrait de 0 à 22%. De plus, Bounavetti et *al.*[55], ont révélé une augmentation des contraintes de retrait avec l'augmentation de la teneur en sable SDC fin de 0 à 20%, dont 83% de la contrainte de retrait c'est produit fortement dans les cinq premières heures après le coulage.

En remplaçant le ciment ordinaire par des additions minérales (AM), le retrait diminue et le mortier est moins sensible à la dessiccation. Selon les résultats trouvés, le retrait atteint les valeurs les plus basses pour 10% de FS, 10% de NP et 30% de LHF. Ces taux de substitution respectifs représentent les valeurs optimales de chaque addition et leur contribution efficace à l'hydratation du ciment et à la qualité de la microstructure. Ces additions minérales agissent par leur finesse et leurs propriétés chimiques, ce qui ralentit le séchage de l'eau à travers des interstices très fins. Diverses études montrent que l'incorporation des additions minérales (AM) dans le béton influence considérablement le retrait dans le mortier et le béton [197,198]. Cet effet dépend entièrement des compositions chimiques et des propriétés physiques du

ciment et des additions minérales utilisées [197,43]. Par exemple, l'utilisation de cendres volantes et du laitier granulé de haut fourneau (LHF) a permis de réduire le retrait du béton à 180 jours de 14% et 28% respectivement [198]. De plus, selon Huo et *al.* [199], le retrait dans le béton contenant des cendres volantes et de la fumée de silice (FS) est inférieur à celui du ciment ordinaire et tend à se développer rapidement à un âge précoce.

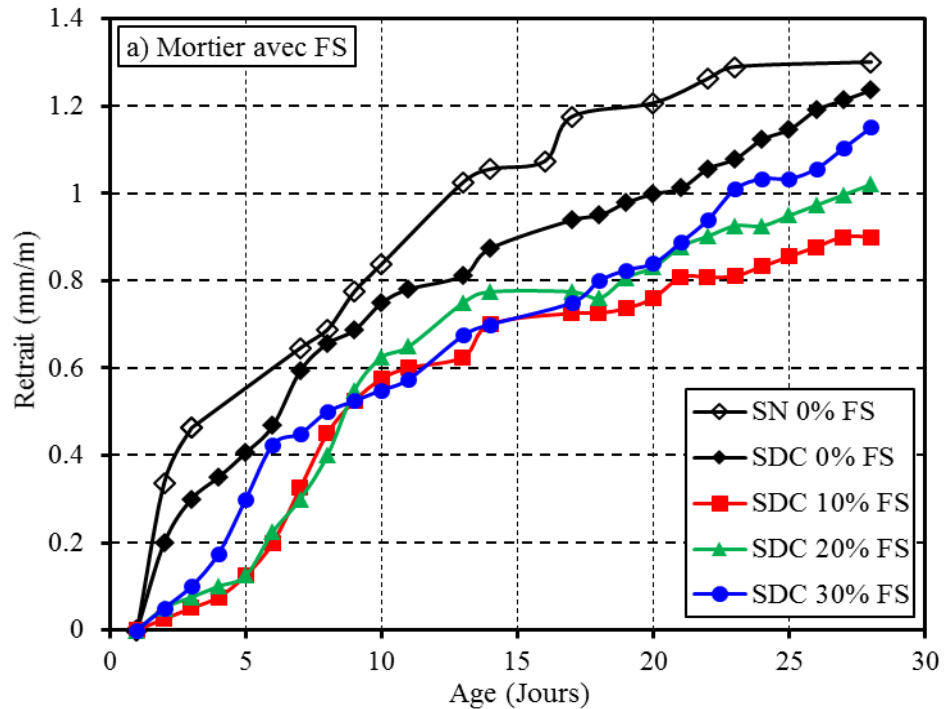


Figure 4.17 : Retrait des mortiers en fonction des différents sables et FS.

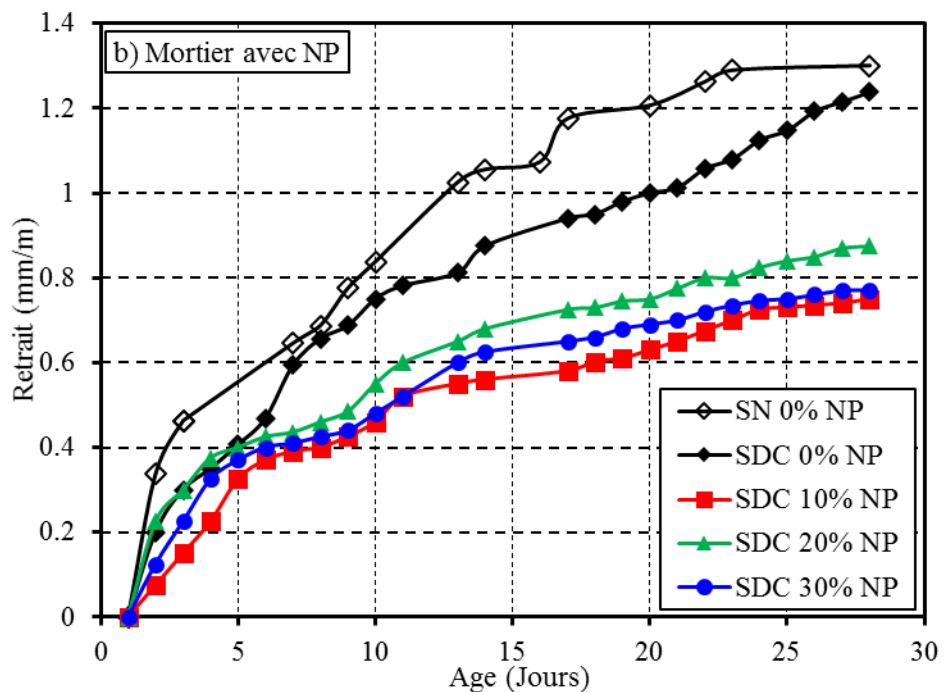


Figure 4.18 : Retrait des mortiers en fonction des différents sables et NP.

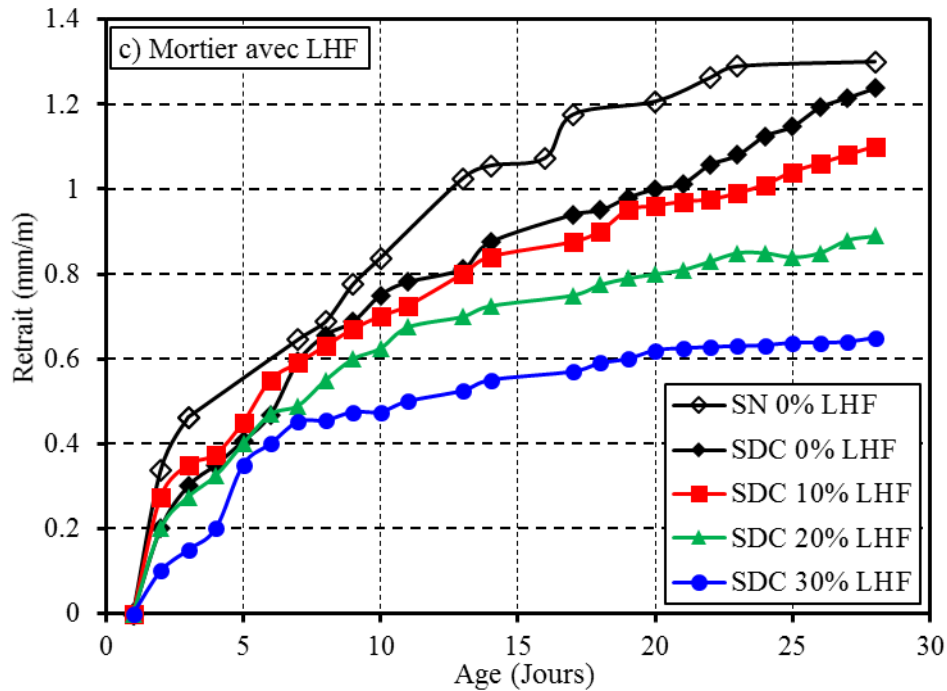


Figure 4.19 : Retrait des mortiers en fonction des différents sables et LHF.

4.2.8. Corrélation de la résistance à la traction

La corrélation de la résistance à la flexion est un aspect important dans l'analyse des propriétés mécaniques du béton. Pour mieux comprendre la variation de la résistance à la flexion, il est judicieux d'exprimer cette variation en fonction de la résistance à la compression. Pour ce faire, nous pouvons convertir les résultats obtenus pour la résistance à la flexion en résistance à la traction en les multipliant par un coefficient de 0.6, qui tient compte de la déformation du béton lors de la phase de rupture [14]. Le modèle de l'Eurocode (EN 1992-1-1, 2004) [200], présenté dans l'équation 4.1, a été utilisé pour vérifier les résultats obtenus :

$$S_t = 0.3 S_c^{\frac{2}{3}} \quad (4.1)$$

Où (S_c) et (S_t) représentent respectivement les résistances à la compression et à la traction. Cependant, il est évident que l'équation 4.1 ne tient pas compte de la présence d'additions minérales et de sable SDC dans la formulation du mortier. Les valeurs estimées avec les résultats obtenus montrent un déficit total enregistrant une erreur quadratique moyenne élevée de 1.5 MPa. Une nouvelle relation est recherchée en modifiant les paramètres de l'équation ci-dessus, ce qui donne un coefficient de détermination élevé de 0.88. Cette corrélation justifie la pertinence de cette expression corrigée, soit par son coefficient de détermination élevé, soit par

sa faible erreur quadratique moyenne de 0.5 MPa. La nouvelle relation peut être écrite comme suit :

$$S_t = 0.3 S_c^{0.75} \quad (4.2)$$

La **figure 4.20** illustre la corrélation entre la résistance à la traction et les résultats de résistance à la compression, où l'équation 4.2 semble mieux corrélée aux résultats que l'équation 4.1.

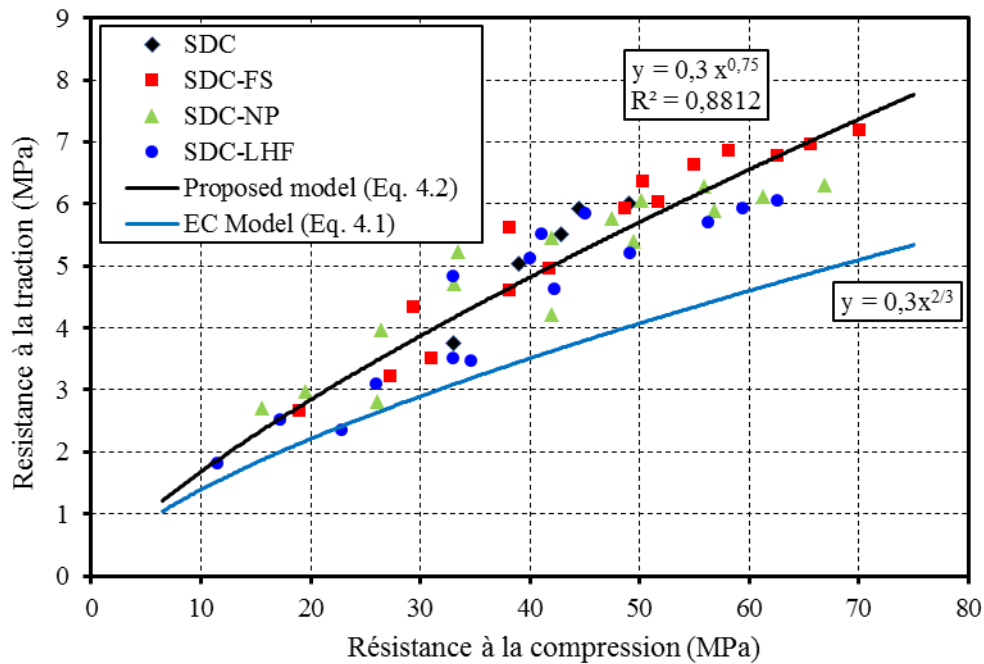


Figure 4.20 : Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction pour le mortier à base de sable SDC et la teneur en AM.

4.2.9. Corrélation de la résistance à la compression

Pour analyser les résultats obtenus concernant la résistance à la compression, une approche recommandée par l'ASTM C1074-93[201] a été utilisée. Cette approche suppose que la cinétique des propriétés du béton à température constante peut être représentée par l'équation hyperbolique suivante :

$$S_c(t) = S_{cu} \frac{t-t_0}{(t-t_0)+t_{50}} \quad (4.3)$$

Où $S_c(t)$ est la résistance à la compression du mortier à l'âge t ; $S_c(u)$ la résistance ultime à la compression du mortier à son âge ultime ; t_0 est l'âge auquel le développement de la résistance à la compression est supposé commencer et peut être considéré comme nul, et t_{50} est l'âge auquel la résistance à la compression atteint la moitié de sa valeur ultime, ce qui décrit

l'évolution de la résistance à la compression. Une analyse de régression des moindres carrés pour l'équation 4.3 a été utilisée pour déterminer les meilleures valeurs S_{cu} et t_{50} pour chaque ensemble de données [202,203]. La corrélation des résultats de résistance à la compression obtenus à partir de l'équation 4.3 s'ajuste bien aux données, avec un coefficient de corrélation acceptable.

La résistance à la compression ultime obtenue pour chaque mortier, ainsi que leur cinétique décrite par l'âge à mi-résistance, sont présentées dans la **figure 4.21**. Les résultats montrent un effet bénéfique sur le développement de la résistance à la compression ultime lorsque les additions minérales remplacent une partie du ciment. Un optimum est observé autour de 10 à 15% pour la fumée de silice et la pouzzolane naturelle, tandis que l'optimum pour le laitier granulé de haut fourneau dépasse 30%. À un âge plus avancé, 15% de FS génèrent une augmentation de la résistance de 50%, et 40% pour NP, ce qui nécessite un taux de 30% de LHF pour atteindre cette augmentation. L'âge à mi-résistance suit une augmentation linéaire avec le taux de substitution, indépendamment du type d'addition utilisé. À partir d'un taux de 15%, l'effet du type d'addition devient plus clair, où le LHF a un effet retardateur plus prononcé.

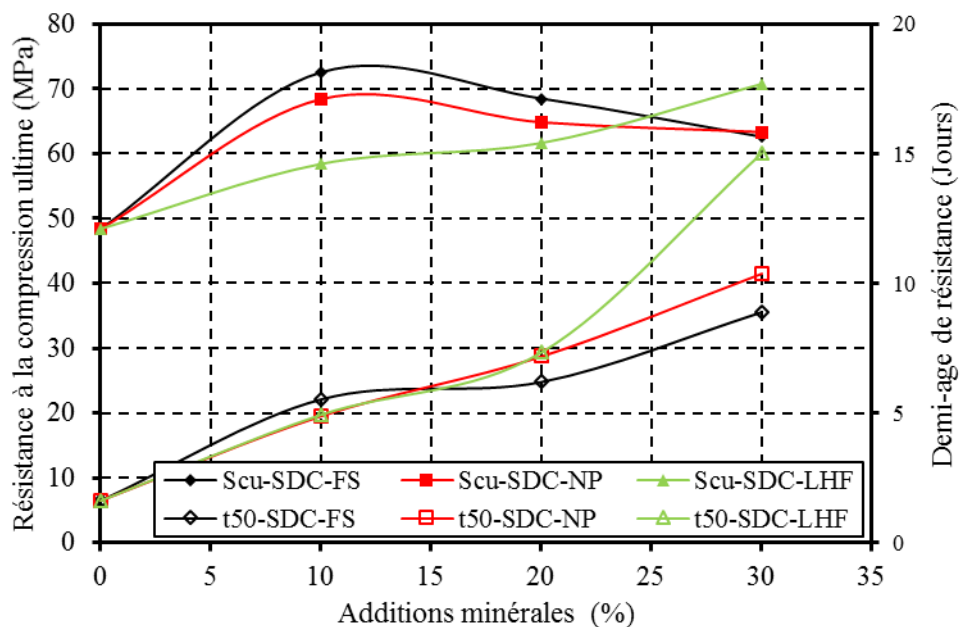


Figure 4.21 : Résistance ultime et demi-âge de résistance pour les mortiers à base de sable SDC et AM.

Afin de mieux prendre l'effet du taux d'addition minérale utilisé sur les paramètres de l'équation 4.3, plusieurs relations ont été testées pour exprimer la variation de S_u et t_{50} . Les formes polynomiales et linéaires ont montré un degré élevé de satisfaction pour exprimer ces

valeurs respectivement. Le **tableau 4.1** résume les relations trouvées, où le coefficient de détermination élevé justifie ce choix.

Tableau 4.1. Les paramètres S_{cu} et t_{50} exprimés en fonction du contenu des AM par la corrélation de l'Eq 4.3 avec les résultats expérimentaux.

	S_{cu}	R^2	t_{50}	R^2
FS	$S_{cu} = 48.34 + 2.8 p - 0.08 p^2$	0.896	$t_{50} = 1.61 + 0.25 p$	0.935
NP	$S_{cu} = 48.34 + 2.2 p - 0.06 p^2$	0.855	$t_{50} = 1.61 + 0.3 p$	0.996
LHF	$S_{cu} = 48.34 + 0.75 p$	0.967	$t_{50} = 1.61 + 0.4 p$	0.931

À partir de l'équation 4.3 et de ses paramètres indiqués dans le **tableau 4.1**, les résistances à la compression peuvent être directement calculées pour chaque type de mortier. La **figure 4.22** illustre la variation des valeurs mesurées et estimées. À partir de ces résultats, des corrélations élevées avec des coefficients de détermination proches de l'unité sont observées. L'erreur quadratique moyenne atteint des valeurs faibles de 2.2, 2.4 et 2.9 MPa pour les mortiers à base de fumée de silice, de pouzzolanes naturelles et de laitier granulé de haut fourneau respectivement. Les résultats obtenus sont encourageants et témoignent de la fiabilité de l'équation 4.3 pour prédire l'évolution de la résistance à la compression.

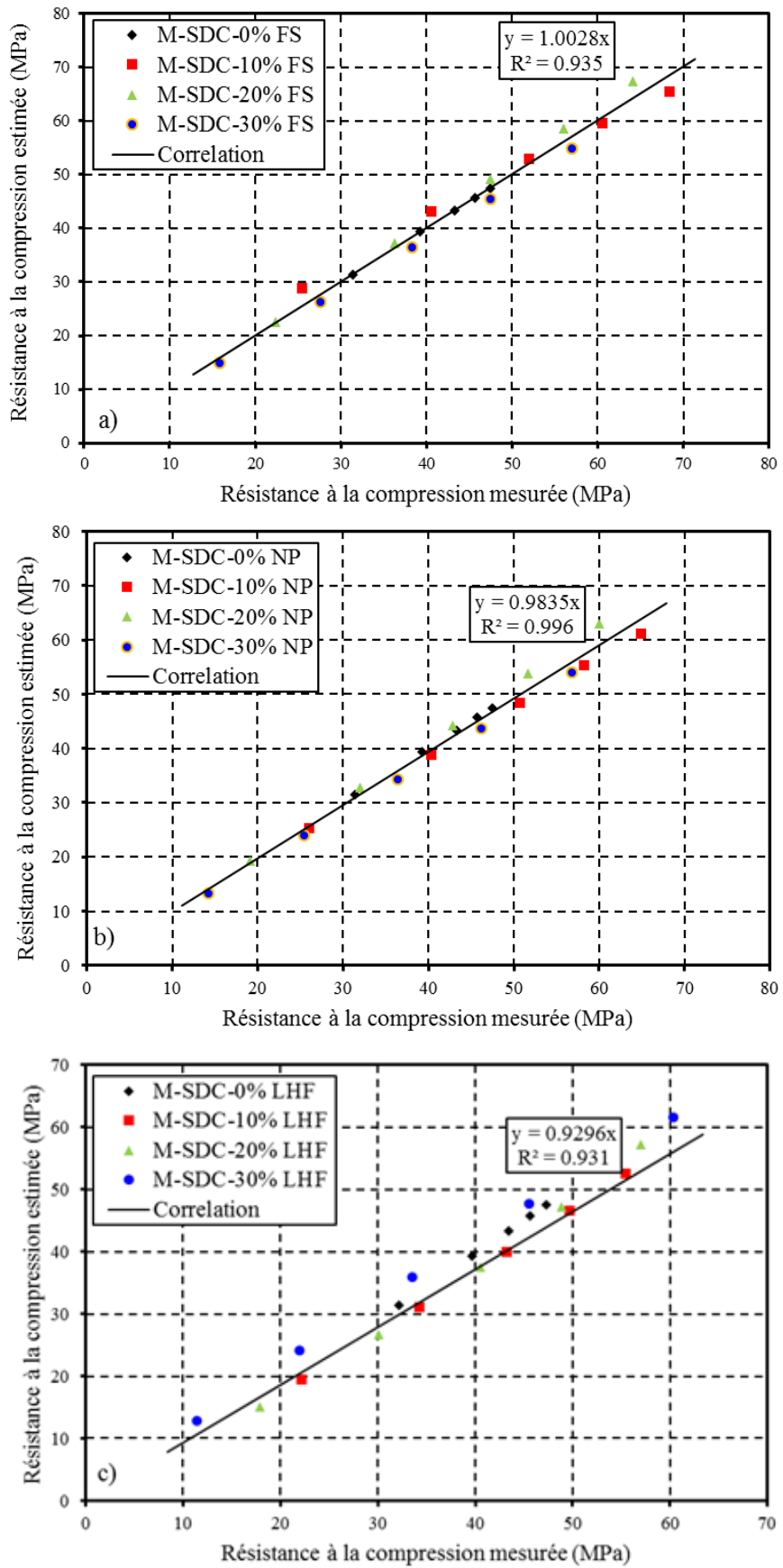


Figure 4.22: Comparaison entre la résistance à la compression mesurée et estimée d'un mortier basé sur le sable SDC et la teneur en AM.

4.3. Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'effet des additions minérales en présence de sable SDC sur les propriétés des mortiers à l'état frais et durci. Dans la majorité des cas étudiés, l'analyse de l'effet combiné du sable SDC et des additions minérales a permis d'expliquer le comportement des mélanges cimentaires. Toutefois, bien que certaines additions minérales, telles que la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et le laitier de haut fourneau broyé modifient les caractéristiques globales des mortiers et améliorent leur performance, leur influence sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et physiques est encore limitée en raison de leur activité de surface et de leur interaction avec le superplastifiant. De plus une corrélation satisfaisante a été observée, et les coefficients obtenus sont en accord avec les résultats de la littérature.

Conclusions générales

Conclusions générales

Cette étude a été menée pour évaluer la possibilité d'utiliser du sable SDC et des additions minérales dans la formulation du mortier. Cette étude expérimentale a été entreprise pour évaluer l'évolution de la résistance mécanique, des paramètres rhéologiques, de l'absorption d'eau, de la perte de masse et du retrait. En se basant sur les résultats de cette étude expérimentale, les conclusions générales suivantes peuvent être tirées :

- Le mortier à base de sable SN nécessite 2.2% de superplastifiant pour atteindre un étalement de 80%, tandis qu'un mortier à base de sable SDC atteint cette valeur avec seulement 0.44%. En mélangeant 10% de Fumée de silice, de pouzzolane naturelle ou de laitier granulé de haut fourneau avec le sable SDC, le dosage de superplastifiant augmente respectivement à 0.7%, 0.65% et 0.75%.
- En remplaçant le sable SN par le sable SDC, la viscosité plastique augmente de 4 Pa.s à 4.6 Pa.s et le seuil de cisaillement passe de 12.4 Pa à 19 Pa respectivement. Pour le mortier à base de sable SDC, ces valeurs augmentent de 6%, 17% et 18% pour la viscosité plastique, et de 37%, 57% et 38% pour le seuil de cisaillement lorsque 10% du ciment est remplacé par la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et du laitier granulé de haut fourneau respectivement.
- À 28 jours, le mortier à base de ciment ordinaire atteint une absorption d'eau de 2.55% avec le sable SN et 2% avec le sable SDC. Lorsque 10% du ciment est remplacé par la fumée de silice, la pouzzolane naturelle ou du laitier granulé de haut fourneau dans le mortier à base de sable SDC, l'absorption d'eau à 28 jours est réduite respectivement de 6%, 14% et 2%. Ces résultats montrent comment l'incorporation de ces additions minérales peut influencer la porosité et l'absorption d'eau du mortier.
- À 28 jours, le mortier à base de ciment ordinaire subit une perte de masse de 6.2% en présence du sable SN et seulement 5.2% lorsqu'il est fabriqué avec du sable SDC. La substitution du ciment par des additions minérales dans un mortier à base de sable SDC rend la matrice plus résistante et les pertes en masses enregistrées diminuent à 4.9%, 3.9% et 4.5% pour un taux de substitution de 10% de fumée de silice, de pouzzolane naturelle ou de laitier granulé de haut fourneau respectivement.

- Les résultats expérimentaux montrent que le sable SDC confère au mortier une résistance 2 fois plus élevée à 3 jours et 1.5 fois plus élevée à 90 jours que le sable SN. En remplaçant le ciment ordinaire par 10%, 20% et 30% de fumée de silice, les résistances à la compression du mortier à base de sable SDC s'améliorent respectivement de 42%, 34% et 27% à 90 jours. Avec une activité moindre que la fumée de silice, la pouzzolane naturelle augmentent la résistance à la compression de 36%, 25% et 16% pour les mêmes taux utilisés. Lorsque le ciment est remplacé par du laitier granulé de haut fourneau, les gains de résistance à la compression sont de 14%, 21% et 27%. Des résultats similaires ont été observés pour les résistances en flexion.
- Le mortier contenant du sable SDC est moins déformable et son retrait progresse lentement, contrairement à celui avec du sable SN. En remplaçant le ciment ordinaire par des additions minérales, le retrait devient plus faible et le mortier est moins sensible à la dessiccation. Les valeurs de retrait sont les plus faibles pour 10% de FS, 10% de NP et 30% de LHF.
- Une nouvelle relation permettant d'estimer la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression est proposée en modifiant les paramètres du modèle EC. Cette nouvelle relation présente un coefficient de détermination élevé de 0.88 et une erreur quadratique moyenne faible de 0.5 MPa au lieu de 1.5 MPa.
- À partir des résultats de résistance à la compression du mortier à base de sable SDC, une relation simple est proposée pour exprimer la résistance à la compression à n'importe quel âge en fonction du taux de substitution et du type d'addition minérale utilisé. De cette corrélation, des coefficients de détermination élevés proches de l'unité sont observés. L'erreur quadratique moyenne atteint des valeurs faibles de 2.2MPa, 2.4MPa et 2.9MPa pour les mortiers à base de la fumée de silice, pouzzolane naturelle et de laitier granulé de haut fourneau respectivement.

Recommandations

Il est recommandé de poursuivre les recherches dans cette direction, en mettant l'accent sur le comportement rhéologique du béton lorsque le sable SDC est utilisé en combinaison avec des additions minérales en utilisant des modèles avancés. Il serait également bénéfique de concentrer les futures études sur le comportement tribologiques des bétons associés à d'autres types d'additions minérales.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Clive, M. "Quarry Fines and Waste." *Special Report*, 2009, pp. 63-67.
- [2] *Collection Technique CIMbéton. Les Constituants des Bétons et des Mortiers*. Tome 1, Centre d'Information sur le Ciment et ses Applications (France), 2005, pp. 32-49.
- [3] Norman, S. H. "Sand Solutions: Replacing Natural Sand in Concrete." *Special Report*, 2008, pp. 24-26.
- [4] *Collection Technique CIMbéton. Les Bétons: Formulation, Fabrication et Mise en Œuvre*. Tome 2, Centre d'Information sur le Ciment et ses Applications (France), 2005, pp. 36-94.
- [5] Khouadjia, M. L. K. *Étude des Propriétés Physico-Mécaniques et Rhéologiques des Bétons à Base des Sables de Carrières : Expérimentation et Modélisation*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016,224p.
- [6] Martaud, T. *Évaluation Environnementale de la Production de Granulats Naturels en Exploitation de Carrière : Indicateurs, Modèles et Outils*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2008.212p.
- [7] *Larousse. Encyclopédie Larousse en Ligne*, 2017.
- [8] Wuerpel, C. E. *Aggregates for Concrete*. National Sand and Gravel Association, 1944.
- [9] Kômar, A. *Matériaux et Éléments de Construction*. Éditions Mir, Moscow,1978.
- [10] Bérard, J., and Roux, R. "La Viabilité des Bétons du Québec : Le Rôle des Granulats." *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. 1, 1986, pp. 12-24.
- [11] Maza, M. *Analyse des Propriétés Physiques et Mécaniques des Mortiers à Base de Sable Mixte*. Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, 2016.p.
- [12] La Croix, R., Fuentes, A., and Thonier, H. *Traité du Béton Armé*. Eyrolles, 1982.
- [13] Festa, J., and Dreux, G. *Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants*. Éditions Eyrolles, 1998.
- [14] Xigherovich, M. *Matériaux de Construction*. Moscow, 1970.
- [15] Xkramtaev, B. *Détermination de la Composition des Bétons de Différentes Sortes*. Moscow, 1970.
- [16] Litehiser, R. R., Dean Kurt, F., and Wendt, R. T. "Chemical Reactions of Aggregates in Concrete." *Highway Research Board Special Report*, vol. 31, 1958, pp. 19.
- [17] Gorisse, F. *Essais et Contrôle des Bétons*, 1985.
- [18] *ASTM Standard. C 33-78*.
- [19] Bounedjema, Y. *Évaluation des Modifications Mécaniques et Rhéologiques Apportées par le Sable de Concassage aux Mortiers et Bétons*. Thèse de doctorat, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2017.149p.
- [20] *Direction Générale des Mines. Bilan des Activités Minières*. Ministère de l'Énergie des Mines, 2010.104 p.

- [21] Bessa-Badreddine, A. *Étude de la Contribution des Additions Minérales aux Propriétés Physiques, Mécaniques et de Durabilité des Mortiers*. Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2004.236 p.
- [22] Amouri, C. *Contribution à l'Étude de l'Influence des Différents Ajouts sur les Propriétés des Matrices Cimentaires*. Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri Constantine, 2009.161 p.
- [23] Bapat, J. D. *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*. CRC Press, Taylor Francis Group, 2012.
- [24] Gerry, B. *Portland Cement*. 3rd ed., ICE Publishing, 2011.
- [25] Sellevold, E. J., and Nilsen, T. "Les Fumées de Silice Condensées dans la Fabrication du Béton: Une Étude Mondiale." *Matériaux Supplémentaires en Cimenterie*, CANMET, 1987, pp. 183-273.
- [26] Berry, E. E., and Malhotra, V. M. "Utilisation des Cendres Volantes dans la Préparation du Béton." *Matériaux Complémentaires en Cimentation pour le Béton*, CANMET, 1987, pp. 39-18.
- [27] Committee 232. *Use of Fly Ash in Concrete. Manual of Concrete Practice*, ACI 232.2R-96, 1996.
- [28] ACI Committee 234. *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete. Manual of Concrete Practice*, ACI 234R-96, 1996,51 p.
- [29] ACI Committee 233. *Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete. Manual of Concrete Practice*, ACI 233R-95, 1995,17 p.
- [30] Cornec, D. *Étude de la Structure des Laitiers Vitriifiés de Hauts-Fourneaux et de leur Réactivité à l'Eau en Milieu Basique*. Thèse de doctorat, Université de Sorbonne, 2019,245p.
- [31] Husson, S. *Étude Physicochimique et Mécanique des Interactions Ciment-Fillers. Application aux Mortiers*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 1991, 166p.
- [32] Chloup-Bondant, M. *Étude des Mécanismes Réactionnels dans l'Hydratation des Silicates et Aluminates Tricalciques en Présence d'un Filler Calcaire*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 1996,156p.
- [33] Barkat, M. *Effets des Additions Minérales et Adjuvants Fluidifiants sur le Comportement Rhéologique des Mortiers et Bétons Frais et Durcis à Base de Sables des Carrières*. Thèse de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.91p.
- [34] Hot, J. *Influence des Polymères de Type Superplastifiants et Agents Entraîneurs d'Air sur la Viscosité Macroscopique des Matériaux Cimentaires*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2013,205p.
- [35] Boragafio, J. R., and Macias, A. "Rheological Properties of Cement Pastes Containing Different Organic Dispersants." *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cements*, New Delhi, 1992, pp. 557-563.
- [36] Guy, C., and Grossiord, J. L. *Initiation à la Rhéologie*. Lavoisier, Tec Doc, 2000.
- [37] De Larrard, F., and Belloc, A. "L'Influence du Granulat sur la Résistance à la Compression des Bétons." *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, no. 219, 1999, pp. 41-52.

- [38] Banfill, P. F. G. "The Rheology of Fresh Cement and Concrete: A Review." *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*, 2003.
- [39] Roussel, N. *Understanding the Rheology of Concrete*. Elsevier, Woodhead Publishing, 2012.
- [40] Belaidi, A. *Influence des Additions Minérales et Organiques sur la Tribologie des Bétons*. Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2022, 143 p.
- [41] Beaupre, D., Chapdelaine, F., Domone, P., Koehler, E., Sheand, L., Sonebi, M. "Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at MB." *NIST Interagency/Internal Report 7154*, edited by Chiara F. Ferraris and Lynn E. Brower, National Institute of Standards and Technology, 2004, pp. 1-62
- [42] Wallevik, O. H. "Rheology: A Scientific Approach to Develop Self-Compacting Concrete." *Proceedings of International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 23-32.
- [43] Itim, A., Ezziane, K., and Kadri, E. H. "Compressive Strength and Shrinkage of Mortar Containing Various Amounts of Mineral Additions." *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011, pp. 3603-3609.
- [44] Rmili, A., Ben Ouezdou, M., Added, M., Ghorbel, E. "Incorporation of Crushed Sands and Tunisian Desert Sands in the Composition of Self-Compacting Concretes." *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 3, 2009, pp. 3-9.
- [45] Nanda, R. P., Amiya, K. D., and Moharana, N. C. "Stone Crusher Dust as a Fine Aggregate in Concrete for Paving Blocks." *International Journal of Civil Structural Engineering*, vol. 1, no. 3, 2010, pp. 613-620.
- [46] Vinayak, R. S., and Popat, D. K. "Properties of Concrete by Replacement of Natural Sand with Artificial Sand." *International Journal of Engineering et Technology*, vol. 1, 2012, pp. 1-7.
- [47] Bouziani, T. "Assessment of Fresh Properties and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Made with Different Sand Types by Mixture Design Modelling Approach." *Construction and Building Materials*, vol. 49, 2013, pp. 308-314.
- [48] Kou, S. C., and Poon, C. S. "Properties of Concrete Prepared with Crushed Fine Stone, Furnace Bottom Ash and Fine Recycled Aggregate as Fine Aggregates." *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, pp. 2877-2886.
- [49] Melais, F. Z., and Achoura, D. "Formulation and Properties of Sand Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers." *XXIX Meetings in Civil Engineering University*, Tlemcen, Algeria, 2011.
- [50] Al-Ameeri, A. S. A., and Haider, M. "Using Different Types of Fine Aggregate to Produce High Strength Concrete." *International Journal of Arts et Sciences*, vol. 5, no. 7, 2012, pp. 187-196.
- [51] Cabrera, O. A., Traversa, L. P., and Ortega, N. F. "Flowability in Crushed Sand Mortar." *Materiales de Construcción*, vol. 60, no. 300, 2010, pp. 115-130.
- [52] Belaidi, A. S., Kenai, S., Kadri, E. L., Soualhi, H., Benchaâ, B. "Effects of Experimental Ternary Cements on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concretes." *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 30, no. 3, 2016, pp. 247-261.

- [53] Shi, T. Y., Tanigawa, Y., Mori, H., Kurokawa, Y. "A Study of Effect of Superfine Powders on Fluidity of Cement Paste." *Transport Japan Concrete Institute*, vol. 20, 1998, pp. 223-228.
- [54] Meziane, E. H., Ezziane, K., and Kenai, S. "Mechanical, Hydration, and Durability Modifications Provided to Mortar Made with Crushed Sand and Blended Cements." *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 29, 2015, pp. 1987-2005.
- [55] Bonavetti, V. L., and Irassar, E. F. "The Effect of Stone Dust Content in Sand." *Cement and Concrete Composites*, vol. 24, 1994, pp. 580-590.
- [56] Benabed, B., Kadri, E. H., Azzouz, L., Kenai, S. "Properties of Self-Compacting Mortar Made with Various Types of Sand." *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, 2012, pp. 1167-1173.
- [57] Kenai, S., Benna, Y., and Menadi, B. "The Effect of Fines in Crushed Calcareous Sand on Properties of Mortar and Concrete." *Proceedings of the International Conference on Infrastructure Regeneration and Rehabilitation*, Sheffield, 1999, pp. 253-261.
- [58] Persoz, B. *Introduction à l'Étude de la Rhéologie*. Dunod, 1960, 271 p
- [59] Ramirez, J. L., Barcena, J. M., Urreta, J. I. "Proposal for Limitation and Control of Fines in Calcareous Sands Based upon their Influences in Some Concrete Properties." *Materials and Structures*, vol. 23, 1990, pp. 277-288.
- [60] Donza, H., Gonzalez, M., and Cabrera, O. "Influence of Fine Aggregate Mineralogy on Mechanical Properties in High Strength Concrete." *Second International Conference on High Performance Concrete*, Gramado, Brazil, 1999, pp. 4-6.
- [61] Skender, Z. *Durabilité du Béton à Base de Sable de Concassage*. Master's thesis, École Nationale Supérieure Polytechnique, 2009.
- [62] Martinie, L., Pierre, R., and Nicolas, R. "Rheology of Fiber Reinforced Cementitious Materials : Classification and Prediction." *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 2, 2010, pp. 226-234.
- [63] Yahia, A., Tanimura, M., and Shimoyama, Y. "Rheological Properties of Highly Flowable Mortar Containing Limestone Filler : Effect of Powder Content and W/C Ratio." *Cement and Concrete Research*, vol. 35, 2005, pp. 532-539.
- [64] Safiddine, S., Debieb, F., Kadri, E. H., Menadi, B., Soualhi, H. "Effect of Crushed Sand and Limestone Crushed Sand Dust on the Rheology of Cement Mortar." *Applied Rheology*, vol. 27, 2017, pp. 14940.
- [65] Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., Forssberg, E. "Influence of Fine Aggregate Characteristics on the Rheological Properties of Mortars." *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, 2008, pp. 274-282.
- [66] Esping, P. "Effect of Limestone Filler BET (H₂O)-Area on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 7, 2008, pp. 938-944.
- [67] Bederina, M., Makhloufi, Z., Bounoua, A. "Effect of Partial and Total Replacement of Siliceous River Sand with Limestone Crushed Sand on the Durability of Mortars Exposed to Chemical Solutions." *Construction and Building Materials*, vol. 47, 2013, pp. 146-158.

- [68] Menadi, B., Kenai, S., Khatib, J., Aït-Mokhtar, A. "Strength and Durability of Concrete Incorporating Crushed Limestone Sand." *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, 2009, pp. 625-633.
- [69] Benyamina, S. *Performance des Bétons Auto Plaçant à Base de Sable de Concassage*. Thèse de Doctorat, Université Saad Dahleb, Blida1, 2019,167 p.
- [70] Celik, T., and Marar, K. "Effects of Crushed Stone Dust on Some Properties of Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 26, 1996, pp. 1121-1130.
- [71] Bedday, A. *Étude du Sable Calcaire de Concassage et son Utilisation dans le Béton Hydraulique*. Doctoral thesis, Faculté des Sciences de Tunis, 2000.
- [72] Elat, E., Pliya, P., Pierre, A., Mbessa, M., Noumowé, A. "Microstructure and Mechanical Behavior of Concrete Based on Crushed Sand Combined with Alluvial Sand." *Civil Engineering*, vol. 1, no. 3, 2020, pp. 181-197.
- [73] Bouhamou, N., Mesbah, H., Jauberthie, R., Ouali, A., Mebrouki, A. "Influence des Rapports Eau/Ciment et Fines/Ciment sur le Comportement à l'État Durci du Béton Autoplaçant à Base de Matériaux Locaux Algériens." *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 36, no. 7, 2009, pp. 1195-1206.
- [74] Amba, J. C. *Caractérisation des Gradients de Propriétés d'une Couche de Mortier et Influence sur la Fissuration : Expérimentation et Modélisation*. Doctoral thesis, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [75] Kenai, S., and Debieb, F. "Caractérisation de la Durabilité des Bétons Recyclés à Base de Gros et Fins Granulats de Briques et de Béton Concassés." *Materials and Structures*, vol. 44, 2011, pp. 815-824.
- [76] Makani, A. *Influence de la Nature Minéralogique des Granulats sur le Comportement Mécanique Différé des Bétons*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, INSA, 2011,298 p.
- [77] Lokeswaran, M. R., and Natarajan, C. "Study on the Properties of Cement Concrete Using Manufactured Sand." *Advances in Structural Engineering*, 2014, pp. 1803-1809.
- [78] Mane, K. M., Kulkarni, D. K., and Prakash, K. B. "Near-Surface and Chloride Permeability of Concrete Using Pozzolanic Materials and Manufactured Sand as Partial Replacement of Fine Aggregate." *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 45, 2021, pp. 1427-1439.
- [79] Menadi, B. *Performance du Mortier et Béton à Base de Filler Calcaire*. Doctoral thesis, Université Saad Dahleb de Blida, 2008.
- [80] Hebbouche, A. *Propriété Mécaniques et Durabilité du Béton à Base de Sable de Concassage*. Master's thesis, Université Saad Dahleb de Blida, 2002,98 p.
- [81] Joudi-Bahri, I., Lecomte, A., Ben Ouezdou, M., Achour, T. "Use of Limestone Sands and Fillers in Concrete Without Superplasticizer." *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 6, 2012, pp. 771-780.
- [82] Debieb, F., and Kenai, S. "The Use of Coarse and Fine Crushed Bricks as Aggregate in Concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 22, 2008, pp. 886-893.
- [83] Kenai, S., and Menadi, B. "Use of Sand from Residues of Aggregate Quarries in Concrete." *Proceedings of the International Conference*, Beijing, China, September 2005.

- [84] Leroy, M. N. L., Molay, T. G. G., Joseph, N., Ndjaka, J. M. "Analysis of Strength Hydraulic Concrete Produced with a Mixture of Crushed Gneiss and Alluvial Sand." *Journal of Applied Mechanical Engineering*, vol. 6, 2017, p. 289.
- [85] Khouadjia, M. L., Kamel, M. L., Bouzidi, M., Mounsif, D. "Experimental Evaluation of Workability and Compressive Strength of Concrete with Several Local Sand and Mineral Additions." *Construction and Building Materials*, vol. 98, 2015, pp. 194-203.
- [86] Ramachandran, V. S., and Zhang, C. "Influence of CaCO_3 on Hydration and Microstructural Characteristics of Tricalcium Silicate." *II Cemento*, vol. 3, 1986, pp. 129-152.
- [87] Rajput, S. P. S. "An Experimental Study on Crushed Stone Dust as Fine Aggregate in Cement Concrete." *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, 2018, pp. 17540-17547.
- [88] Bounedjema, Y., Ezziane, K., and Hallal, A. "Variation of Mechanical and Rheological Properties of Mortar by Replacement of Natural Sand with Crushed Sand." *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 31, 2017, pp. 182-201.
- [89] Rahal, K. "Mechanical Properties of Concrete with Recycled Coarse Aggregate." *Building and Environment*, vol. 42, no. 1, 2007, pp. 407-415.
- [90] Kantro, D. L. "Calcium Carbonate Additions." *Paper Presented at the Portland Cement Association Cement Chemistry Seminar*, 1978.
- [91] Khatib, J. M., Menadi, B., and Kenai, S. "Effect of Cement Type on Strength Development of Mortars Containing Limestone Fines." *Proceedings of the Concrete Construction through Innovation Conference*, Kingston University, United Kingdom: CRC Press, 2008, pp. 227-231.
- [92] Kosmatka, S. H., and Wilson, M. L. *Design and Control of Concrete Mixtures*. 15th ed., Portland Cement Association, 2011.
- [93] Aquino, C., Inoue, M., Miura, H., Mizuta, M., Okamoto, T. "The Effects of Limestone Aggregate on Concrete Properties." *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 12, 2010, pp. 2363-2368.
- [94] Yamani, N., El Azdi, K., and Zaim, K. "Utilisation de Sable de Mer et de Concassage dans le Mortier de Ciment." *Revue Marocaine du Génie Civil*, vol. 2, 1992, pp. 43-63.
- [95] Ramirez, J. L., Barcena, J. M., and Urreta, J. I. "Sables Calcaires à Fines Calcaires et Argileuses : Influence et Nocivité dans les Mortiers de Ciment." *Matériaux et Construction*, vol. 20, 1987, pp. 202-213.
- [96] Kwan, A. K. H. "Use of Condensed Silica Fume for Making High-Strength, Self-Consolidating Concrete." *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 27, no. 4, 2000, pp. 620-627.
- [97] Kourounis, S., Tsivilis, S., Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., Tsibouki, Z. "Properties and Hydration of Blended Cements with Steelmaking Slag." *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, pp. 815-822.
- [98] Park, C. K., Noh, M. H., and Park, T. H. "Rheological Properties of Cementitious Materials Containing Mineral Admixtures." *Cement and Concrete Research*, vol. 35, 2005, pp. 842-849.
- [99] Bellifa, S. *Évolution de la Porométrie des Pâtes Autoplaçantes*. Mémoire de magister, Université Aboubekr Belkaid, 2012.

- [100] Shafigh, P., Jumaat, M. Z., Mahmud, H., Alengaram, U. J. "Oil Palm Shell Lightweight Concrete Containing High Volume Ground Granulated Blast Furnace Slag." *Construction and Building Materials*, vol. 40, 2013, pp. 231-238.
- [101] Lohani, T. K., Padhi, M., Dash, K. P., Jena, S. "Optimum Utilization of Quarry Dust as Partial Replacement of Sand in Concrete." *International Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 1, 2012, pp. 391-404.
- [102] Arivalagan, S. "Sustainable Studies on Concrete with GGBS as a Replacement Material in Cement." *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 8, no. 3, 2014, pp. 263-270.
- [103] Sethy, K., Pasla, D., and Sahoo, U. C. "Effect of Slag on the Rheological and Strength Properties of Self-Compacting Concrete." *Key Engineering Materials*, vol. 629-630, 2014, pp. 399-404.
- [104] Abdulkareem, O. M., Ben Fraj, A., Bouasker, M., Khelidj, A. "Mixture Design and Early Age Investigations of More Sustainable UHPC." *Construction and Building Materials*, vol. 163, 2018, pp. 235-246.
- [105] Tougy, M., and Nouari, L. "Les Fillers Calcaires Utilisé comme Constituant Secondaire dans la Production du Ciment Composé." *Revue Marocaine du Génie Civil*, vol. 67, 1997, pp. 35-39.
- [106] Ferraris, C. F., Obla, K. H., and Hill, R. "Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, pp. 245-255.
- [107] Carlsward, J., Emborg, M., Utsi, S., Oberg, P. "Effect of Constituents on the Workability and Rheology of Self-Compacting Concrete." *Proceedings of the Third International RILEM Conference on SCC*, Island, 2003, pp. 143-153.
- [108] Aïtcin, P. C. "Les Superplastifiants: des Réducteurs d'Eau Pas Comme les Autres." *Recueil de Conférences Présentées à l'Université de Sherbrooke*, 1990.
- [109] Kesseir, M., Kadri, E. H., and Ngo, T. T. "Rheological and Mechanical Performance Evaluation of High-Performance Mortar Based on Natural Pozzolan." *Journal of Materials and Engineering Structures*, vol. 7, no. 3, 2020, pp. 467-476.
- [110] Bouglada, M. S., Naceri, A., Baheddi, M., Pereira-de-Oliveira, L. "Characterization and Modelling of the Rheological Behaviour of Blended Cements Based on Mineral Additions." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 25, no. 4, 2019, pp. 655-672.
- [111] El Hilali, A. *Étude Expérimentale de la Rhéologie et du Comportement des Bétons Autoplaçants (BAP): Influence des Fines Calcaires et des Fibres Végétales*. Thèse de Doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2009, 183 p.
- [112] Petit, J. Y., Wirquin, E., Vanhove, Y., Khayat, K. "Yield Stress and Viscosity Equations for Mortars and Self-Consolidating Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 5, 2007, pp. 655-670.
- [113] Soualhi, H. *Optimisation de la Viscosité des Bétons à Faible Impact Environnemental*. Thèse de doctorat, Université Cergy Pontoise, 2014, 166 p.
- [114] Zhang, X., and Jihong, H. "The Effect of Ultra-Fine Admixture on the Rheological Property of Cement Paste." *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 5, 2000, pp. 827-830.

- [115] Boukendakdji, O., Kadri, E. L., and Kenai, S. "Effects of Granulated Blast Furnace Slag and Superplasticizer Type on the Fresh Properties and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete." *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, no. 4, 2012, pp. 583-590.
- [116] Adjoudj, M. *Effet des Additions Minérales et Organiques sur le Comportement Rhéologique du Béton*. Thèse de doctorat, Université de Chlef, Algérie, 2015, 161 p.
- [117] El Barrak, M. *Contribution à l'Étude de l'Aptitude à l'Écoulement des Bétons Autoplaçants à l'État Frais*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, France, 2005, 228 p.
- [118] Taleb, O., Ghomari, F., Boukli, H., Kadri, E. L., Soualhi, H. "Formulation and Rheology of Eco-Self-Compacting Concrete (Eco-SCC)." *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 31, no. 3, 2017, pp. 272-296.
- [119] Vance, K., Kumar, A., Sant, G., Neithalath, N. "The Rheological Properties of Ternary Binders Containing Portland Cement, Limestone, and Metakaolin or Fly Ash." *Cement and Concrete Research*, vol. 52, 2013, pp. 196-207.
- [120] Laakri, M., Oudjit, M. N., and Abdelli, K. "Hydratation et l'Effet sur les Résistances des Ciment Pouzzolaniques." *Colloque International Francophone NoMaD*, LMDC/AUGC, Toulouse, France, 2012.
- [121] Khatib, J. M., and Clay, R. M. "Absorption Characteristic of Metakaolin Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 34, 2003, pp. 19-29.
- [122] Abdul Razak, H., Chai, H. K., and Wong, H. S. "Near Surface Characteristics of Concrete Containing Supplementary Cementing Materials." *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 7, 2004, pp. 883-889.
- [123] Siddique, R., and Juvas, K. "Influence of Metakaolin on the Properties of Mortar and Concrete: A Review." *Applied Clay Science*, vol. 43, no. 3-4, 2009, pp. 392-400.
- [124] Ramezaniyanpour, A. A., and Bahrami Jovein, H. "Influence of Metakaolin as Supplementary Cementing Material on Strength and Durability of Concretes." *Construction and Building Materials*, vol. 30, 2012, pp. 470-479.
- [125] Zenati, A., Tahlaiti, M., Khelidj, A., Oudjit, M. N. "Hydration, Shrinkages and Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete Containing Blast Furnace Slag and Algerian Dune Sand." *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 42, 2019, pp. 86-99.
- [126] Laakri, M. *Influence des Ajouts Locaux sur les Propriétés Physico-Chimique et Mécanique de la Pâte Cimentaire*. Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Algérie, 2020, 139 p.
- [127] Menéndez, G., Bonavetti, V., and Irassar, E. F. "Strength Development of Ternary Blended Cement with Limestone Filler and Blast-Furnace Slag." *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 1, 2003, pp. 61-67.
- [128] Kerbouche, A., Mouli, M., Laoufi, L., Senhadji, Y., Benosmane, S. "Influence des Ajouts Minéraux sur les Résistances Mécaniques des Mortiers." *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*, ENSET Oran, Algeria, October 12-14, 2009, pp. 432-438.

- [129] Fodil, D., and Mouli, M. "Compressive Strength and Corrosion Evaluation of Concretes Containing Pozzolana and Perlite Immersed in Aggressive Environments." *Construction and Building Materials*, vol. 179, 2018, pp. 25-34.
- [130] Laakri, M., Oudjit, M. N., and Abdeli, K. "Volumetric Variation and Rheology of Cement-Based Mineral Additions (Blast Furnace Slag and Silica Fume)." *Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 2, no. 8, 2014, pp. 207-212.
- [131] Arroudj, K., Tagnit-Hamou, A., Dorbani, S., Oudjit, M. N. "Use of Algerian Natural Mineral Deposit as Supplementary Cementitious Materials." *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 34, 2018, pp. 48-58.
- [132] Mouli, M., and Khelafi, H. "Performance Characteristics of Lightweight Aggregate Concrete Containing Natural Pozzolan." *Building and Environment*, vol. 43, no. 1, 2008, pp. 31-36.
- [133] Turanli, L., Uzal, B., and Bektas, F. "Effect of Large Amounts of Natural Pozzolan Addition on Properties of Blended Cements." *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, 2005, pp. 1106-1111.
- [134] Shannag, M. J. "High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume." *Cement and Concrete Composites*, vol. 22, no. 6, 2000, pp. 399-406.
- [135] Uzzal Hossain, M., Cai, R., Ng, T. S., Xuan, D., Hailong, Y. "Sustainable Natural Pozzolana Concrete – A Comparative Study on Its Environmental Performance Against Concretes with Other Industrial By-Products." *Construction and Building Materials*, vol. 270, 2021, p. 121429.
- [136] Suresh, D., and Nagaraju, K. "Ground Granulated Blast Slag (GGBS) in Concrete – A Review." *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 12, no. 4, 2015, pp. 76-82.
- [137] Gupta, P. K., and Virendra, K. V. "Study of Concrete-Filled Unplasticized Poly-Vinyl Chloride Tubes in Marine Environment." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 230, no. 2, 2016, pp. 229-240.
- [138] Pietro, L., Van Breugel, K., and Maruyama, I. "Effect of Curing Temperature and Type of Cement on Early-Age Shrinkage of High-Performance Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 12, 2001, pp. 1867-1872.
- [139] Liu, Z., El-Tawil, S., Hansen, W., Wang, F. "Effect of Slag Cement on the Properties of Ultra-High-Performance Concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 190, 2018, pp. 830-837.
- [140] Arun Kumar, M., Magesh, R., Selvapraveen, S., Vignesh, M. "Assessment on Fresh Properties and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete." *AIP Conference Proceedings*, vol. 2235, no. 1, 2020, p. 020021.
- [141] Benmammar, M., Boukli, H. S. M., and Taleb, O. "Influence of Silica Fume and Blast Furnace Slag on the Dynamic and Mechanical Properties of Concrete." *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 20, 2019, pp. 581-589.
- [142] Dinakar, P., Sethy, K. P., and Sahoo, U. C. "Design of Self-Compacting Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag." *Materials et Design*, vol. 43, 2013, pp. 161-169.

- [143] Madani, B., Makhloufi, Z., and Bouziani, T. "Effect of Limestone Fillers on the Physico-Mechanical Properties of Limestone Concrete." *Physics Procedia*, vol. 21, 2011, pp. 28-34.
- [144] Mikhailova, O., Yakovlev, G., Maeva, I., Senkov, S. "Effect of Dolomite Limestone Powder on the Compressive Strength of Concrete." *Procedia Engineering*, vol. 57, 2013, pp. 775-780.
- [145] Demirhan, S., Kazim, T., and Kubra, U. "Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Portland Limestone Cement Mortars: Effect of High-Volume Limestone Powder Replaced by Cement." *Construction and Building Materials*, vol. 196, 2019, pp. 115-125.
- [146] Taleb, O. *Étude du Comportement Rhéologique des Bétons Autoplaçants Locaux*. Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2017, 236 p.
- [147] Elbahi, B., and Boukli, H. "Influence of Limestone Fillers and Natural Pozzolan on Engineering Properties of Concrete." *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 30, no. 16, 2016, pp. 1795-1807.
- [148] Kadri, E. H., Aggoun, S., De Schutter, G., Ezziane, K. "Combined Effect of Chemical Nature and Fineness of Mineral Powders on Portland Cement Hydration." *Materials and Structures*, vol. 43, 2010, pp. 665-673.
- [149] Bouglada, M. S. *Caractérisation Physico-Chimique et Microstructurale des Ajouts Minéraux*. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, Algérie, 2019, 244 p.
- [150] Diederich, P. *Contribution à l'Étude de l'Influence des Propriétés des Fillers Calcaires sur le Comportement Autoplaçant du Béton*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2010.
- [151] Van Rompaey, G. *Étude de la Réactivité des Ciments Riches en Laitier, à Basse Température et à Temps Court, sans Ajout Chlorure*. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, 2006, 345p.
- [152] Binici, H., Cagatay, I. H., and Eken, M. "Hydration Heat Evolution and Fineness of Blended Cement Containing Steel Slag and Pumice." *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, vol. 4, no. 12, 2017, pp. 907-913.
- [153] Laakri, M., Oudjit, M. N., and Saidani-Scott, H. "Influence of Natural Pozzolan and Blast Furnace Slag on Hydration and Physico-Mechanical Properties of Cement." *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 10, no. 3, 2019, pp. 112-124.
- [154] Sullivan, M. S., Chorzepa, M. G., and Durham, S. A. "Characterizing the Performance of Ternary Concrete Mixtures Involving Slag and Metakaolin." *Infrastructures*, vol. 5, no. 2, 2020, p. 14.
- [155] Suntharalingam, S., and Takahashi, Y. "Experimental Study on Autogenous Shrinkage Behaviors of Different Portland Blast Furnace Slag Cements." *Construction and Building Materials*, vol. 230, 2020, p. 116980.
- [156] Saito, K., Kinoshita, M., Umehara, H., Yoshida, R. "Properties of Low-Shrinkage, High-Strength SCC Using Shrinkage-Reducing Admixture, Blast Furnace Slag and Limestone Aggregates." *Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete : Proceedings of SCC2010*, Springer Netherlands, 2010, pp. 283-293.

- [157] Snoeck, D., Jensen, O. M., and De Belie, N. "The Influence of Superabsorbent Polymers on the Autogenous Shrinkage Properties of Cement Pastes with Supplementary Cementitious Materials." *Cement and Concrete Research*, vol. 74, 2015, pp. 59-67.
- [158] Wyrzykowski, M., and Lura, P. "Reduction of Autogenous Shrinkage in OPC and BFSC Pastes with Internal Curing." *Proceedings of the XIII International Conference on Durability of Building Materials and Components*, São Paulo, Brazil, 2014, pp. 1010-1017.
- [159] Li, J., and Yan, Y. "A Study on Creep and Drying Shrinkage of High-Performance Concrete." *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 8, 2001, pp. 1203-1206.
- [160] Lim, S. N., and Wee, T. H. "Autogenous Shrinkage of Ground-Granulated Blast-Furnace Slag Concrete." *Materials Journal*, vol. 97, no. 5, 2000, pp. 587-593.
- [161] Mehta, P. K. "Pouzzolanes Naturelles dans Matériaux Complémentaires en Cimentation." In V. M. Malhortra (Ed.), 1987, pp. 3-38.
- [162] Nehdi, M. "Why Some Carbonate Fillers Cause Rapid Increases of Viscosity in Dispersed Cement-Based Materials." *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 10, 2000, pp. 1663-1669.
- [163] Mane, K. M., Kulkarni, D. K., and Prakash, K. B. "Performance of Various Pozzolanic Materials on the Properties of Concrete Made by Partially Replacing Natural Sand by Manufactured Sand." *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 4, 2019, pp. 1-9.
- [164] Verma, S., Singh, R., and Gupta, A. "Effect of Waste Materials on the Mechanical Properties of Concrete: A Comprehensive Review." *Journal of Sustainable Materials and Technologies*, vol. 12, 2016, pp. 45-52.
- [165] Ahari, R.S., Erdem, T.K., Ramyar, K. "Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 75, 2015, pp. 89-98
- [166] Binici, H., Aksogan, O., and Shah, T. "Durability of Concrete Made with Granite and Marble as Recycle Aggregates." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 208, 2008, pp. 299-308.
- [167] Ghannam, S., Najm, H., and Vasconez, R. "Experimental Study of Concrete Made with Granite and Iron Powders as Partial Replacement of Sand." *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 9, 2016, pp. 1-7.
- [168] Gadri, K., and Guettala, A. "Etude des Caractéristiques Physico-Mécaniques des Bétons de Sable à Base de Fumée de Silice." *MATEC Web of Conferences*, vol. 11, 2014, EDP Sciences.
- [169] Shanmugapriya, T., and Uma, R. N. "Optimization of Partial Replacement of M-Sand by Natural Sand in High-Performance Concrete with Silica Fume." *International Journal of Engineering Sciences Emerging Technologies*, vol. 2, no. 2, 2012, pp. 73-80.
- [170] De Weerd, K., Ben Haha, M., Le Saout, G., Kjellsen, K.O., Justnes, H., Lothenbach, B. "Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash." *Cement and Concrete Research*, vol. 41, 2011, pp. 279-291.

- [171] Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M. "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements." *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, 2007, pp. 542-549.
- [172] Umamaheswaran, V., Sudha, C., Ravichandran, P. T., & Rajkumar, P. K.. Use of M sand in high strength and high performance concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 28, 2015,1-8.
- [173] *NF P 18 541*. "Normalisation Française Sable de Concassage", 2004.
- [174] *XP P 18-303*. "Normalisation Française: Eau de Gâchage pour Béton", 1999,16 p.
- [175] *NF EN 196-1*. "Méthodes d'Essais des Ciments - Partie 1: Détermination des Résistances Mécaniques", AFNOR, 2006.
- [176] *ASTM C230/C230M-08*. "Standard Specifications for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement." ASTM International, 2008, pp. 1-6.
- [177] Soualhi, H., Kadri, E. H., Ngo, T. T., Bouvet, A., Cussigh, F., Kenai, S. "A New Vanerheometer for Fresh Mortar: Development and Validation." *Applied Rheology*, vol. 24, 2014, p. 17.
- [178] *NF EN 206-1*. "Béton - Partie 1 : Spécification, Performances, Production et Conformité." AFNOR, 2004.
- [179] *NF P 15-433*. "Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement" , AFNOR,1994,pp. 1- 6.
- [180] Westerholm, M., Lagerblad, B., and Forssberg, E. "Rheological Properties of Micromortars Containing Fines from Manufactured Aggregates." *Materials and Structures*, vol. 40, 2007, pp. 615-625.
- [181] Donza, H., Cabrera, O., and Irassar, E. F. "High-Strength Concrete with Different Fine Aggregates." *Cement and Concrete Research*, vol. 32, 2002, pp. 1755-1761.
- [182] Cepuritis, R., Wigum, B. J., Garboczi, E. J., Mortsell, E., Jacobsen, S. "Filler from Crushed Aggregate for Concrete: Pore Structure, Specific Surface, Particle Shape and Size Distribution." *Cement and Concrete Composites*, vol. 54, 2014, pp. 2-16.
- [183] Skare, E. L., Sheiati, S., Cepuritis, R., Mortsell, E., Smeplass, S., Spangenberg, J., Jacobsen, S. "Rheology Modeling of Cement Paste with Manufactured Sand and Silica Fume: Comparing Suspension Models with Artificial Neural Network Predictions." *Construction and Building Materials*, vol. 317, 2022, p. 126114.
- [184] Adjoudj, M., Ezziane, K., Kadri, E. H., Ngo, T. T., Kaci, A. "Evaluation of Rheological Parameters of Mortar Containing Various Amounts of Mineral Addition with Polycarboxylate Superplasticizer." *Construction and Building Materials*, vol. 70, 2014, pp. 549-559.
- [185] Boukendakdji, O., Kenai, S., Kadri, E. H., Rouis, F. "Effect of Slag on the Rheology of Fresh Self-Compacted Concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, pp. 2593-2598.
- [186] Türk, E., Karatas, M., and Dener, M. "Rheological, Mechanical, and Durability Properties of Self-Compacting Mortars Containing Basalt Powder and Silica Fume." *Construction and Building Materials*, vol. 356, 2022, p. 129229.
- [187] He, J., Cheng, C., Zhu, X., Li, X. "Effect of Silica Fume on the Rheological Properties of Cement Paste with Ultra-Low Water Binder Ratio." *Materials*, vol. 15, 2022, p. 554.

- [188] Mansour, M. S., and Ghernouti, Y. "Conception of an Eco-Friendly Cement Based on Natural Pozzolan for Improving Rheological Behavior of Concrete." *Journal of Building Materials and Structures*, vol. 7, 2020, pp. 130-139.
- [189] *ASTM C90-16*. "Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units." ASTM International, 2016.
- [190] Meyyappan, P. L., Amuthakannan, P., Sutharsan, R., Ahamedazik, M. A. "Utilization of M-Sand and Basalt Fiber in Concrete: An Experimental Study on Strength and Durability Properties." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 561, 2019, p. 012035.
- [191] Basha, S. A., Kumar, A. V., Tej, S. A., Mohan Babu, C. G. "Evaluation of Zeolite as Supplementary Cementing Material." *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, 2023, pp. 1427-1439.
- [192] Sharmila, P., and Dhinakaran, G. "Compressive Strength, Porosity, and Sorptivity of Ultra-Fine Slag Based High-Strength Concrete." *Construction and Building Materials*, vol. 120, 2016, pp. 48-53.
- [193] Malhotra, D. M., and Carrette, G. G. "Performance of Concrete Incorporating Limestone Dust as Partial Replacement for Sand." *ACI Structural Journal*, vol. 3, 1985, pp. 363-371.
- [194] Anitha-Selva, S. S. D., Gayathri, R., and Swathi, G. "Experimental Investigation on Quarry Dust Concrete with Chemical Admixture." *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, vol. 2, 2013, pp. 91-94.
- [195] Maheshbabu, V., Devi, B. A., and Maheshbabu, B. "Experimental Analysis on Strength and Durability of Concrete with Partial Replacement of Natural Zeolite and Manufactured Sand." *International Journal of Advanced Research and Development*, vol. 4, 2019, pp. 1-6.
- [196] Imamoto, K., and Arai, M. "Specific Surface Area of Aggregate and Its Relation to Concrete Drying Shrinkage." *Materials and Structures*, vol. 41, 2008, pp. 323-333.
- [197] Gedam, B. A., and Bhandari, N. A. "Influence of Supplementary Cementitious Materials on Shrinkage, Creep, and Durability of High-Performance Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 40, 2015, p. 15173.
- [198] Gesoglu, M., Güneyisi, E., Özbay, E. "Properties of Self-Compacting Concretes Made with Binary, Ternary, and Quaternary Cementitious Blends of Fly Ash, Blast Furnace Slag, and Silica Fume." *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, pp. 1847-1854.
- [199] Huo, X. S., Al-Omaishi, N., and Tadros, M. K. "Creep, Shrinkage, and Modulus of Elasticity of High-Performance Concrete." *ACI Structural Journal*, vol. 98, 2001.
- [200] *EN 1992-1-1: Eurocode 2*. "Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings." European Committee for Standardization, 2004.
- [201] *ASTM C1074-93*. "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method." ASTM International, 1993.
- [202] Ezziane, K., Kadri, E. H., Bougara, A., Bennacer, R. "Analysis of Mortars Long-Term Strength with Supplementary Cementitious Materials Cured at Different Temperatures." *ACI Structural Journal*, vol. 107, 2010, pp. 323-331.

- [203] Didouche, Z., Ezziane, K., and Kadri, E. H. "Predicted of Hydration Heat and Compressive Strength of Limestone Cement Mortar with Different Types of Superplasticizer." *Advances in Concrete Construction*, vol. 6, 2018, pp. 659-677.