

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Draïa - Adrar

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences et de la Technologie



THESE DE DOCTORAT LMD

Filière : Génie civil

Spécialité : Génie civil

Présentée et soutenue publiquement par :

Mr : **MOULAY ALI Abderrahmane**

Le : 25/05/2021

Thème

Caractérisations des bétons élaborés dans les zones arides. Vers une formulation optimale laboratoire/chantier

MEKERTA Belkacem	Pr	Université d'Adrar	Président
KHELAFI Hamid	Pr	Université d'Adrar	Rapporteur
MOULI Mohamed	Pr	Université ENPOran	Examineur
SEMCHA Abdélaziz	Pr	Université d'Adrar	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

Je dédie cette thèse :

À la mémoire de mon père,

À ma mère pour son amour inestimable, son sacrifice, sa confiance, son soutien et toutes les valeurs qu'elle a su m'inculquer.

À ma femme et mes enfants : Nessrine, Moulay Ahmed et Sidi Mohammed Cherif, les plus grandes sources de mon bonheur.

À mon cher frère Ismail et mes sœurs

A tous mes amis.

Remerciements

Mes remerciements s'adressent à mon encadreur Mr Hamid KHELAFI, Professeur à l'université d'Adrar et responsable de notre formation doctorale, pour avoir accepté de diriger ce travail durant ces cinq années de thèse. Son soutien, sa compétence, son enthousiasme, sa disponibilité et sa clairvoyance m'ont été d'une aide inestimable.

Par ailleurs, je remercie Mr M'hammed ABDELJALIL MAA à l'université d'Adrar, pour le temps qu'il m'a consacré au suivi efficace de mon travail pendant mes essais, pour son expérience scientifique, ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité et sa contribution à la rédaction de l'article.

J'adresse mes grands remerciements aux membres du jury de ma soutenance : Mr MEKERTA Belkacem, Professeur à l'université d'Adrar de m'avoir fait l'honneur de présider le jury, Mr SEMCHA Abdélaziz, Professeur à l'université d'Adrar et Mr MOULI Mohammed, Professeur à l'ENPO d'Oran, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je voudrais également remercier les ingénieurs : Mrs YAICHI Abdelkrim, HOUTIA Abderrahim et SOULAIMANI Yassine, de m'avoir ouvert les portes du laboratoire MDC et MDS de l'université d'Adrar.

Mes remerciements vont aussi à tous les responsables et le personnel des laboratoires, qui ont participé indirectement ou directement au bon déroulement et à la continuité de ce travail de recherche à savoir :

- Laboratoire LTPS, unités de Ghardaïa et d'Adrar ;
- Laboratoire de chimie, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen ;
- Laboratoire de chimie, Cimenterie LAFARGE de Ogaz, Sig, Mascara ;
- Laboratoire des matériaux, Cimenterie STG Aoulef Adrar.

Je voudrais remercier mes collègues, M'hammed TAIBI, Djelloul BELHADJ AISSA, Fateh BELAOUT et Hafsa LAAMOURI.

Enfin, je voudrais exprimer mes plus profonds remerciements à ma mère, à ma chère femme qui m'ont encouragé à terminer cette thèse, à mes enfants, à mon frère et mes sœurs et à toute ma grande famille pour leur soutien constant, leur patience et leur encouragement tout au long de ces années de thèse.

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Liste des figures et photos.....	vi
Liste des tableaux.....	ix
Résumé.....	1
الملخص	2
Abstact.....	3
Liste des notations.....	4
Introduction générale.....	6

Chapitre 1: État de l'art sur l'élaboration du béton et ses méthodes de formulation

1.1.Introduction	9
1.2.Notion et climat de la zone d'étude (wilaya d'Adrar).....	9
1.3.Le bétonnage en zone aride	11
1.4.L'influence de climat chaud sur les propriétés du béton frais et durci	12
1.4.1.Influences sur le béton frais	12
1.4.1.1.La température du béton.....	12
1.4.1.2.La consistance du béton	13
1.4.1.3.Le temps de prise	14
1.4.2.Influences du temps chaud sur le béton durci	14
1.4.2.1.Retrait plastique	15
1.4.2.2.La résistance mécanique à la compression.....	16
1.5.Qualités essentielles d'un béton élaboré en zone aride	17
1.6.Méthodes de formulation des bétons.....	17
1.6.1.Méthodes traditionnelles	17
1.6.1.1.Méthode de Féret (1892).....	18
1.6.1.2.Méthode de Fuller (1907).....	18
1.6.1.3.Méthode d'Abrams (1923).....	18
1.6.2.Méthode de Bolomey (1925)	18
1.6.3.Méthode de Caquot (1937).....	18
1.6.4.Méthode de Valette (1940).....	19
1.6.5.Méthode de Faury (1942).....	19
1.6.6.Méthode de Joisel (1952)	19
1.6.7.Méthodes françaises	19
1.6.7.1.Méthode de Dreux-Gorisse (1970).....	19
1.6.7.2.Méthode Baron et Lesage (1976).....	20
1.6.8.Méthode britannique (1988).....	21
1.6.9.Méthode américaine (1994)	21
1.6.10.Méthode de Baron et Olivier (1996)	22
1.7. La méthode de formulation proposée.....	23

1.8.Conclusion	24
----------------------	----

Chapitre 2: Caractérisation des matériaux étudiés et méthodologie

2.1.Introduction	26
2.2.Caractérisation des matériaux étudiés	26
2.2.1.Ciment STG	26
2.2.1.1.Caractéristiques physico- mécaniques du ciment STG	27
2.2.1.2.Compositions chimique et minéralogique du ciment STG	28
2.2.1.3.Résultats de la diffraction par les rayons X sur le ciment STG	28
2.2.1.4.Photo du microscope électronique à balayage	29
2.2.2.Eau de gâchage	30
2.2.3.Les granulats locaux.....	31
2.2.3.1.Les sables de dune étudiés	31
2.2.3.2.Situation géographique des dunes	31
2.2.3.3.Caractéristiques physiques des sables de dunes.....	32
2.2.3.4.L'analyse granulométrique des sables étudiés	32
2.2.3.5.Caractéristiques physiques des sables de dunes	34
2.2.3.6.Analyse granulométrique par tamisage	35
2.2.3.7.Les résultats de la diffraction des rayons X sur les sables de dune	35
2.2.3.8.Analyse chimique des sables de dunes	37
2.2.3.9.Photo du microscope électronique à balayage	37
2.2.4.Les sables concassés étudiés	39
2.2.4.1.Situation géographique des carrières des sables concassés	39
2.2.4.2.Caractéristiques physiques des sables concassés :	40
2.2.4.3.Analyse granulométrique par tamisage des sables concassés	41
2.2.4.4.Les résultats de la diffraction des rayons X sur les sables concassés	42
2.2.4.5.Analyse chimique des sables concassés	43
2.2.4.6.Photo du microscope électronique à balayage	43
2.2.5.Les graviers de différentes classes	44
2.2.5.1.Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers des carrières KI et KII.....	44
2.2.5.2.Analyse granulométrique par tamisage des graviers des carrières KI et KII	45
2.2.5.3.Caractéristiques chimiques des graviers des carrières KI et KII de la région Koussane : ..	46
2.2.5.4.Analyse par diffraction des rayons X (DRX) des graviers KI et KII	46
2.3.La correction du sable de dunes	47
2.3.1.Le sable corrigé	48
2.3.1.1.La masse volumique absolue des sables corrigés	48
2.3.1.2.Le module de finesse des sables corrigés.....	49
2.3.1.3.La granularité des sables corrigés	51
2.4.Conclusion	52

Chapitre 3: Formulation et caractérisations des bétons contenant du sable corrigé

3.1. Introduction	56
3.2. Calcul approché de la formulation des bétons	56
3.3. Plan expérimental	57
3.4. Étude de la formulation du béton	58
3.4.1. Étendue granulaire : (D _{max} =25mm)	58
3.4.1.1. Type de granulat : granulats Koussane I (KI)	58
3.4.1.1.1. La consistance ciblée : béton ferme (affaissement=4 cm et E/C=0.50).....	58
3.4.1.1.2. La consistance ciblée : béton plastique (affaissement=8 cm)	60
3.4.1.1.3. La consistance ciblée : béton très plastique (affaissement=11.5 cm)	61
3.4.1.2. Type de granulat : granulats Koussane II (KII)	62
3.4.1.2.1. La consistance ciblée : béton ferme (affaissement=4 cm et E/C=0.50).....	62
3.4.1.2.2. La consistance ciblée : béton plastique (affaissement=8 cm et E/C=0.55).....	63
3.4.1.2.3. La consistance ciblée : béton très plastique (affaissement=11.5 cm et E/C=0.52).....	64
3.4.2. Étendue granulaire : (D _{max} =15mm)	65
3.4.2.1. Type de granulat : granulats Koussane I (KI)	65
3.4.2.1.1. La consistance ciblée : béton ferme (affaissement=4 cm et E/C=0.46).....	65
3.4.2.1.2. La consistance ciblée : Béton plastique (affaissement=8 cm et E/C=0.51).....	66
3.4.2.1.3. La consistance ciblée : béton très plastique (affaissement=11.5 cm et E/C=0.48).....	67
3.4.2.2. Type de granulat : granulats Koussane II (KII)	68
3.4.2.2.1. La consistance ciblée : béton ferme (affaissement=4 cm et E/C=0.46).....	68
3.4.2.2.2. La consistance ciblée : béton plastique (affaissement=8 cm et E/C=0.51).....	69
3.4.2.2.3. La consistance ciblée : béton très plastique (affaissement=11.5 cm et E/C=0.48)	70
3.5. L'influence du sable corrigé sur le rapport G/S.....	71
3.5.1. Étendue granulaire 25 mm.....	71
3.5.1.1. Béton granulats KI.....	71
3.5.1.2. Béton granulats KII.....	73
3.5.2. Étendue granulaire 15 mm.....	74
3.5.2.1. Granulats Koussane I.....	74
3.5.2.2. Granulats Koussane II.....	75
3.6. Caractéristiques et résultats des bétons à l'état frais	77
3.6.1. L'affaissement au cône d'Abrams	77
3.6.2. La masse volumique du béton à l'état frais.....	78
3.7. Confection des éprouvettes.....	78
3.7.1. Remplissage des moules.....	78
3.7.2. Mise en place du béton.....	78
3.7.3. Conservation des éprouvettes.....	78
3.7.3.1. Conservation avant démoulage.....	78
3.7.3.2. Conservation après démoulage.....	78
3.8. Caractérisation du béton à l'état durci.....	79
3.8.1. La masse volumique apparente.....	79
3.8.2. Essai de résistance à la compression.....	79
3.9. Résultats et discussion.....	79

3.9.1. Résultats des bétons à l'état frais.....	79
3.9.1.1. L'affaissement des bétons à l'état frais.....	79
3.9.1.1.1. Étendue granulaire $D_{max}=25mm$	79
a. Bétons avec les granulats Koussane I.....	79
b. Bétons avec les granulats Koussane II.....	81
3.9.1.1.2. Étendue granulaire $D_{max}=15mm$	82
a. Bétons avec les granulats Koussane I.....	82
b. Bétons avec les granulats Koussane II.....	84
3.9.1.2. La masse volumique du béton à l'état frais.....	85
3.9.1.2.1. Étendue granulaire ($D_{max}=25mm$).....	85
a. Type de granulat : granulats Koussane I.....	85
b. Type de granulat : granulats Koussane II.....	86
3.9.1.2.2. Étendue granulaire ($D_{max}=15mm$).....	87
a. Type de granulat : granulats Koussane I.....	87
b. Type de granulat : granulats Koussane II.....	88
3.9.2. Résultats des bétons à l'état durci.....	89
3.9.2.1. La résistance mécanique à la compression.....	89
3.9.2.1.1. Étendue granulaire $D_{max}=25mm$	89
a. Mode de conservation à l'extérieur du laboratoire.....	89
Granulats Koussane I.....	90
Granulats Koussane II.....	90
b. Mode de conservation à l'intérieur du laboratoire.....	91
Granulats Koussane I.....	91
Granulats Koussane II.....	92
c. Mode de conservation dans l'eau.....	93
Granulats Koussane I.....	93
Granulats Koussane II.....	94
3.9.2.1.2. Étendue granulaire $D_{max}=15mm$	95
a. Granulats Koussane I.....	95
b. Granulats Koussane II.....	96
3.9.2.2. La masse volumique des bétons à l'état durci.....	97
3.9.2.2.1. Étendue granulaire $D_{max}=25mm$	97
a. Granulats Koussane I.....	97
b. Granulats Koussane I.....	98
3.9.2.2.2. Étendue granulaire $D_{max}=15mm$	100
a. Granulats Koussane I.....	100
b. Granulats Koussane I.....	101
3.10. L'influence de la masse volumique des bétons à l'état durci sur la résistance à la compression.....	102
3.10.1. Granulats Koussane I ($D_{max}=25mm$).....	102
3.10.2. Granulats Koussane II ($D_{max}=25mm$).....	103
3.10.3. Granulats Koussane I ($D_{max}=15mm$).....	104
3.10.4. Granulats Koussane II ($D_{max}=15mm$).....	104
3.11. Conclusion.....	105

Sommaire

Conclusion générale	108
Références bibliographiques	113
Travaux scientifiques du doctorant.....	120
Annexes.....	122

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Répartition spatiale des températures maximales absolues du mois d’Août.....	11
Figure 1.2. Variation annuelle de la température et de l’humidité relative dans les zones arides..	11
Figure 1.3. La température du béton frais en fonction de celles de ses constituants.....	14
Figure 1.4. Effet de la température sur l’affaissement des bétons.....	14
Figure 1.5. Évolution de l’affaissement au cône d’Abrams en fonction de la température.....	15
Figure 1.6. Évolution du temps de prise du béton en fonction de la température.....	15
Figure 1.7. Variation du retrait plastique d’un béton exposé à HR=25% et à vitesse du vent de 15km/h.....	16
Figure 1.8. Illustration de la formation des fissures du retrait plastique.....	16
Figure 1.9. Évolution de la résistance en fonction de l’augmentation de la teneur en eau.....	17
Figure 1.10. Résistance à la compression des éprouvettes de béton préparées sous une température de coulage variable.....	18
Figure 1.11. Schéma de principe de la courbe granulométrique de référence, selon Dreux.....	21

Chapitre 2

Figure 2.1. Résultats DRX du ciment STG.....	30
Figure 2.2. Courbes granulométriques des sables de dunes.....	34
Figure 2.3. Courbes granulométriques des sables de dune et les courbes de références.....	36
Figure 2.4. Résultats de DRX de SD MA.....	37
Figure 2.5. Résultats de DRX de SD MI.....	37
Figure 2.6. Résultats de DRX de SD ON.....	38
Figure 2.7. Courbes granulométriques des sables concassés.....	42
Figure 2.8. Résultats DRX de SC KI.....	43
Figure 2.9. Résultats DRX de SC KII.....	43
Figure 2.10. Courbes granulométriques des graviers G KI et G KII.....	47
Figure 2.11. Module de finesse des sables de dunes corrigés avec le sable concassé KI.....	52
Figure 2.12. Module de finesse des sables de dunes corrigés avec le sable concassé KII.....	52
Figure 2.13. Les courbes granulométriques des SD corrigés avec le SC KI.....	53
Figure 2.14. Les courbes granulométriques des SD corrigés avec le SC KII.....	53

Chapitre 3

Figure 3.1. Organigramme des bétons étudiés (Dmax=25mm)	58
Figure 3.2. Organigramme des bétons étudiés (Dmax=15mm)	59

Figure 3.3. Proportions des mélanges du béton avec granulats KI et sables corrigés.....	60
Figure 3.4. Proportions des mélanges du béton avec granulats KI et sables corrigés.....	61
Figure 3.5. Proportions des mélanges du béton avec granulats KI et sables corrigés.....	62
Figure 3.6. Proportions des mélanges du béton avec granulats KII et sables corrigés.....	63
Figure 3.7. Proportions des mélanges du béton avec granulats KII et sables corrigés.....	64
Figure 3.8. Proportions des mélanges du béton avec granulats KII et sables corrigés.....	65
Figure 3.9. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KI et des sables corrigés (E/C=0,46 ; Dmax=15mm)	67
Figure 3.10. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KI et des sables corrigés (E/C=0,51 ; Dmax=15mm)	68
Figure 3.11. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KI et des sables corrigés (E/C=0,48 ; Dmax=15mm)	69
Figure 3.12. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KII et des sables corrigés (E/C=0,46 ; Dmax=15mm)	70
Figure 3.13. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KII et des sables corrigés (E/C=0,51 ; Dmax=15mm)	71
Figure 3.14. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KII et des sables corrigés (E/C=0,48 ; Dmax=15mm)	72
Figure 3.15. L'influence de taux de sable de dunes sur le rapport G/S (B KI, Dmax=25mm)	73
Figure 3.16. L'influence de taux de sable de dunes sur le rapport G/S (B KII, Dmax=25mm)	75
Figure 3.17. L'influence de taux de sable de dunes sur le rapport G/S (B KI, Dmax=15mm)	76
Figure 3.18. L'influence de taux de sable de dunes sur le rapport G/S (B KI, Dmax=15mm)	77
Figure 3.19. L'affaissement des bétons avec les granulats Koussane I (Dmax=25mm)	81
Figure 3.20. L'affaissement des bétons avec les granulats Koussane II (Dmax=25mm)	83
Figure 3.21. L'affaissement des bétons avec les granulats Koussane I (Dmax=15mm)	84
Figure 3.22. L'affaissement des bétons avec les granulats Koussane II (Dmax=15mm)	86
Figure 3.23. La résistance à la compression et la masse volumique des bétons avec granulats Koussane I et SD (Dmax=25mm)	103
Figure 3.24. La résistance à la compression et la masse volumique des bétons avec granulats Koussane II et SD (Dmax=25mm)	104
Figure 3.25. La résistance à la compression et la masse volumique des bétons avec granulats Koussane I et SD (Dmax=15mm)	105
Figure 3.26. La résistance à la compression et la masse volumique des bétons avec granulats Koussane II et SD (Dmax=15mm)	106

Liste des photos

Chapitre 2

Photo 2.1. Image par satellite présente la localisation de la cimenterie STG.....	28
Photo 2.2. Photos MEB du ciment STG.....	30
Photo 2.3. Image de satellite des dunes étudiés (région de Bouda, Adrar)	32
Photo 2.4. Photos MEB de SD MA.....	39
Photo 2.5. Photos MEB de SD MI.....	39
Photo 2.6. Photos MEB de SD ON.....	40
Photo 2.7. Plan de situation des carrières Koussane I et Koussane II.....	41
Photo 2.8. Photos MEB de SC KI.....	44
Photo 2.9. Photo MEB de SCK II.....	45

Chapitre 3

Photos 3.1. Mesure de l'affaissement avec le cône d'Abrams.....	78
--	----

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1. La cimenterie STG d'Adrar.....	28
Tableau 2.2. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment STG.....	28
Tableau 2.3. Composition chimique du ciment STG.....	29
Tableau 2.4. Composition minéralogique du ciment STG.....	29
Tableau 2.5. Résultats DRX du ciment STG.....	29
Tableau 2.6. Résultats d'analyse physico-chimiques de l'eau utilisée (ANRH d'Adrar)	31
Tableau 2.7. Résultats de paramètres de pollution de l'eau utilisée (ANRH d'Adrar)	31
Tableau 2.8. Résultats des minéralisations globales de l'eau utilisée (ANRH d'Adrar)	31
Tableau 2.9. Caractéristiques physiques des sables de dunes.....	33
Tableau 2.10. Caractéristiques physiques des sables de dune.....	35
Tableau 2.11. Résultats de DRX des sables de dune.....	37
Tableau 2.12. Résultats d'analyse chimique des sables de dunes.....	38
Tableau 2.13. Caractéristiques physiques des sables concassés.....	41
Tableau 2.14. Résultats de DRX des SC KI et SC KII.....	43
Tableau 2.15. Résultats d'analyse chimique des sables concassés.....	44
Tableau 2.16. Caractéristiques physico-mécaniques des graviers KI et KII.....	45
Tableau 2.17. Caractéristiques chimiques des graviers KI et KII.....	48
Tableau 2.18. Résultats de DRX des graviers KI et KII.....	55
Tableau 2.19. Propositions des sables corrigés étudiés.....	49
Tableau 2.20. Masse volumique absolue en (g/cm^3) des SD et SC KI.....	49
Tableau 2.21. Module de finesse des sables de dunes et des deux sables concassés.....	51

Chapitre 3

Tableau 3.1. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane I et les sables de dunes ($C=390 \text{ kg}/\text{m}^3$)	60
Tableau 3.2. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane I et les sables de dunes ($C=380 \text{ kg}/\text{m}^3$)	61
Tableau 3.3. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane I et les sables de dunes ($C=425 \text{ kg}/\text{m}^3$)	62

Tableau 3.4. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane II et les sables de dunes (C=390 kg/m ³)	63
Tableau 3.5. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane II et sables de dunes (C=380 kg/m ³)	64
Tableau 3.6. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane II et les sables de dunes (C=425 kg/m ³)	65
Tableau 3.7. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane I et les sables de dunes (C=447.20 kg/m ³)	66
Tableau 3.8. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane I et des sables de dunes (C=436.80 kg/m ³)	67
Tableau 3.9. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane I et des sables de dunes (C=474.24 kg/m ³)	68
Tableau 3.10. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane II et des sables de dunes (C=447.20 kg/m ³)	69
Tableau 3.11. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane II et des sables de dunes (C=436.80 kg/m ³)	70
Tableau 3.12. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane II et des sables des dunes (C=474.24 kg/m ³)	71
Tableau 3.13. Le rapport G/S pour les bétons du granulat KI et SD (Dmax=25mm)	73
Tableau 3.14. Le rapport G/S pour les bétons du granulat KII et SD (Dmax=25mm)	74
Tableau 3.15. Le rapport G/S pour les bétons du granulat KII et SD (Dmax=15mm)	75
Tableau 3.16. Le rapport G/S pour les bétons du granulat KII et SD (Dmax=15mm)	77
Tableau 3.17. L'affaissement au cône d'Abrams des bétons KI à l'état frais.....	81
Tableau 3.18. L'affaissement au cône d'Abrams des bétons KII à l'état frais.....	82
Tableau 3.19. L'affaissement au cône d'Abrams des bétons KI (Dmax=15mm)	84
Tableau 3.20. L'affaissement au cône d'Abrams des bétons KII (Dmax=15mm)	85
Tableau 3.21. La masse volumique des bétons à l'état frais KI (Dmax=25mm)	87
Tableau 3.22. La masse volumique des bétons à l'état frais KII (Dmax=25mm)	88
Tableau 3.23. La masse volumique des bétons à l'état frais KI (Dmax=15mm)	89
Tableau 3.24. La masse volumique des bétons à l'état frais KII (Dmax=15mm)	90
Tableau 3.25. Résultats de la résistance à la compression des bétons KI (à l'extérieur du laboratoire)	91
Tableau 3.26. Résultats de la résistance à la compression pour les bétons KII (à l'extérieur du laboratoire)	92

Liste des tableaux

Tableau 3.27. Résultats de la résistance à la compression pour les bétons KI (à l'intérieur du laboratoire)	93
Tableau 3.28. Résultats de la résistance à la compression pour les bétons KII (à l'intérieur du laboratoire)	94
Tableau 3.29. Résultats de la résistance à la compression des bétons KI (dans l'eau)	95
Tableau 3.30. Résultats de la résistance à la compression pour les bétons KI (dans l'eau)	96
Tableau 3.31. Résultats de la résistance à la compression des bétons KI.....	97
Tableau 3.32. Résultats de la résistance à la compression des bétons KII.....	98
Tableau 3.33. La masse volumique des bétons de granulats KI à l'état durci (Dmax=25mm)	99
Tableau 3.34. La masse volumique des bétons de granulats KII à l'état durci (Dmax=25mm)	100
Tableau 3.35. La masse volumique des bétons à l'état durci	101
Tableau 3.36. La masse volumique des bétons KII à l'état durci	102

Résumé :

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier, en premier lieu, les différentes compositions des bétons réalisés dans les chantiers pour la construction des bâtiments et ouvrages en béton armé dans la région d'Adrar, une zone réputée aride. Nous effectuons en second lieu, une série d'essais expérimentaux, au laboratoire, dans le but d'apporter des corrections aux formulations adoptées in situ. L'objectif ciblé est de présenter une formulation optimale en utilisant les matériaux locaux, en corrigeant la granularité du béton avec un mélange optimal de sable de dunes + sable concassé, ayant des impacts économiques et environnementaux.

Pour effectuer ce programme de recherche, nous avons réalisé une batterie d'essais sur plus de 2700 éprouvettes. L'utilisation de sable de dunes seul dans la composition d'un béton, peut créer des problèmes sur la continuité du mélange granulaire à cause de sa granularité qui est pauvre en grains supérieurs à 2mm et un module de finesse qui inférieur à 1,70. Ces caractéristiques influencent directement le comportement du béton aux états frais et durci, pour cela nous essayons de corriger la granularité du sable de dunes avec l'introduction d'un sable concassé (0/4) mm avec des taux compris entre 20% et 80%.

Nous avons conclu, après justification de nos résultats, que l'introduction de sable corrigé engendre une influence positive sur la consistance du béton ainsi que sur sa résistance à la compression. Les meilleurs résultats obtenus pour la résistance du béton à la compression correspondent aux taux de 20%, 40% et 60% de sable de dunes dans le sable corrigé.

Mots clés : Zone aride, Adrar, sable de dunes, sable concassé, sable corrigé, granularité, composition optimale, résistance mécanique, matériaux locaux.

المخلص:

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة، كمرحلة أولى قمنا بدراسة التركيبات المختلفة للخرسانة المشكّلة في مواقع البناء لتشييد المباني والهياكل الخرسانية المسلحة في المناطق الجافة، على سبيل المثال منطقة أدرار. ثانيًا، قمنا بإجراء سلسلة من التجارب المخبرية داخل المختبر، من أجل إجراء بعض التعديلات على التركيبات المعتمدة للخرسانة في مواقع البناء، بهدف الحصول على تركيبة مثالية للخرسانة باستخدام المواد المحلية.

لمعالجة عدم تواجد بعض الحبيبات في المزيج الحصى للخرسانة التي تعتمد على استعمال رمل الكثبان بصفة رئيسية، قمنا بمزج رمل الكثبان الطبيعي مع الرمال المكسرة المصنوعة في المحاجر. لتنفيذ برنامج البحث هذا، أجرينا مجموعة من الاختبارات على أكثر من 2700 عينة.

يمكن أن يؤدي استخدام رمل الكثبان بمفرده في تكوين الخرسانة إلى حدوث مشاكل في استمرارية الخليط الحبيبي بسبب رداءة توزيع حبيبات رمل الكثبان، وعدم توفر الحبيبات التي يزيد قطرها عن 2 مم، فضلاً على أن معامل النعومة لرمال الكثبان أقل من 1.70، تؤثر هذه الخصائص بشكل مباشر على سلوك الخرسانة في الحالة الطازجة والمتصلبة، لذلك نحاول تصحيح حبيبات رمال الكثبان بإدخال الرمل المسحوق (4/0) مم بمعدل يتراوح بين 20% و 80%.

من خلال النتائج المحصل عليها، خلصنا إلى أن إدخال الرمل المصحح في تركيبة الخرسانة له تأثير إيجابي على لدونة الخرسانة وكذلك على قدرة مقاومتها للانضغاط. أفضل النتائج التي تم الحصول عليها مخبرياً لاختبار مقاومة الخرسانة للانضغاط بعد 28 يوم، متوافقة مع النسب 20% و 40% و 60% من رمل الكثبان الرملية في الرمل المصحح.

الكلمات المفتاحية: المناطق الجافة، ادرار، رمل الكثبان، الرمل المكسر، الرمل المصحح، توزيع الحبيبات، التركيبة المثالية، المقاومة

الميكانيكية، المواد المحلية.

Abstract:

The main objective of this thesis is to study the various compositions of concretes carried out in the building sites for the construction of the buildings and works out of concrete reinforced in the area of Adrar, a zone considered arid.

In the second place, we carry out a series of experimental tests in the laboratory to bring corrections to the formulations adopted in situ. The objective is to present an optimal formulation using local materials, correcting the concrete's granularity with an optimal mixture of dune sand and crushed sand, with economic and environmental impacts.

To carry out this research program, we have carried out a series of tests on 2700 specimens. The use of dune sand alone in the composition of concrete can create problems on the granular mixture's continuity because of the granularity of dune sand that is poor in grain greater than 2mm, and the modulus of fineness is less than 1.70. These characteristics directly influence concrete behavior in fresh and hardened states, so we try to correct the granularity of dune sand with the introduction of crushed sand (0/4) mm with a ratio between 20% and 80%. After justification of our results, we concluded that the introduction of corrected sand has a positive influence on the consistency of concrete and its compressive strength.

The best results obtained for the compressive strength of concrete correspond to the ratios of 20%, 40%, and 60% of dune sand in the corrected sand.

Keywords: Arid zone, Adrar, dune sand, crushed sand, corrected sand, granularity, optimal formulation, mechanical strength, local materials

Liste des notations

SD : Sable de dunes

SC : Sable concassé

G : Gravier

MA : El Mansour

MI: Mimoune

ON: Ouaienna

BO: Ben Oumer

BA: Bakhalla

BD : Ben Draou

KI : Koussane I

KII : Koussane II

F : Ferme

P : Plastique

TP : Très plastique

FA: Granulats fins ($\leq 4\text{mm}$)

CA1: Gravier 3/8

CA2: Gravier 8/15

CA3: Gravier 15/25

B : Béton

DRX : Diffraction des Rayon X

MEB : Microscope Électronique à Balayage

IN : Intérieur

EX : Extérieur

SE : Sous l'eau (dans l'eau)

STG : Sidi Moussa Travaux Généraux

LTPS : Laboratoire des Travaux Publics de Sud

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

Introduction générale

Introduction générale

Chaque année, plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés dans le monde. Le béton, comme matériau de construction, est le plus utilisé dans la construction, il permet de réaliser des prouesses technologiques telles que les barrages, ponts, immeubles, tunnels, centrales nucléaires...etc. Son intérêt vient de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance à la compression, sa durabilité, son faible coût et d'autres qualités. Les origines du béton de terre remontent à la plus haute antiquité, mais c'est au XXème siècle que l'utilisation du béton se généralise aux dépens de l'acier et de la maçonnerie. Aujourd'hui, le béton doit répondre à un ensemble de spécifications très précises qui sont la rhéologie, la résistance au jeune âge, les aspects de parement, la résistance à 28 jours, la durabilité...etc.

L'Algérie possède une grande partie de sa superficie caractérisée par des climats chauds. Les normes utilisées pour la fabrication des différents types de béton dans ces régions sont des normes dépassées et ne conviennent pas souvent aux climats des zones arides car elles ont été conçues pour d'autres climats (normes françaises, normes appliquées au Nord de l'Algérie). Des précautions doivent donc être prises quand il s'agit de construire avec du béton dans les régions désertiques.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'étude des formulations du béton utilisées dans les zones arides, nous prenons l'exemple de notre wilaya d'Adrar qui se situe au Sud de l'Algérie.

D'après nos premières visites et enquêtes effectuées dans plusieurs chantiers de cette région (Timimoune, Reggane, Aoulef, Adrar), nous avons constaté qu'il n'y avait pas une bonne maîtrise dans les choix des matériaux et dans les dosages des constituants du béton. Par conséquent, nous avons conclu que la majorité des compositions des bétons élaborées dans les chantiers ne se basent pas sur une composition optimale du mélange et elles sont non compatibles avec les conditions d'environnement souvent agressives dans cette zone aride.

Nous savons bien qu'il existe plusieurs méthodes de formulation du béton, et différents constituants qui donnent plusieurs types de béton comme la méthode de Faury, Dreux Gorisse...etc. C'est pour cette raison que le domaine de la recherche de formulations est

intéressant pour avoir un béton compatible avec le climat de cette région et avec un coût non excessif.

Le phénomène de dégradation rapide du béton peut être remarqué si le gradient de la chaleur est important. Une température variante entre 0°C et 58°C est souvent atteinte dans les zones arides. Le climat est très préjudiciable au béton depuis les premières heures de sa fabrication jusqu'à son durcissement après plusieurs mois, voire des années.

La sélection des constituants du béton, ses propriétés, la maniabilité du béton, ses caractéristiques à l'état frais, l'hydratation du liant utilisé...etc, tous ces paramètres peuvent être influencés par l'augmentation excessive de la chaleur dans ces régions.

L'objectif de ce travail est d'obtenir une composition optimale du béton ordinaire à base des matériaux locaux, économique et répondant à toutes les conditions du cahier de charge sur chantier. Ce travail de thèse décrit la démarche scientifique adoptée, présente les résultats obtenus d'identification des caractéristiques physiques chimiques et mécaniques des matériaux de construction locaux et analyse les résultats expérimentaux obtenus pour différents types de bétons élaborés. ce mémoire de thèse s'organise en trois chapitres :

Le premier chapitre présente un état de l'art sur l'élaboration du béton dans les zones arides et sur les méthodes de formulation du béton ainsi qu'à ses qualités essentielles à l'état frais et à l'état durci dans les climats chauds.

Dans le deuxième chapitre ; nous avons présenté une étude approfondie sur la caractérisation des matériaux étudiés et la méthodologie suivie de notre programme de recherche.

Le troisième chapitre donne un aperçu général sur l'étude de formulation de chaque type de béton et les proportions obtenues des différents mélanges. Nous avons effectué une large batterie d'essais expérimentaux où il a été question d'élaborer plusieurs mélanges (sable de dunes + sable concassé + agrégat), à différentes proportions pour à la fin analyser les résultats obtenus sur les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci avec une interprétation de chaque résultat.

Ce travail a été achevé par une conclusion générale de l'ensemble des résultats tout en suggérant de nouvelles perspectives de recherche.

Chapitre 1 :
État de l'art sur l'élaboration
du béton et ses méthodes de
formulation

1.1.Introduction

Les travaux de construction en béton sont influencés par le climat ambiant car ils sont exécutés en plein air. À cet égard, on considère les saisons froide et chaude comme critiques et on doit prendre les mesures qui s'imposent. Si les travaux doivent se prolonger d'automne en hiver sans restriction, il en résultera des dépenses supplémentaires. Il en va autrement du passage à la saison chaude. Il procure un allègement, car on peut à nouveau renoncer aux mesures supplémentaires et augmenter sensiblement les rendements. Toutefois les travaux de bétonnage ont cette particularité qu'ils posent aussi des problèmes en saison chaude. On sait que les températures élevées réduisent le temps pendant lequel le béton reste maniable. Mais il y a d'autres considérations dont il faut tenir compte dans l'établissement du programme des travaux. Si elles sont négligées, cela peut conduire à des défauts plus ou moins graves de l'ouvrage. Pour éviter le plus possible ces effets indésirables, nous pouvons utiliser d'autres solutions, comme le refroidissement d'eau de gâchage, la conservation des granulats à l'ombre, l'utilisation des adjuvants et éviter le bétonnage en plein soleil.

Les facteurs environnementaux, tels que la température ambiante élevée, la faible humidité, le vent chaud, affectent les propriétés du béton et les opérations de construction consistant à mélanger, transporter et mettre en place le béton. Dans ce chapitre, nous essayons d'étudier les effets indésirables de ces facteurs environnementaux sur les propriétés, aux états frais et durci, du béton.

1.2.Notions et climat de la zone d'étude (wilaya d'Adrar)

La zone aride couvre 2 millions de km² du territoire algérien. Les températures sont considérées comme étant élevées dans cette zone. La température excède les 50 °C, cela arrive régulièrement durant les mois chauds (Juin à Août) (figure 1.1). En hiver (décembre à Janvier), de très basses températures sont atteintes. L'humidité relative au Sahara est basse la plupart du temps [1].

La wilaya d'Adrar a un climat désertique chaud typique de la zone saharienne, au cœur du Sahara, avec un été très long et un hiver court, tempéré chaud [2].

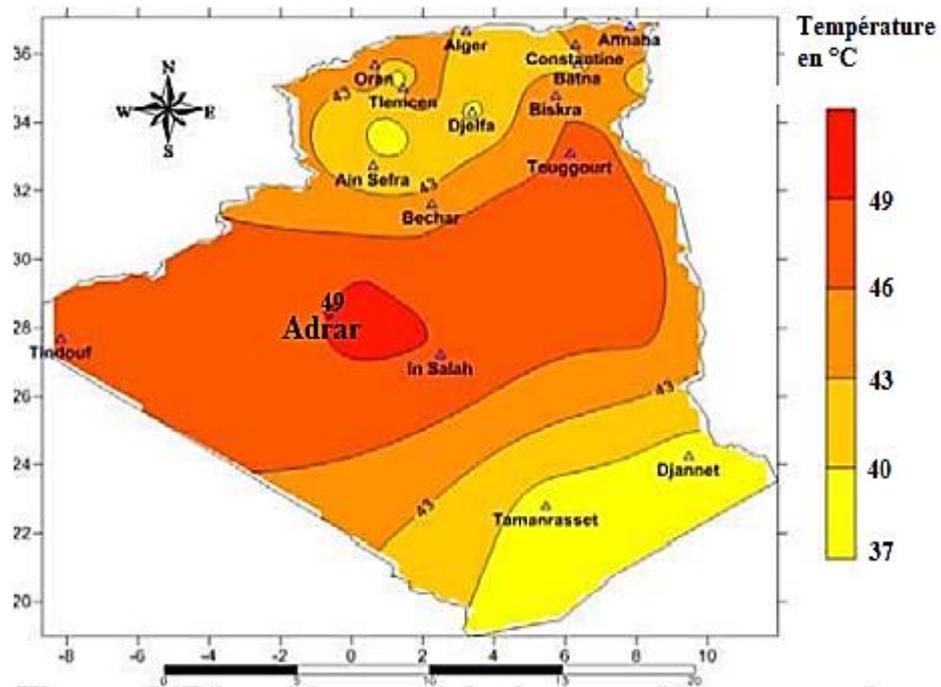


Figure 1.1. Répartition spatiale des températures maximales absolues du mois d’Août [3]

La région d’Adrar est comptée parmi les régions les plus chaudes du monde, en juillet (mois le plus chaud), les températures moyennes maximales varient entre 46 et 50 °C [4]. L’humidité relative est exceptionnellement faible toute l’année avec une moyenne annuelle d’environ 10 % (figure 1.2). Les précipitations annuelles ne dépassent les 15 mm [5].

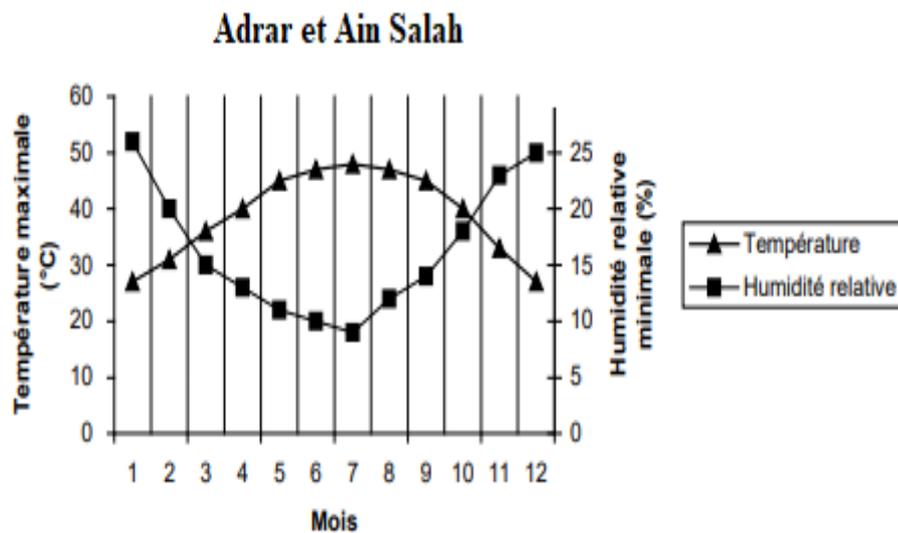


Figure 1.2. Variation annuelle de la température et de l’humidité relative dans les zones arides [6]

1.3. Le bétonnage en zone aride

À l'extrême Sud de l'Algérie, le Sahara est la région la plus grande étendue caractérisée par les facteurs de climat chaud. Le bétonnage dans un milieu aride engendre plusieurs problèmes néfastes sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci. Les réactions chimiques entre le ciment et l'eau influencent le comportement du béton, surtout lorsque la température élevée impliquera un court délai de prise, un durcissement plus rapide et un risque de fissuration au jeune âge [7][8].

Ils existent plusieurs facteurs pouvant entraîner l'élévation de la température dans le béton pendant la durée de durcissement, à savoir :

- La nature et les proportions des constituants ;
- Les conditions climatiques arides ;
- L'emplacement et le transport du béton sous une température élevée, une faible humidité ou un vent chaud.

Toutes ces conditions climatiques nécessitent une bonne maîtrise, pour éliminer et réduire les effets indésirables de ces facteurs sur les propriétés essentielles du béton et sur la manière de construire.

Le climat chaud introduit de nombreux problèmes dans la fabrication, la mise en place et le durcissement du béton qui peuvent avoir des effets négatifs sur les propriétés du béton durci et qui ne peuvent pas être rectifiées ultérieurement [9].

Les normes utilisées pour la production des différents types de béton sont, particulièrement, des normes européennes adaptées aux conditions différentes de celles des zones arides. Nous devons prendre des précautions rigoureuses quand il s'agit de construire avec du béton dans une zone aride [10].

Le bétonnage par temps chaud, c'est quand le béton est malaxé, transporté, et coulé sous une température ambiante élevée, à faible humidité et sous une radiation solaire ou exposée au vent. Ces phénomènes climatiques ont tendance à détériorer les qualités du béton aux états frais ou durci par la perte d'eau par évaporation ou par accélération de l'hydratation du ciment [11].

L'ACI 305 [12], n'impose aucune limite de température du béton, elle considère que le bétonnage par temps chaud est plus complexe pour être simplifié à la température de mise en place ou à la température de livraison.

Dans les pays du golf arabe, où la température annuelle à l'ombre est généralement comprise entre 10°C et 50°C, la température maximale du béton autorisée est habituellement entre 35°C et 38°C. Certains auteurs (El Rayyes) [13] considèrent le climat au golf arabe comme un climat extrêmement chaud.

1.4. Influence du climat chaud sur les propriétés du béton aux états frais et durci

Les facteurs environnementaux, tels que la température ambiante élevée, la faible humidité, la vitesse élevée du vent et le rayonnement solaire direct conduisent à une évaporation rapide de l'eau du béton frais. Cela a un effet négatif sur les propriétés du béton aux états frais et durci, ainsi que sur les opérations de construction consistant à mélanger, transporter et placer les matériaux en béton [14].

1.4.1. Influences sur le béton à l'état frais

Les mélanges de béton à l'état frais se rigidifient avec le temps, en particulier s'ils sont mélangés en continu. Cet effet de raidissement se traduit par un affaissement réduit et, par conséquent, ce phénomène est appelé « perte d'affaissement ». Dans des conditions météorologiques modérées, la rigidification du béton frais et ses affaissements, ne présentent pas de réels problèmes car en pratique, le béton reste réalisable longtemps et suffisamment pour permettre sa manipulation, à savoir son transport, sa mise en place, son compactage et sa finition, sans difficultés appréciables. Cependant et sous un climat chaud, cela peut ne pas être le cas, parce que le taux de raidissement et les pertes d'affaissement associées sont à la fois augmentés et les temps de prise initial et final des liants sont diminués avec l'augmentation de la température [15].

Nous mentionnons ci-dessous, les principaux effets du climat chaud, sur le béton :

1.4.1.1. La température du béton

Par temps chaud, la température du béton dépend de la somme des apports de température des différents composants [16]. Le diagramme présenté sur la figure 1.3, permet de déterminer l'influence de la température des composants sur la température du béton.

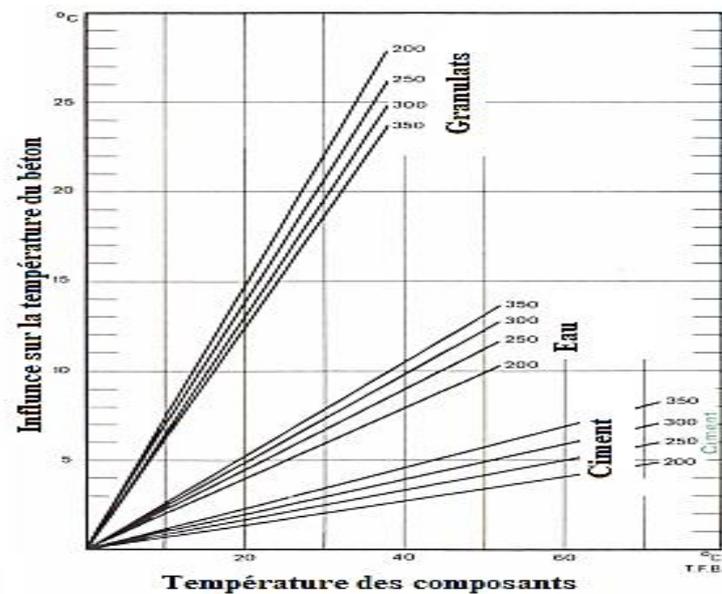


Figure 1.3. La température du béton frais en fonction de celles ses constituants [16]

1.4.1.2. La consistance du béton

La consistance du béton varie selon sa teneur en eau, la température et la teneur en fines. Les températures élevées et les conditions météorologiques chaudes provoquent spécifiquement une augmentation des températures du béton frais. Cela provoque une augmentation de la perte d'affaissement, une hydratation plus rapide qui en retour conduit à une prise accélérée et réduit la résistance à long terme du béton accompagnée d'un taux d'évaporation plus élevé [17][18].

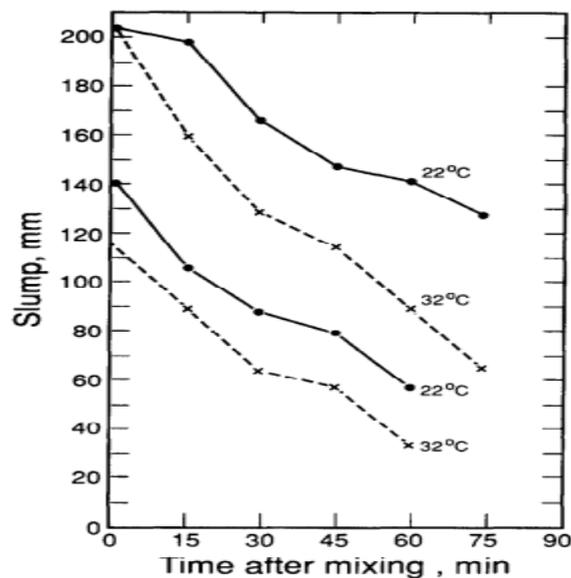


Figure 1.4. Effet de la température sur l'affaissement des bétons [19]

Selon (Mouret et al.) [20], un taux d'évaporation plus élevé du béton frais entraîne une réduction de la teneur en eau et par conséquent, un rapport eau/ciment plus faible, en plus d'une

réduction de la maniabilité du béton. Cela oblige à réagir avec l'ajout d'eau pour améliorer et restaurer la maniabilité ou un compactage déficient [21].

D'après Soroka et Ravina, [15], il ont mentionné que la perte d'affaissement est provoqué principalement par l'hydratation du ciment. Une éventuelle évaporation de l'eau de gâchage et dans certains cas, l'absorption d'eau par des agrégats secs, peuvent constituer des causes principales. Tous ces effets réduisent la quantité d'eau libre dans le mélange de béton frais. Par conséquent, la consistance du mélange diminue (figure 1.5).

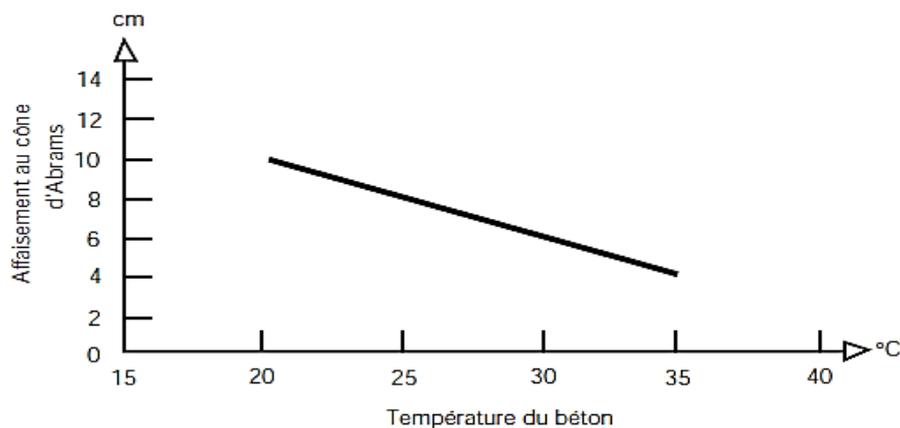


Figure 1.5. Évolution de l'affaissement au cône en fonction de la température [22]

1.4.1.3. Le temps de prise :

L'augmentation de la température accélère les réactions chimiques : la prise du ciment est plus rapide [22] (figure 1.6).

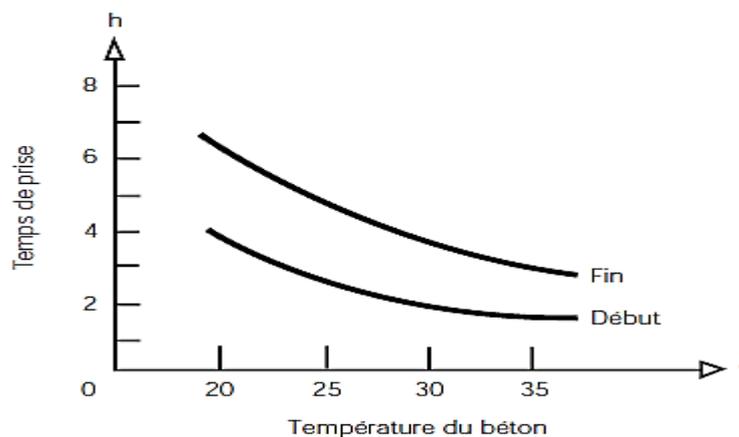


Figure 1.6. Évolution du temps de prise du béton en fonction de la température [22].

1.4.2. Influences du temps chaud sur le béton durci

Le temps chaud a plusieurs influences sur le béton durci, à savoir :

1.4.2.1. Retrait plastique

Le climat chaud et la grande surface libre de l'ouvrage provoquent une évaporation rapide d'eau de ressuage, ce qui va créer des vides entre les particules solides. Quand l'évaporation d'eau du béton à l'état plastique est très élevée, on va avoir une fissuration due au retrait plastique [23] (figure 1.7).

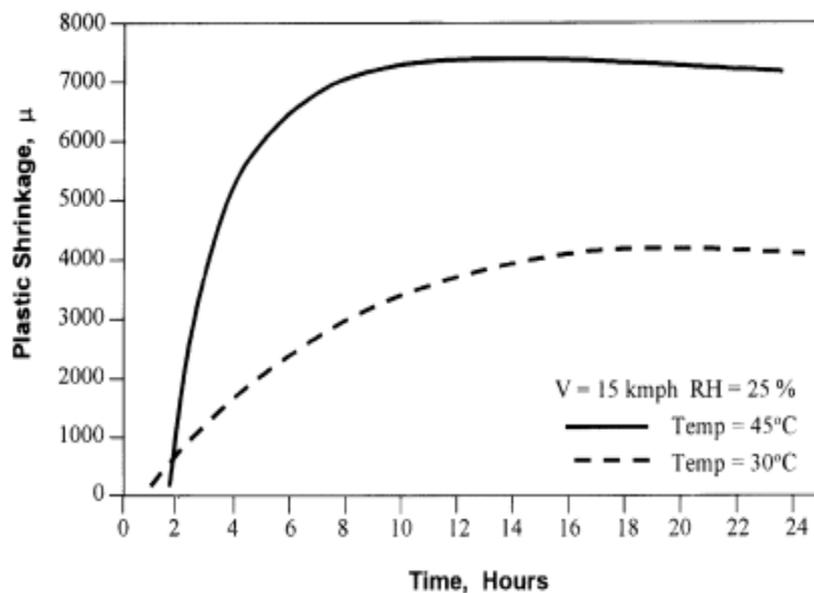


Figure 1.7. Variation du retrait plastique dans un béton exposé à HR=25% et à vitesse du vent de 15km/h [24]

Des fissures d'origine thermique sont susceptibles d'apparaître lors de la mise en place d'un élément mince (dalle, mur), particulièrement lors de temps chaud suivi d'un refroidissement rapide (nuit fraîche). Le potentiel de fissuration est accru dans les ouvrages de masse, conséquence de l'accélération du dégagement de la chaleur produite par l'hydratation du ciment [25].

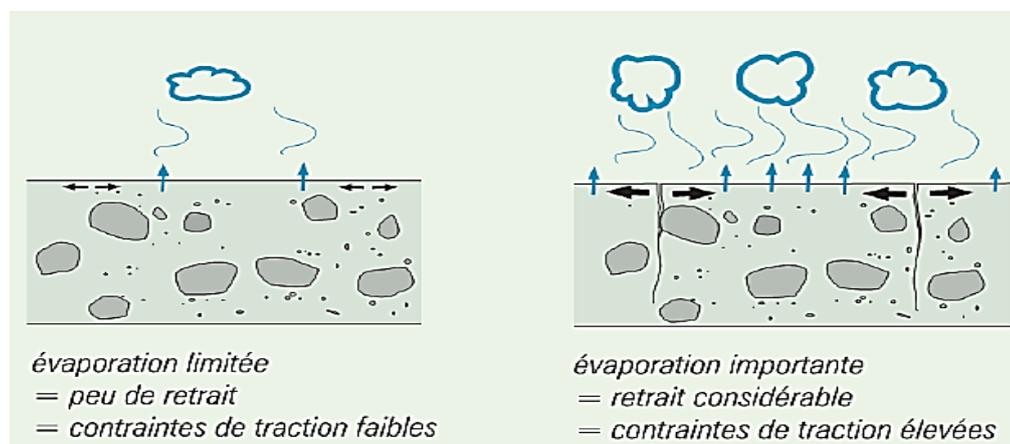


Figure 1.8. Illustration de la formation de fissures de retrait plastique [25]

1.4.2.2. La résistance mécanique à la compression

D'après Azzouz [26], le climat chaud à une grande influence sur la résistance à la compression du béton surtout à long terme. La résistance après 28 jours du béton est réduite à cause de l'accélération du durcissement, qui est influencée par l'accélération de l'hydratation du ciment. La diminution de la maniabilité est souvent compensée par une augmentation du rapport E/C [27][28][29]. La solution de rajouter de l'eau pour corriger la maniabilité doit être interdite car elle entraîne une baisse sensible de la résistance mécanique obtenue sur le béton à toutes les échéances [22] (Figure 1.9).

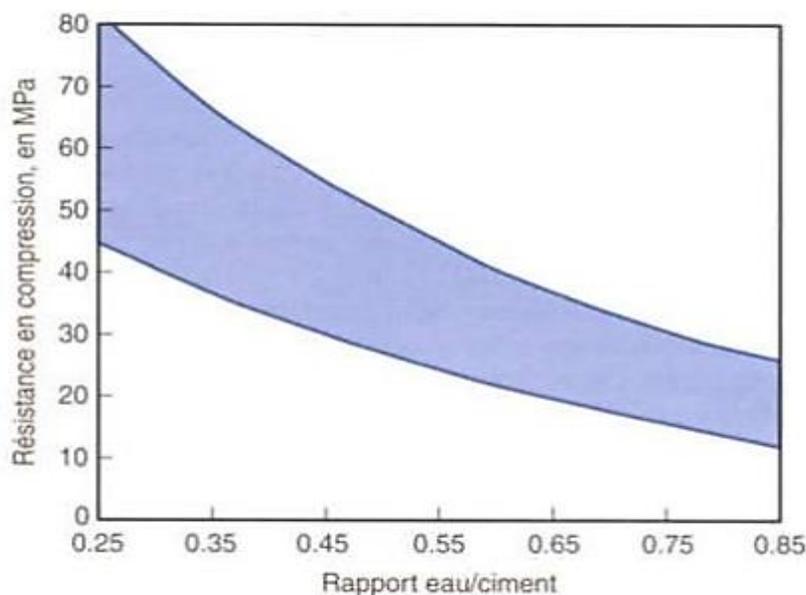


Figure 1.9. Résistance à 28 jours d'une gamme de rapports eau/ciment de bétons de ciment portland [22]

Le béton mis en place et mûri dans des conditions de températures élevées développe, à court terme, une forte résistance mécanique. Par contre, le gain de résistance entre le 7 et 28 jours s'avère plus faible que celui d'un même béton conservé à de basses températures. Les essais réalisés (figure 1.10), montrent ces écarts de résistance [30].

Nasir [31], a mentionné qu'à l'âge au-delà de 28 jours, la résistance à la compression augmentait avec l'élévation de la température jusqu'à 32 °C. Cependant, une nouvelle augmentation de la température supérieure à 35°C a diminué ces propriétés [32] (Figure 1.10).

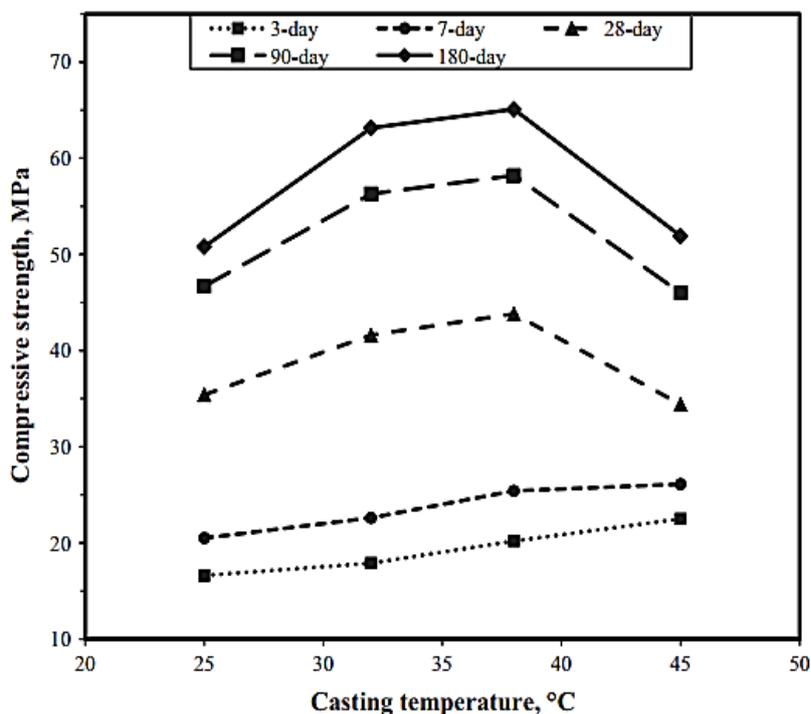


Figure 1.10. Résistance à la compression des échantillons de béton préparés sous une température de coulage variable [31].

1.5. Qualités essentielles d'un béton élaboré en zone aride

La connaissance de la qualité essentielle d'un béton est basée sur la maîtrise des caractéristiques des bétons aux états frais et durci, elle nécessite une meilleure compréhension des rôles joués par chacun de ses constituants ainsi que la connaissance de leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques [33].

1.6. Méthodes de formulation des bétons

Au cours de ces dernières années, le problème de la formulation des bétons a été toujours d'actualité. Les propriétés des bétons actuels, sont extrêmement variables, la formulation sera orientée vers les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés recherchées, avec l'utilisation des matériaux d'une ressource locale qui soit la plus économique [34].

1.6.1. Méthodes traditionnelles

Historiquement, les principes régissant les concepts de formulation commencent à se rationaliser à la fin du XIX^{ème} siècle [35].

1.6.1.1. Méthode de Féret (1892)

En 1892, Féret [36] à qui on attribue les premières recherches, travaille sur un principe de compacité optimale. Initialement, une compacité est déterminée sur un mélange ternaire de sables puis une matrice cimentaire y est insérée. Cette méthode donne un mortier avec une granularité discontinue sans obtenir le matériau le plus compact à l'état durci. Féret relie la résistance en compression aux proportions volumiques et notamment en utilisant le rapport volumique E/C. Où le coefficient de Féret est relatif à la nature du ciment et à l'âge du mortier [36].

1.6.1.2. Méthode de Fuller (1907)

En 1907, Fuller et Thompson [37], basent leur méthode sur une compacité maximale mais sur un mélange à granulométrie continue. L'aspect novateur de la méthode se situe dans la prise en compte du ciment mais aussi des dimensions extrêmes des grains d (plus petite dimension) et D (plus grande dimension). En revanche, la forme des grains n'intervient pas dans la méthode [37].

1.6.1.3. Méthode d'Abrams (1923)

En 1918, Abrams [38] définit empiriquement une méthode dans laquelle le dosage en ciment et la dimension maximale des granulats sont les paramètres prépondérants et fait intervenir au travers de K_{Abrams} ($K_{\text{Féret}}$ amélioré) la nature et la forme des granulats [38].

1.6.2. Méthode de Bolomey (1925)

Les étapes du principe de cette méthode sont les suivantes :

- Déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs ;
- Chercher les pourcentages de ces constituants pour faire un mélange sec dont la courbe de mélange est voisine de la courbe optimale ;
- Déduire la composition d'un mètre cube de béton [39, 40].

Cette méthode aboutit théoriquement, tout au moins, à une granularité continue.

1.6.3. Méthode de Caquot (1937)

Caquot [41] a proposé une approche théorique pour déterminer une courbe granulométrique quasi optimale, pour un mélange granulaire non borné (en termes de diamètres maximal et minimal), puis pour une étendue granulaire donnée. Cette approche néglige toutefois les conditions de mise en œuvre et la forme des granulats et fait des hypothèses fortes sur les interactions (effet de paroi et de desserrement) entre les grains [42].

1.6.4. Méthode de Valette (1940)

Valette [8] a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite, cependant, un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par «dosages des bétons à compacité maximale» ou «dosage des bétons à minimum de sable» ou encore «dosage des bétons à granularité discontinue» [8].

1.6.5. Méthode de Faury (1942)

En 1942, Faury[43] proposa, une nouvelle loi de granulation continue, qui est basée sur la détermination de la courbe optimale du mélange des éléments secs, et chercher à s'en rapprocher le plus possible. C'est le même principe que la méthode de Bolomey.

1.6.6. Méthode de Joisel (1952)

Cette méthode s'inspire, comme la méthode de Faury, de la théorie de Caquot, mais en la généralisant. Joisel [44] propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale, est fonction de m , avec m qui dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage, m peut alors varier de 3 à 10.

Joisel prend m comme échelle en abscisse, au lieu de $D/2$, ou m variant avec le serrage des matériaux. Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité. Toutefois, pour éviter la cassure de la droite de référence au point d'abscisse $D/2$, Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle $(D/2)/D$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode. En revanche, il faut employer un graphique dont l'échelle des abscisses est variable d'une échelle à l'autre, d'un type de granulat à un autre. C'est ensuite par une méthode graphique dont nous nous inspirons qu'on détermine les pourcentages des divers granulats [44].

1.6.7. Méthodes françaises :

1.6.7.1. Méthode de Dreux-Gorisse (1970)

Cette méthode [45] est de nature fondamentalement empirique, à la différence de la méthode Faury qui elle est antérieure et qui est basée sur la théorie de l'optimum granulaire de Caquot. Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants. En combinant les courbes granulaires obtenues, il a pu fonder une approche empirique pour

déterminer une courbe granulair de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi- logarithmique [46] (figure 1.11).

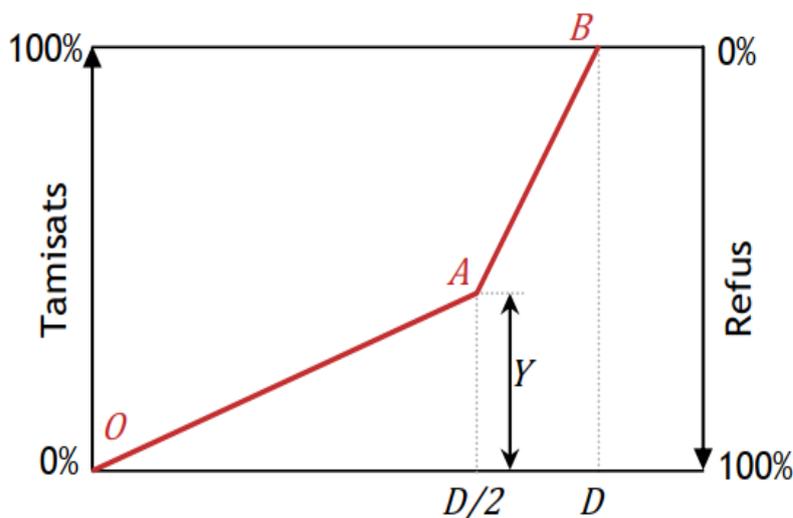


Figure 1.11. Schéma de principe de la courbe granulair de référence, selon Dreux [46]

Étapes successives de la méthode sont :

Étape 1 : Examen de la structure (dimensions, espacement entre armatures, enrobage...etc.).

Étape 2 : Détermination de la résistance à la compression.

Étape 3 : Sélection de la consistance du béton frais.

Étape 4 : Sélection de D_{max} .

Étape 5 : Calcul du dosage en ciment.

Étape 6 : Calcul de la quantité totale d'eau.

Étape 7 : Examen du sable ; il est soit accepté, soit rejeté (sur la base de sa propreté).

Étape 8 : Tracé de la courbe granulair de référence.

Étape 9 : Détermination du volume solide du mélange frais.

Étape 10 : Détermination des fractions granulaires.

La composition théorique est connue ; elle doit être testée sur des mélanges de laboratoire, et ajustée (si nécessaire) [45] [46].

1.6.7.2. Méthode Baron et Lesage (1976)

Cette méthode n'est pas en soi une méthode de formulation, mais plus une technique pour optimiser le squelette granulair d'un béton. L'essai est utilisé pour caractériser la maniabilité LCL (Laboratoire Centrale Lesage) [47].

Le principe est de mesurer le temps mis par un échantillon de béton pour s'écouler sous vibration jusqu'à un certain repère. Les proportions optimales des granulats sont supposées donner le temps d'écoulement minimum, pour une quantité donnée de ciment et d'eau. Une fois les proportions granulaires repérées, les dosages en eau et en ciment sont ajustés expérimentalement, de sorte que le mélange présente la maniabilité et la résistance souhaitées. On suppose, dans cette méthode, que les proportions optimales de granulats ne dépendent pas de la quantité de ciment. La méthode Baron Lesage a l'avantage de ne dépendre d'aucune formule ou table qui pourrait être suspectée de ne s'appliquer qu'à un certain type de matériau. De ce point de vue, elle peut être qualifiée de fondamentale et de scientifique. Par contre, la nécessité de réaliser un certain nombre de gâchées expérimentales, pour trouver les proportions optimales de granulats, est assez contraignante. La méthode devient surtout lourde quand plus de deux granulats doivent être proportionnés [34] [47].

1.6.8. Méthode britannique (1988)

La méthode britannique actuelle [48] est celle du ministère de l'environnement révisée en 1997.14.11 À l'instar de l'approche ACI [49], la méthode britannique reconnaît explicitement les exigences de durabilité dans la sélection du mélange. La méthode est applicable au béton de poids normal fabriqué avec du ciment Portland uniquement ou incorporant également du laitier de haut fourneau granulé au sol ou des cendres volantes sur le béton coulant ou le béton pompé ; il ne traite pas non plus le béton de granulats légers. Trois tailles maximales d'agrégats sont reconnues : 40, 20 et 10mm. Essentiellement, la méthode britannique consiste en 5 étapes, décrites comme suit [48] :

Étape 1 : Détermination du rapport E/C.

Étape 2 : Détermination de la quantité d'eau.

Étape 3 : Calcul de la quantité de ciment.

Étape 4 : Détermination de la masse totale de granulat.

Étape 5 : Détermination du rapport sable/(sable + gravillon).

1.6.9. Méthode américaine (1994)

Le pratique standard l'ACI 211.1-91 [49], décrit une méthode de sélection des proportions de mélange de béton contenant du ciment Portland seul ou avec d'autres matériaux cimentaires, et contenant également des adjuvants. Il convient de souligner que la méthode fournit une première approximation des proportions de mélange à utiliser dans les mélanges d'essai. Essentiellement, la

méthode de l'ACI 211.1-91 [49], consiste en une séquence d'étapes logiques et simples qui prennent en compte les caractéristiques des matériaux à utiliser. Ces étapes sont décrites comme suit [48] :

Étape 1 : Choix de l'affaissement.

Étape 2 : Choix de la dimension maximale de l'agrégat.

Étape 3 : Estimation de la teneur en eau et la teneur en air.

Étape 4 : Choix du rapport E/C.

Étape 5 : Calcul du dosage en ciment.

Étape 6 : Estimation du dosage en gros granulat.

Étape 7 : Estimation du dosage en granulats fins.

Étape 8 : Ajustement des proportions.

1.6.10. Méthode de Baron et Olivier (1996)

L'objectif consiste à déterminer une composition de béton répondant à des caractéristiques précises de résistance et d'ouvrabilité à partir des principes énoncés par Baron [50].

L'origine de la méthode revient à Baron, à partir des études expérimentales qu'il a réalisées dans les années 1970-1980 et qui ont été optimisées par la suite en utilisant les directives de la norme NF P 18-305, remplacée par la Norme européenne EN 206-1. En 1996, cette méthode est développée. Les expériences ont confirmé les travaux réalisés par Bolomey et Faury dont certaines formules ont été retenues en ce qui concerne les dosages en liant et en eau. Pour le dosage en granulats, ce sont, en partie, les travaux de Dreux qui ont été retenus. L'ensemble est complété par des résultats expérimentaux qui rendent la méthode aussi abordable que la méthode de Dreux sans avoir les inconvénients de sa limitation aux seuls bétons courants [50].

Les étapes successives de la méthode sont les suivantes :

Étape 1 : Détermination de la dimension maximale des granulats.

Étape 2 : Dosage optimal en fines en fonction de D.

Étape 3 : Dosage en eau efficace et la teneur prévisible en air.

Étape 4 : Détermination de résistances ciblées à partir des valeurs caractéristiques imposées.

Étape 5 : Valeurs des rapports E/C ou E/C+kA pour atteindre une résistance ciblée.

Étape 6 : Granularité optimale de l'ensemble solide.

Étape 7 : Respect des spécifications et des valeurs limitées.

1.7. La méthode de formulation proposée :

La méthode que nous avons choisie est la méthode pratique "Dreux-Gorisse". Cette méthode permet de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'un nombre limité d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

La méthode "Dreux-Gorisse" ne permet pas de prendre en compte les exigences de la résistance à la compression à une autre échéance que celle à 28 jours. Il existe toutefois une règle approximative donnant une relation entre la résistance à 7 jours et celle à 28 jours. La prévision de cette dernière est cependant assez bonne, bien qu'elle ne prenne pas en compte la présence d'additions minérales (comme les autres méthodes).

Concernant la méthode "Dreux-Gorisse", la détermination de la quantité de ciment à partir de la consistance est assez surprenante. En effet, comme le rapport C/E est déjà connu, le dosage en eau pourrait être déterminé tout aussi bien par un abaque. Le point le plus intéressant de cette méthode réside dans la détermination des masses de granulats. Nous avons vu qu'il n'existe aucune courbe granulométrique optimale indépendante de la forme des grains. De plus, même si tous les granulats ont la même compacité résiduelle, la distribution selon "Dreux-Gorisse" n'apparaît pas comme la courbe optimale, du point de vue de la compacité et de l'indice de ségrégation. Par contre, se référer à une courbe granulaire de référence a l'avantage de faciliter la gestion de plusieurs fractions granulaires. Elle permet d'ailleurs, de détecter un risque de ségrégation provenant d'une classe manquante dans la courbe granulométrique générale.

1.8. Conclusion :

Les différentes méthodes de formulation des mélanges du béton, se basant sur les modèles qui relient la structure interne aux propriétés d'usage du béton, permet de déterminer une composition optimale répondant aux conditions de la réalisation. Toutes ces méthodes sont simples et elles n'impliquent aucun calcul complexe. La connaissance de l'influence de divers facteurs sur les propriétés du béton aux états frais et durci, doit être basée sur une compréhension du comportement du béton.

Le choix de la formulation d'un béton doit être basée sur des calculs préliminaires et suivi par plusieurs gâchées d'essais au niveau du laboratoire avant d'appliquer cette composition au chantier. La réussite de l'application de la formulation demande l'expérience, la connaissance de l'influence des nombreux paramètres sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci, et la compréhension du comportement du béton. Le premier mélange d'essai peut être satisfaisant et correctement ajusté pour obtenir les propriétés désirées, lorsque ces trois éléments, expérience, connaissances et compréhension sont tous présents.

Chapitre 2 :
Caractérisation des matériaux
étudiés et méthodologie

2.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons porté notre choix sur six types de sables de dunes, sur deux types des granulats concassés et sur un ciment composé fabriqué localement. L'identification des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques de ces matériaux locaux est indispensable avant d'étudier les différents bétons. Les constituants des bétons ordinaires, se limitent au minimum aux gravillon, sable, ciment et eau [51]. La qualité des constituants, en particulier les granulats, a une importante influence sur la qualité du béton obtenu, surtout lorsqu'ils occupent une grande partie du volume du béton. Pour des raisons économiques et environnementales, nous avons choisi des matériaux locaux dans la composition des bétons étudiés.

Les propriétés des granulats jouent un rôle très important sur les propriétés d'un béton : la distribution granulaire, la masse volumique, le module de finesse des sables roulé ou bien concassé, le taux des fines, le coefficient d'absorption...etc.

Pour obtenir une composition optimale du béton, il faut, à priori, bien connaître les différentes caractéristiques de ses composants (sable, gravier, ciment...etc.). Dans notre cas, nous avons sélectionné, de la région d'Adrar, plusieurs échantillons de sables de dunes et différentes classes granulaires et plusieurs carrières de granulats concassés. Pour arriver au bon choix des composants granulaires, nous avons effectué des essais de caractérisations physiques, mécaniques et chimiques de chaque type de granulats. D'après les résultats de ces essais, nous avons pu choisir les meilleurs constituants pour pouvoir justifier une composition optimale du béton étudié.

D'après Dupain et Saint-Arroman [52], le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'importance sur les qualités du béton.

Afin de pouvoir justifier une distribution granulaire continue et une compacité optimale du sable utilisé, selon les normes en vigueur, nous l'avons corrigé en mélangeant deux types de sables, à des taux variables de 0% à 100% ; le premier est un sable de dunes très fin, de diamètre compris entre 0 et 1.25 mm, de nature siliceuse, et le deuxième est un sable concassé, de diamètre compris entre 0 et 4 mm, de nature silico-calcaire.

2.2.Caractérisation des matériaux étudiés

2.2.1. Ciment STG :

Le ciment utilisé dans notre programme expérimental est le ciment STG (Sidi Moussa Travaux Généraux) d'Adrar. C'est un ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42,5N [53],

provenant de la cimenterie de Sidi Moussa située à 35 km d’Aoulef (255 km) au Sud de la ville d’Adrar.



Photo 2.1. Image par satellite de la localisation de la cimenterie STG

Le tableau 2.1 suivant présente quelques informations essentielles de la cimenterie STG d’Adrar.

Tableau 2.1. La cimenterie STG d’Adrar.

Inauguration	Capacité du four	Production du ciment	Ciment commercial	Wilayas de distribution
10/08/2017	3400 t/jour	4200 t/jour	2100 t/jour	Tamanrasset – Ghardaïa – M’sila- Mascara – Bechar

2.2.1.1. Caractéristiques physico- mécaniques du ciment STG :

Les différents essais physico-mécaniques du ciment STG ont été réalisés au laboratoire de la cimenterie d’Aoulef.

Tableau 2.2. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment STG

Caractéristiques	Norme	Unité	Valeurs	Exigences [53]
Masse volumique absolue	NA 231	kg/cm ³	3.14	2.9-3.15
Surface spécifique Blaine	NA 231	m ² /kg	335	300 - 340
Consistance normale	NA 230	%	28.6	26-33
Début de prise	NA 230	min	162	≥ 60 min
Fin de prise	NA 230	min	192	≥ 90 min
PAF			2.06	< 5
Résistance mécanique à 2 jours	NA 234	MPa	23.7	
Résistance mécanique à 28 jours	NA 234	MPa	49.9	

Les résultats obtenus des caractéristiques physiques et mécaniques du ciment STG sont conformes aux exigences de la norme [53].

2.2.1.2. Compositions chimique et minéralogique du ciment STG :

Les essais chimiques et minéralogiques ont été effectués dans le laboratoire de la cimenterie STG conformément aux prescriptions de la norme [57]. Les résultats sont présentés dans les tableaux 2.3 et 2.4 suivants :

Tableau 2.3. Composition chimique du ciment STG

	CaO	SiO₂	Al₂O₃	FeO₃	SO₃	MgO	CaO libre
Analyse (%)	64.53	21.30	4.83	3.31	2.28	1.43	0.61
Exigences [53]	60 – 65%	20 – 25%	4 – 8%	-	1 – 2.5%	≤ 1.5%	≤ 1.5%

Tableau 2.4. Composition minéralogique du ciment STG

	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
Analyse (%)	46.56	25.93	7.20	10.07
Exigences [53]	45 – 55%	20 – 28%	5 – 15%	5 – 15%

2.2.1.3. Résultats de la diffraction par les rayons X du ciment STG :

Cet essai a été effectué au niveau du laboratoire de chimie à l'université de Tlemcen. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont donnés par le tableau 2.5.

Tableau 2.5. Résultats DRX du ciment STG

Nom de la phase	Formule	Contenu (%)
Hatrurite	C ₃ S	57
Calcite	CaC	22
Corindon	Al ₂ O ₃	9
Hématite	Fe ₂ O ₃	4
Quartz HP	SiO ₂	0.1
Kaolinite-1A	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	8

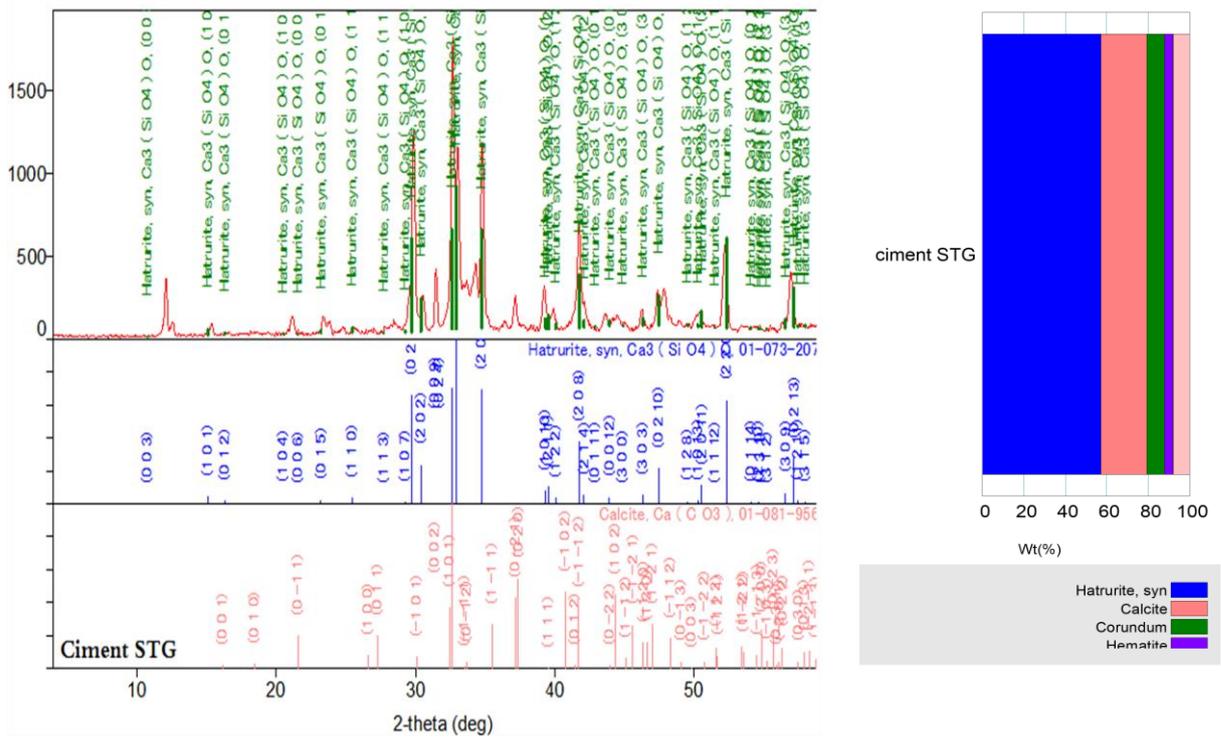


Figure 2.1. Résultats graphiques DRX du ciment STG

2.2.1.4. Photo du microscope électronique à balayage :

Le microscope électronique à balayage permet d'obtenir des images de surfaces de, pratiquement, tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électronique à transmission (x500.000 ou plus) [58].

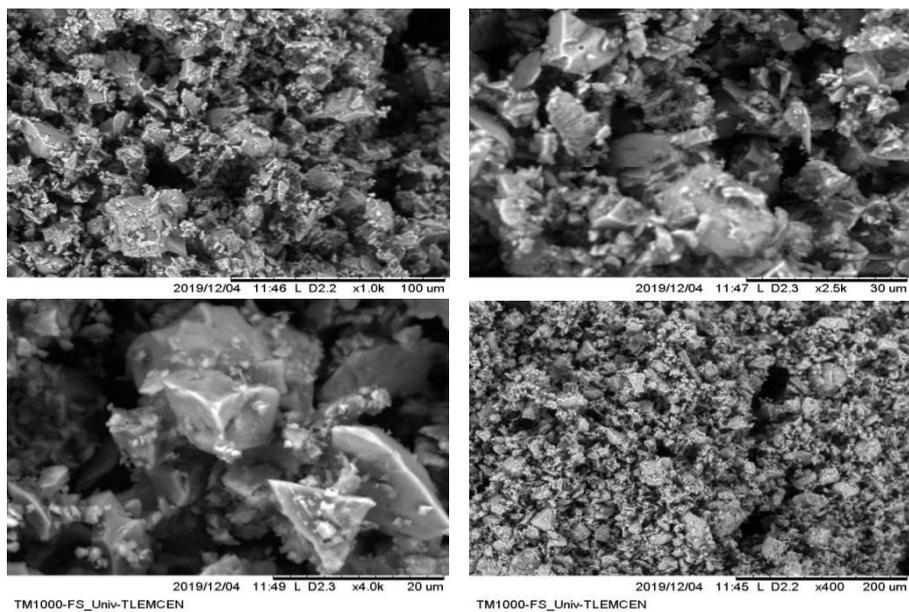


Photo 2.2. Photos MEB du ciment STG

2.2.2. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée dans la préparation du béton est l'eau du robinet de laboratoire de matériaux de construction de l'université d'Adrar.

Les résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau utilisée ainsi que ceux des paramètres de pollution et des minéralisations globales, ont été réalisés à l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) sont présentés dans les tableaux suivants. Ces résultats répondent aux prescriptions de la norme [59].

Tableau 2.6. Résultats d'analyse physico-chimiques de l'eau utilisée (ANRH d'Adrar)

Paramètres physico-chimiques	Résultats	Normes de potabilité
pH	7.57	≥ 6.5 et ≤ 9
Conductivité ms/cm	1.36	2.80
Résidu sec à 110°C	850.00	1500.00

Tableau 2.7. Résultats de paramètres de pollution de l'eau utilisée (ANRH d'Adrar)

Paramètres de pollution	Résultats	Normes de potabilité
Ammonium NH_4^+ mg/L	1.02	0.50
Nitrite NO_2^- mg/L	0.00	0.20
Nitrate NO_3^- mg/L	22.78	50.00
O. phosphate PO_4^- mg/L	0.00	0.50
Mat. Ox. (mil. Ac.) mg/L O_2	1.40	5.00

Tableau 2.8. Résultats des minéralisations globales de l'eau utilisée (ANRH d'Adrar)

Minéralisation globale	Résultats	Normes de potabilité
Calcium Ca^{++} mg/L	80	200,00
Magnes. Mg^{++} mg/L	33	150,00
Sodium Na^+ mg/L	160	200,00
Potass. K^+ mg/L	7	12,00
Chlorure Cl^- mg/L	214	500,00
Sulfate SO_4^{--} mg/L	228	400,00
Bicarbon. HCO_3^- mg/L	162	-
Carbonate CO_3^{--} mg/L	0	-
TH °F	33	-
TAC °F	13	-
Minéralisation mg/L	843	-
Somme des ions mg/L	906	-

2.2.3. Les granulats locaux

2.2.3.1. Les sables de dunes étudiés :

Les sables de dunes sont des sables roulés d'origine de dunes d'Adrar. Ce sont des constituants importants provenant de gisements naturels (dunes). Leur utilisation en tant que matériaux de construction a des intérêts sur l'environnement et sur le coût du mètre cube de béton. Le sable roulé (sable de dunes) est disponible en grande quantité dans les zones arides (au Sahara) et couvre plus de 60 % de la superficie de l'Algérie [60].

La connaissance des caractéristiques du sable de dunes est très importante et essentielle dans la formulation du béton.

Nous avons effectué l'identification des caractéristiques physico-mécaniques de six types de sable de dunes afin de sélectionner, le sable ayant des caractéristiques acceptables vis-à-vis des exigences des normes.

Les sables de dunes étudiés sont situés au Nord-Ouest de la wilaya d'Adrar :

- (SD BA) : Sable de dunes de Bakhalla (30km)
- (SD BD) : Sable de dunes de Ben Draou (25km)
- (SD BO) : Sable de dunes de Ben Oumer (22km)
- (SD MA) : Sable de dunes d'El Mansour (20km)
- (SD ON) : Sable de dunes d'Ouaienna (12km)
- (SD MI) : Sable de dunes de Mimoune (09 km)

Ces sables ont été choisis à cause de la proximité des dunes au laboratoire de l'université.

2.2.3.2. Situation géographique des dunes :

L'image satellite suivante présente le plan de situation des sables de dunes de la wilaya d'Adrar.

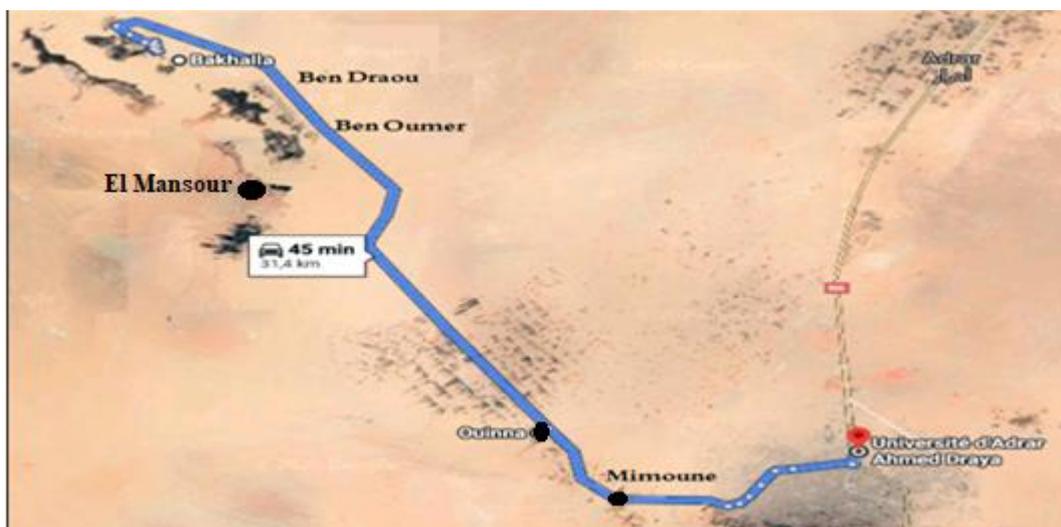


Photo 2.3. Image satellite des dunes étudiées (région de Bouda, Adrar)

2.2.3.3. Caractéristiques physiques des sables de dunes

Dans cette partie, nous présentons les différentes caractéristiques physiques des sables de dunes étudiées. Nous avons déterminé expérimentalement, la masse volumique absolue, l'équivalent de sable, le module de finesse et la granulométrie. Les essais ont été effectués au laboratoire (LTPS), unité de Ghardaïa et Adrar.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques physiques des sables de dunes étudiés.

Tableau 2.9. Caractéristiques physiques des sables de dunes

Dénomination	Sable de dunes					
	BD	ON	MI	MA	BA	BO
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.57	2.61	2.50	2.57	2.42	2.55
Équivalent de Sable en piston (ES)	85.23	64.51	76.36	80.00	95.39	59.5
Module de Finesse (MF)	2.03	1.55	1.74	1.67	2.44	1.44
Coefficient de courbure (Cc)	0.70	0.87	0.88	0.90	1.84	0.93
Coefficient d'uniformité (Cu)	3.49	2.11	3.79	2.47	3.32	2.15
d/D (mm)	0/1.6	0/2	0/1	0/1.6	0/1.25	0/0.8

Nous pouvons remarquer que :

- ❖ La masse volumique absolue des cinq sables étudiés varie entre 2.42 et 2.61 (g/cm^3) ;
- ❖ L'équivalent de sable du SD BO est inférieur à 60, selon l'exigence de la norme [61], ce sable est argileux;
- ❖ La valeur de l'équivalent de sable des deux sables, SD BD et SD BA, est supérieure à 85, les deux sables sont très propres ;
- ❖ L'équivalent de sable des SD (ON, MI et MA) varie dans l'intervalle 60 et 80, ces sables sont propres ;
- ❖ Le module de finesse des sables (BD, ON, MI, MA et BO) est inférieur à 2.1. Ces sables sont très fins, selon l'exigence de la norme [61]. Le sable SD BA est classé comme un sable grossier [61] lorsque son module de finesse est égal à 2.44.
- ❖ Selon les valeurs obtenues du coefficient de courbure (Cc), la granulométrie de tous ces sables étudiés est mal graduée et la courbe s'oriente plutôt vers le haut [62].
- ❖ Les valeurs du coefficient d'uniformité des sables étudiés, varient entre 2 et 5, ce qui signifie que la granulométrie est serrée [62].
- ❖ L'étendue granulaire de ces sables de dunes est inférieure à 2mm.

2.2.3.4. L'analyse granulométrique des sables étudiés :

La distribution granulaire des particules de sable est l'un des facteurs les plus importants à prendre en compte avant d'étudier les composants du mélange de béton. Les courbes granulométriques permettent également de connaître le module de finesse, l'étendue granulaire ainsi que la classe granulaire de chaque type de sable.

La figure 2.2 présente les courbes granulométriques des sables étudiés.

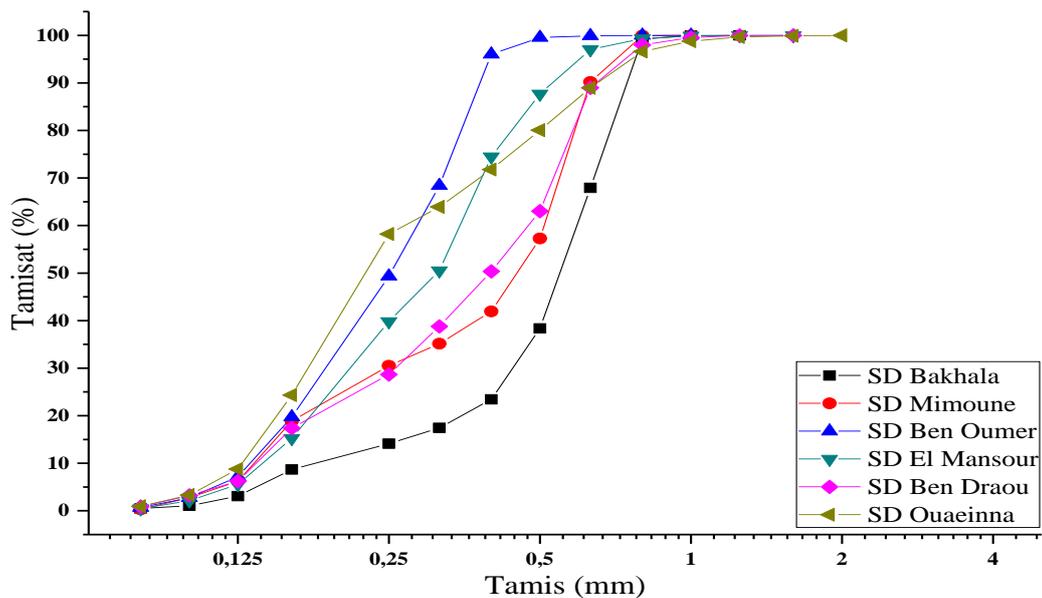


Figure 2.2. Courbes granulométriques des sables de dunes.

D'après les résultats des courbes granulométriques, nous pouvons constater que :

- La courbe granulométrique du sable de dunes Ben Oumer est très serrée, ce qui signifie que ce sable est composé, à majorité, de grains fins.
- La courbe du sable de Bakhalla est étalée, ce sable contient des grains plus grossiers que les autres types des sables étudiés.
- Les courbes des deux sables de dunes, Ben Draou et Mimoune, sont semblables avec des grains moyens.
- Le sable d'Ouaienna contient, plus de 60%, de grains inférieurs à 0.25 mm, sa courbe granulométrique est semi serrée.

2.2.3.5. Caractéristiques physiques des sables de dunes :

D'après les résultats obtenus des essais d'identifications physiques, nous choisissons trois types de sable de dunes, (SD MA, SD MI et SD ON), les caractéristiques étudiées (module de finesse, étendue granulaire) de ces trois sables nécessitent une correction avec un sable grossier pour améliorer le module de finesse et l'étendue granulaire.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques physiques des sables de dunes étudiés.

Tableau 2.10. Caractéristiques physiques des sables de dunes étudiés

Dénomination	SD MA	SD MI	SD ON	Normes
MV absolue (g/cm ³)	2.57	2.50	2.61	NF EN 10976
Équivalent de sable	80.00	76.36	64.51	NF EN 933-8+A1
Module de finesse	1.67	1.74	1.55	NF EN 12620
Coefficient Cc	0.90	0.88	0.87	[62]
Coefficient Cu	2.47	3.79	2.11	[62]
MV apparente	1.60	1.59	1.61	NF EN 10976
d/D (mm)	0/1,6	0/1	0/2	NF EN 9331
Ab (%)	0.45	0.43	0.47	NF EN 10976
VBS	0.06	0.07	0.08	P18-595

Nous pouvons constater que :

- Le module de finesse des trois sables varie entre 0.6 et 2.1, ces sables sont classés comme des sables fins (MF), selon l'exigence de la norme [61];
- Les valeurs des masses volumiques apparentes et absolues de ces sables sont conformes à la norme [63]. Les sables ont donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme [61]. La masse volumique apparente est d'environ 1.60 (g/cm³) pour les trois sables et leur masse volumique absolue varie entre 2.50 (g/cm³) et 2.60 (g/cm³).
- Les coefficients d'absorption en eau des sables sont inférieurs à 1% ;
- Les valeurs de l'équivalent de sable au piston nous permettent de connaître la nature du sable, l'ES de SD ON est compris entre 60 et 70, ce sable est légèrement argileux. Pour les deux sables SD MA et SD MI, l'ES varié entre 70 et 80, les deux sables sont donc propres.
- Le sable est considéré comme sable bien gradué lorsque le coefficient Cu est supérieur à 4, et lorsque ce dernier est inférieur à 6, le sable est alors considéré comme sable mal gradué. La granulométrie des trois sables de dunes est mal graduée lorsque le coefficient de courbure (Cc) est inférieur à 1 et le (Cu) est inférieur à 6 [62].

- Le taux de valeur des sables de dunes au bleu de méthylène est inférieur à 0.2, ce qui confirme que les trois sables sont sableux [66].

2.2.3.6. Analyse granulométrique par tamisage :

L'essai de l'analyse granulométrique a été effectué selon la norme [65]. Nous avons déterminé la distribution granulaire et le diamètre maximale ainsi que la valeur du module de finesse.

La figure 2.3 présente les courbes granulométriques des trois sables de dunes et les courbes des fuseaux normalisés [67].

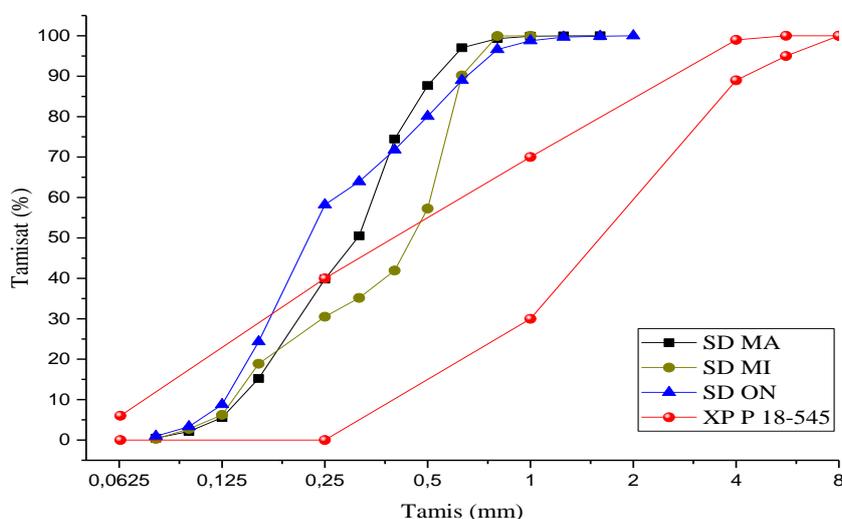


Figure 2.3. Courbes granulométriques des sables de dunes et les courbes de références.

- Le SD ON contient une quantité de grains, de grosseur inférieure à 0.4 mm, plus importante que celle des deux autres sables de dunes ;
- Les trois courbes sont éloignées de l'intervalle des courbes de références [66], ce qui signifie que ces sables sont riches en grains fins et pauvres en grains grossiers ;
- Les sables étudiés nécessitent une correction avec l'ajout de grains de grosseur supérieure à 0.25mm.

2.2.3.7. Les résultats de la diffraction des rayons X sur les sables de dunes :

La diffraction des rayons X sur monocristal permet d'étudier les structures cristallines. La diffraction sur poudres est principalement utilisée pour l'identification des phases. Cette méthode est non destructive utilisée pour l'analyse qualitative et quantitative d'échantillons secs. Cette

technique est basée sur les interactions de la structure cristalline d'un échantillon avec des radiations de courte longueur d'onde [68].

Tableau 2.11. Résultats de DRX sur les sables de dunes

Nom de la phase	Formule	SD MA	SD MI	SD ON
		Contenu (%)		
Quartz	SiO ₂	91	95.0	87.0
Périclase	MgO	5.6	-	-
Calcite	CaCO ₃ O ₃)	3	4.9	13.0
Hématite pH, iron. (III) oxide	Fe ₂ O ₃	0.8	-	-

Nous pouvons constater que le taux de quartz (SiO₂), dans les trois types de sable de dunes, est supérieur de 90%, ce qui signifie que ces sables sont classés comme des sables siliceux [69, 70].

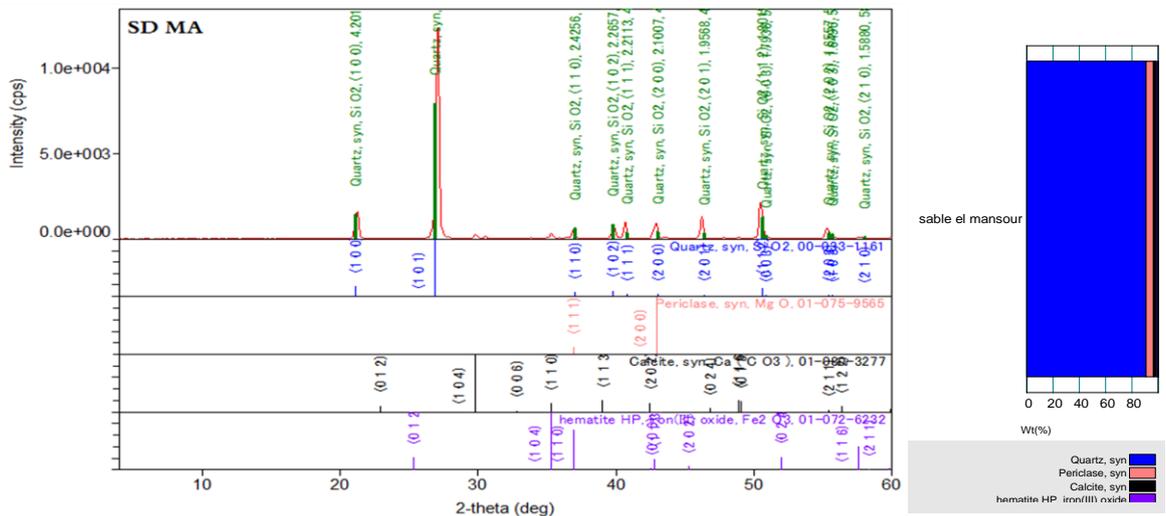


Figure 2.4. Résultats de DRX sur le SD MA

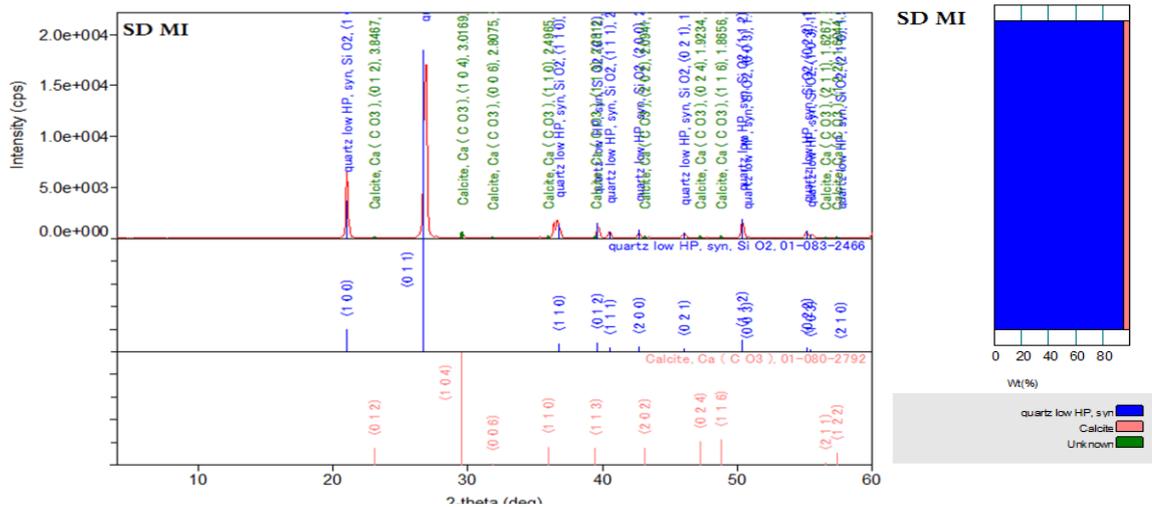


Figure 2.5. Résultats de DRX sur le SD MI

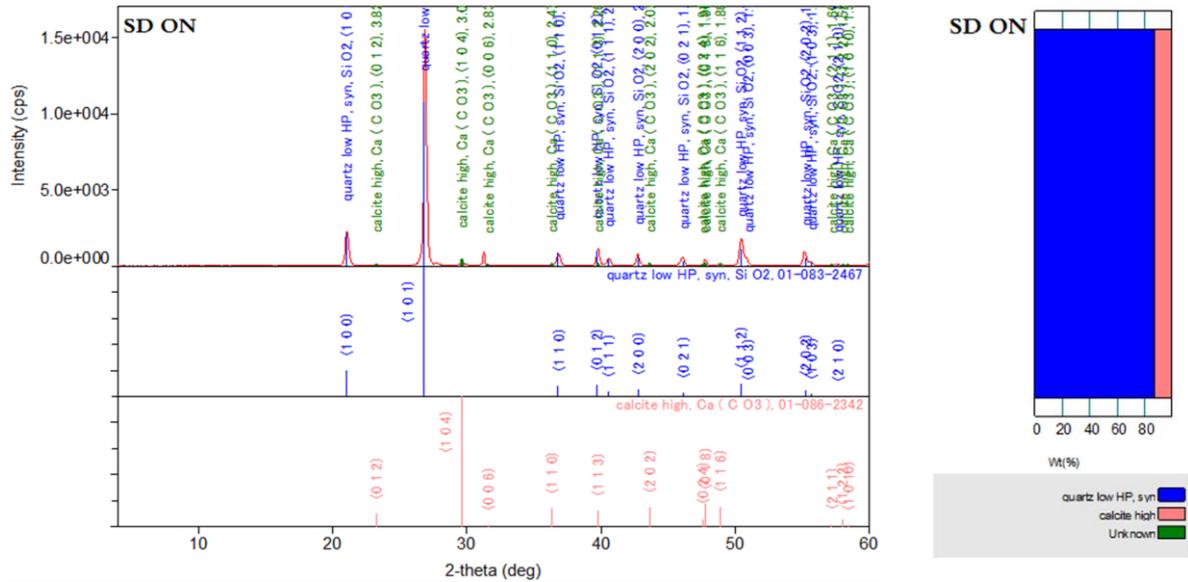


Figure 2.6. Résultats de DRX sur le SD ON

2.2.3.8. Analyse chimique sur les sables de dunes :

Les essais de l'analyse chimique sur les trois sables de dunes ont été effectuées à la cimenterie de LAFARGE située à Oggaz, (Sig wilaya de Mascara). Le tableau 2.12 présente les compositions chimiques pour chaque type de sable.

Tableau 2.12. Résultats d'analyse chimique sur les sables de dunes [71]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
SD MA	92,79	2,95	0,35	3,15	2,12	0,222	0,38	0,10	0,034	0,06	0,31	0,11
SD MI	91,84	3,21	0,37	3,94	2,56	0,285	0,48	0,11	0,034	0,13	0,35	0,11
SD ON	90,07	3,3	0,39	4,29	2,63	0,236	0,52	0,08	0,034	0,15	0,36	0,12

2.2.3.9. Analyse des sables sur microscope électronique à balayage :

Les analyses MEB ont été faites au laboratoire de l'université de Tlemcen. Le microscope électronique à balayage utilisé est de marque HITACHI TM 6100.

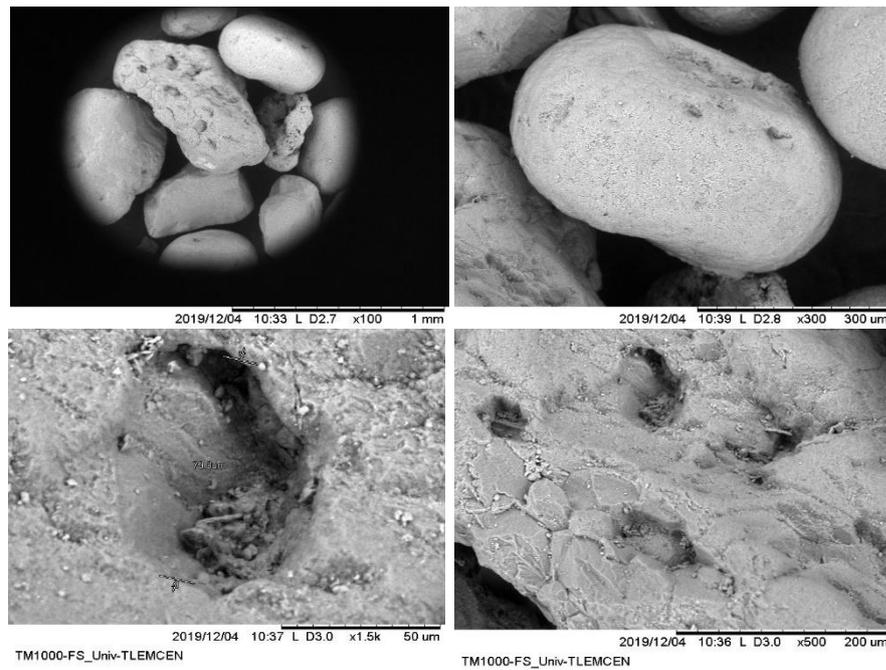


Photo 2.4. Photos MEB du SD MA

- Les grains de SD MA sont arrondis et plus grossiers que les deux sables de dunes ;

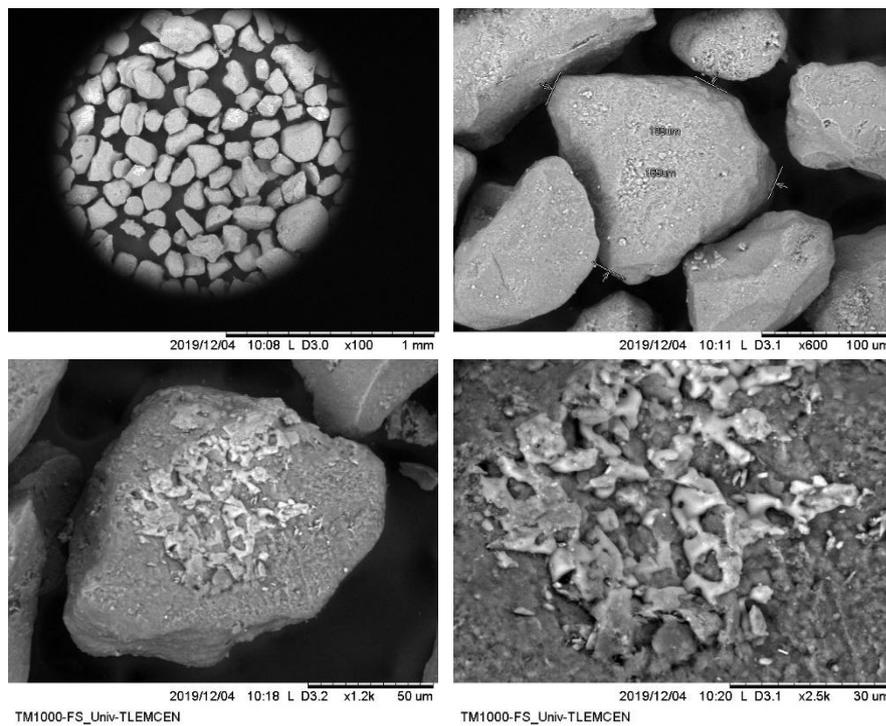


Photo 2.5. Photos MEB du SD MI

- La forme des grains du sable de dunes MI est anguleux

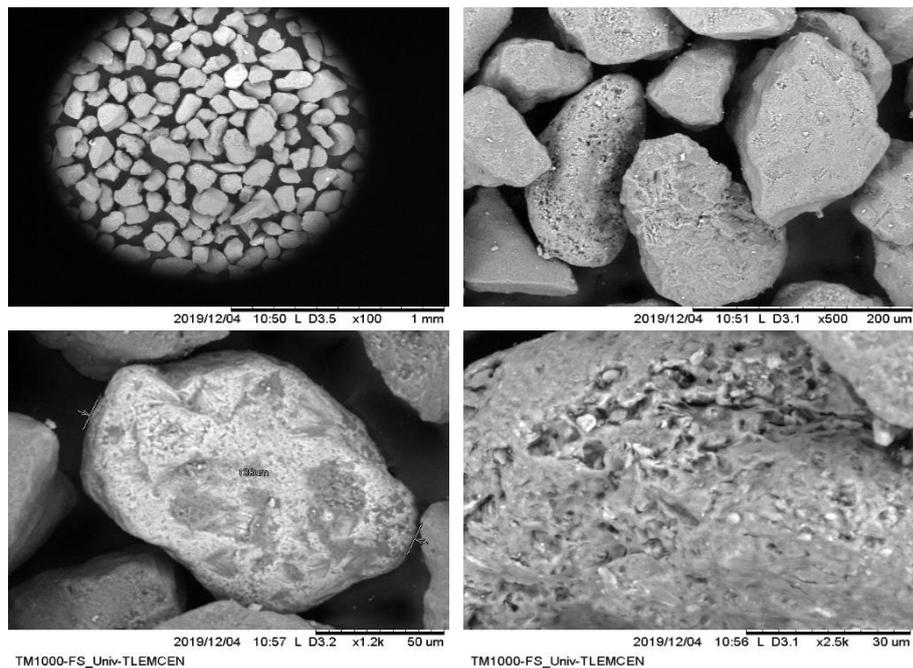


Photo 2.6. Photos MEB du SD ON

- Les grains du sable de dunes ON sont plus petits que les deux sables de dunes MA et MI.

2.2.4. Les sables concassés étudiés :

Le sable concassé est fabriqué en broyant les grosses pierres de la carrière à une taille particulière de sable. Ses propriétés physiques telles que la couleur, la taille et la forme, la texture de surface des particules, dépendent du type de pierre et de sa provenance. Le sable artificiel produit par des machines peut être un meilleur substitut au sable de dunes [72].

Les deux sables concassés que nous avons choisis sont le sable concassé de la carrière Koussane I (SC KI) et le sable concassé de la carrière Koussane II (SC KII). Ces derniers proviennent de la région de Koussane (63 km de la ville d'Adrar).

Nous avons identifié les caractéristiques des deux sables concassés :

- Sable concassé de la station de concassage Koussane I;
- Sable concassé de la station de concassage Koussane II ;

2.2.4.1. Situation géographique des carrières des sables concassés étudiés :

La photo ci-dessous présente le plan de situation des stations de concassages Koussane I et Koussane II, situées dans la région de Koussane.



Photo 2.7. Plan de situation de la carrière Koussane I et Koussane II

2.2.4.2. Caractéristiques physiques des sables concassés étudiés :

Les essais d'identification physiques des sables concassés ont été effectués au laboratoire des matériaux LTPS à Ghardaïa.

Tableau 2.13. Caractéristiques physiques des sables concassés

Dénomination	SCK I	SCK II	Normes
MV absolue (g/cm ³)	2.55	2.58	NF EN 1097-6
MV apparente	1.37	1.34	NF EN 1097-6
Équivalent de sable	49.65	59.26	NF EN 933-8+A1
Module de finesse	3.43	3.02	NF EN 12620
Coefficient Cc	1.50	0,79	[62]
Coefficient Cu	10.78	5.11	[62]
d/D (mm)	0/5	0/4	NF EN 933-1
Ab (%)	2.15	2.64	NF EN 1097-6
Valeur au bleu (VBS)	0.4	0.3	P18 595

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que :

- ✓ Le module de finesse de ces deux sables varie entre 2.4 à 4.0, ces sables sont classés comme des sables à gros grains (CF), selon l'exigence de la norme [61];
- ✓ Les masses volumiques apparentes et absolues des sables sont conformes à la norme [63] ;

- ✓ Les masses volumiques (apparente et absolue) de ces sables répondent aux spécifications de la norme [61]. La masse volumique apparente est égale à $1.30 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, tandis que la masse volumique absolue varie entre 2.55 et $2.58 \text{ (g/cm}^3\text{)}$;
- ✓ Les coefficients d'absorption des sables sont inférieurs à 3% ;
- ✓ L'équivalent de sable au piston des sables SC KI et SC KII est inférieur à 60, la nature des deux sables est limoneuse ;
- ✓ La granulométrie du sable concassé KII est mal graduée lorsque le coefficient de courbure (Cc) est inférieur à 1 et le Cu est inférieur à 6. Par contre, le coefficient Cc du sable concassé KI varie entre 1 et 3 et le Cu est supérieur à 6, la granulométrie est bien graduée [62].
- ✓ La valeur de bleu de méthylène est supérieure à 0.2, ces deux sables sont classés comme des sables limoneux [18][19].

2.2.4.3. Analyse granulométrique par tamisage des sables concassés :

Pour connaître la distribution granulaire et le module de finesse des sables concassés étudiés, nous avons effectué l'essai d'analyse granulométrique par tamisage. L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme [73].

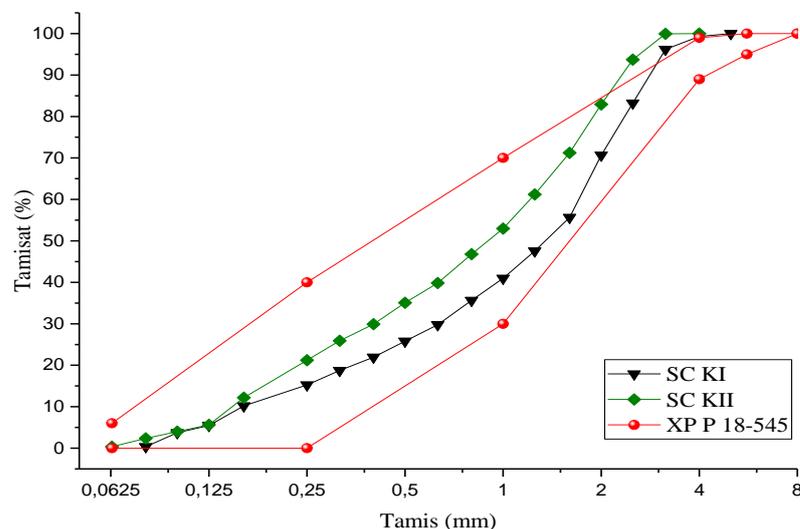


Figure 2.7. Courbes granulométriques des sables concassés

- Le SC KII contient une quantité de grains fins plus importante que celle du SC KI.
- Les deux courbes granulométriques sont situés au milieu des courbes du fuseau de référence [67].

2.2.4.4. Les résultats de la diffraction des rayons X sur les sables concassés :

Ces essais ont été effectués au laboratoire de chimie de l'université de Tlemcen, sur les deux sables concassés, les résultats sont présentés dans le tableau 2.14.

Tableau 2.14. Résultats de DRX des sables SC KI et SC KII

Nom de la phase	Formule	SC KI	SC KII
		Contenu (%)	
Quartz faible HP	SiO ₂	33.34	33.11
Hématite HP, iron. (III) oxide	Fe ₂ O ₃	6.37	7.60
Calcium Oxide	CaO	24.17	23.99
Périclase	MgO	4.07	4.93
Calcite	CaCO ₃	24.17	23.99

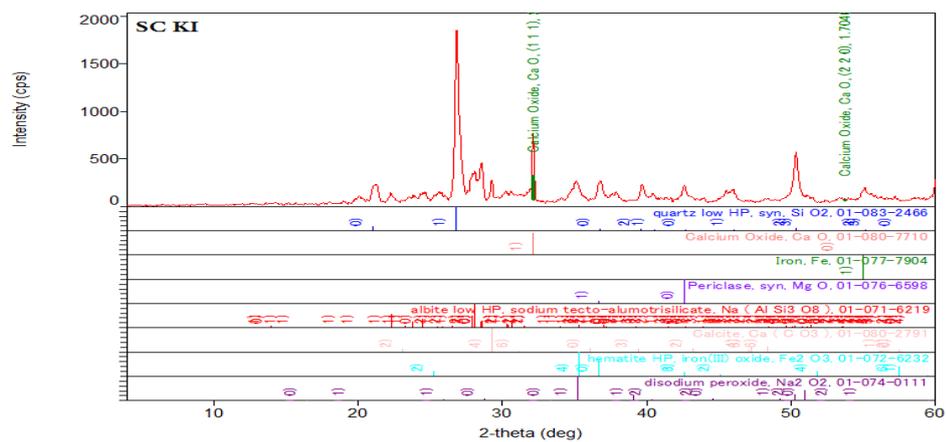


Figure 2.8. Résultats DRX sur le SC KI

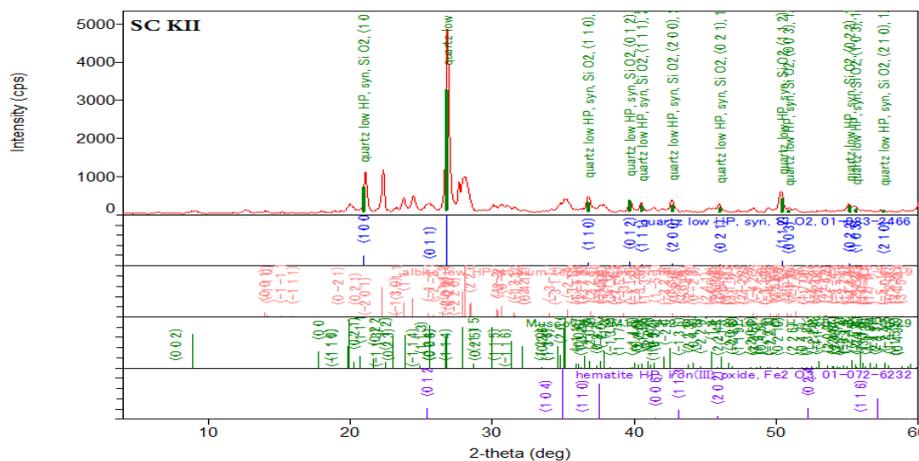


Figure 2.9. Résultats DRX sur le SCK II

2.2.4.5. Analyse chimique sur les sables concassés :

Le tableau 2.15 présente les compositions chimiques de chaque type de sable.

Tableau 2.15. Résultats d'analyse chimique sur les sables concassés

(%)	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
SC KI	50,70	24,17	6,37	5,58	7,58	0,76	2,35	1,38	0,047	0,57	0,101	0,33
SC KII	49,80	23,99	7,60	5,74	7,18	0,74	2,71	1,02	0,051	0,65	0,102	0,39

Les résultats de l'analyse chimique sur les deux sables concassés montrent que les deux sables contiennent un taux de quartz (SiO₂) supérieur à 49% et un taux de calcaire d'environ 24%. Les deux sables concassés sont classés comme étant des sables silico-calcaires.

2.2.4.6. Analyse sur microscope électronique à balayage :

Les deux photos MEB 2.8 et 2.9, présentent la forme et la texture des grains des sables concassés.

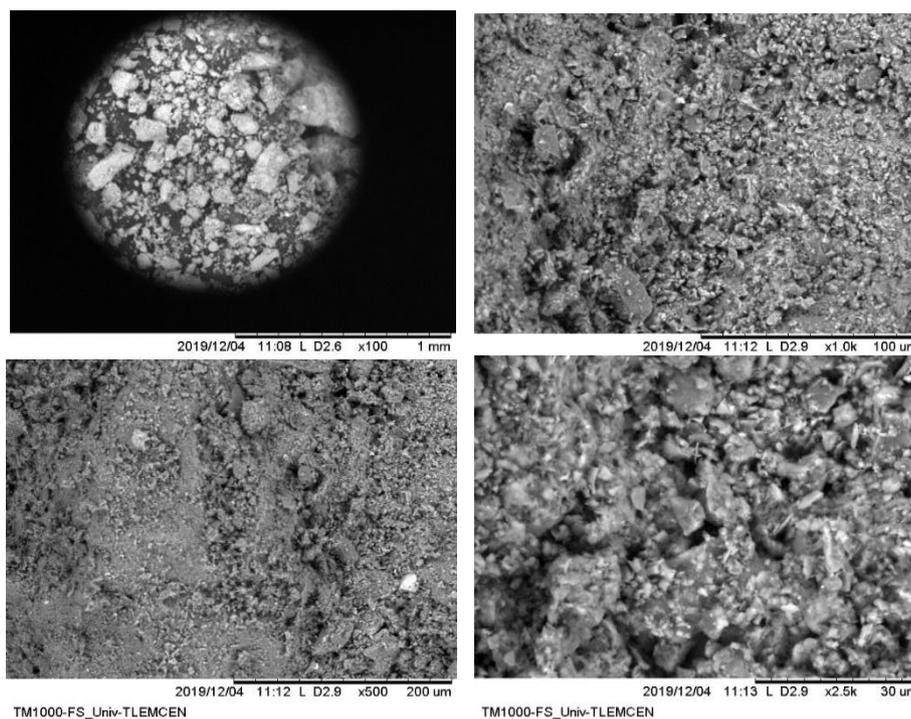


Photo 2.8. Photos MEB du SC KI

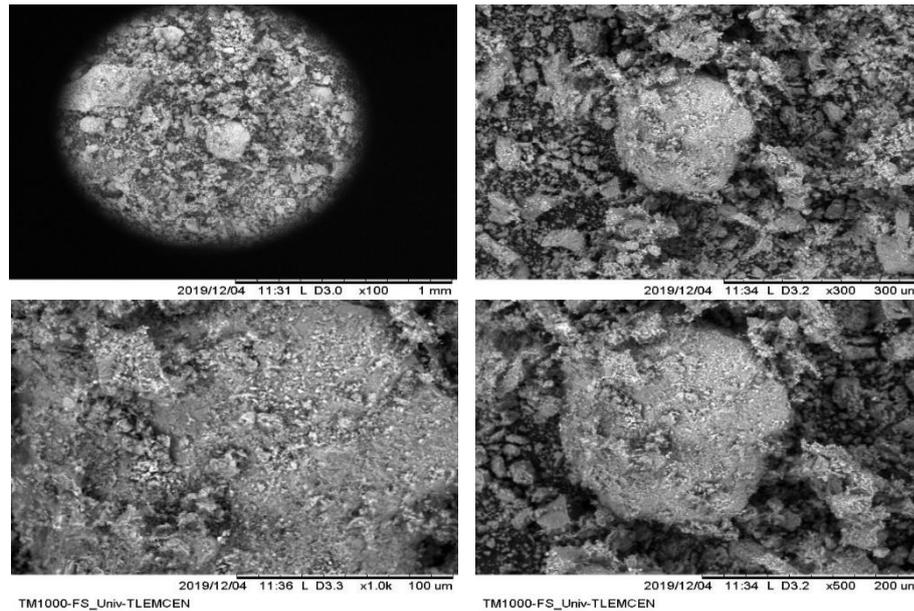


Photo 2.9. Photo MEB du SCK II

D'après les deux photo MEB (2.8 et 2.9) du SC KI et SC KII, nous remarquons que le SC KII contient des grains fins plus que le SC KI

2.2.5. Les graviers :

2.2.5.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des graviers des carrières KI et KII :

Nous avons étudié les graviers, de classes 3/8, 8/15 et 15/25 mm, de deux carrières de concassage ; Koussane KI et Koussane KII. Nous avons choisi ces granulats pour cause de proximité de la station de concassage par rapport à notre laboratoire. Nous avons pris deux types différents de graviers pour étudier l'influence de la nature des granulats sur les propriétés du béton aux états frais et durci.

Tableau 2.16. Caractéristiques physico-mécaniques des graviers KI et KII

Type de gravier	G KI			G KII			Normes
	3/8	8/15	15/25	3/8	8/15	15/25	
Propreté superficielle (%)	1.92	0.92	0.59	1.24	0.94	0.50	[74]
Absorption d'eau (%)	2.15	1.92	1.38	2.64	2.04	0.79	[63]
Teneur en eau (%)	0.46	0.38	0.37	0.41	0.37	0.39	[75]
Los Angeles (%)	20	18	16	22	21	15	[76]
Micro Deval (%)	32	24	21	41	34	18	[77]
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.17	1.26	1.32	1.21	1.28	1.31	[78]
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.64	2.63	2.64	2.59	2.59	2.59	[78]
Coefficient d'aplatissement (%)	57.74	29.47	9.84	46.74	32.57	12.01	[79]

D'après le tableau précédent, nous pouvons constater que :

- ✓ Les graviers des deux carrières présentent une propriété superficielle acceptable, selon les spécifications exigées par la norme [61].
- ✓ Dans ces granulats concassés, le pourcentage d'éléments de grosseur inférieure à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % ;
- ✓ Le coefficient Los Angeles (LA) des deux graviers GKI et GKII est inférieur à 40%, ce qui répond aux exigences de la norme [61];
- ✓ Les valeurs du coefficient Micro-Deval (M_{DE}) sont inférieures à 35% et selon l'exigence de la norme [61], nous pouvons conclure que les graviers étudiés présentent une bonne résistance à l'usure.
- ✓ Le coefficient d'aplatissement détermine la forme des granulats et les graviers 3/8 de KI et 3/8, 815 de KII présentent des valeurs supérieures à 30%, ce qui signifie que ces graviers contiennent des éléments plats, les autres classes des graviers étudiés, présentent une forme conforme à l'exigence de la norme [61];
- ✓ Les graviers des deux carrières ont donné des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme [61]. Leur masse volumique apparente est comprise entre 1.10 et 1.30 g/m³ et leur masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2.5 et 2.7 g/cm³
- ✓ Pour tous les graviers le coefficient d'absorption ne dépasse pas le 5%, ce qui répond aux exigences de la norme [61].

2.2.5.2. Analyse granulométrique par tamisage des graviers KI et KII :

Pour connaître la distribution granulaire de chaque classe des deux types de graviers KI et KII, nous avons effectué l'essai de l'analyse granulométrique par tamisage, les courbes granulaires sont présentées dans la figure 2.10.

Notons que les courbes granulométriques des classes 3/8, 8/15 et 15/25 sont presque superposées pour les deux graviers G KI et G KII.

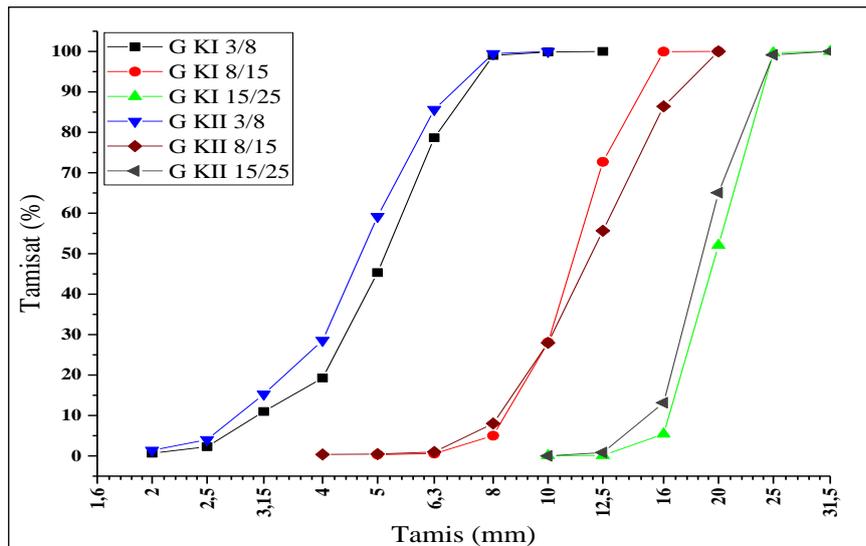


Figure 2.10. Courbes granulométriques des graviers G KI et G KII

2.2.5.3. Caractéristiques chimiques des graviers des carrières KI et KII

Le tableau 2.17 montre les caractéristiques chimiques des granulats étudiés, ces essais ont été effectués au niveau de laboratoire (LTPS) de l'unité de Ghardaïa.

Tableau 2.17. Caractéristiques chimiques des graviers KI et KII

Gravier		G KI			G KII		
Échantillon		3/8	8/15	15/25	3/8	8/15	15/25
Insolubles %		86,6	87,3	90	81,6	83,7	85,1
Carbonates	CaCO ₃ %	5	5	3	10	9	7
Chlorures	pH _i (initial)	7,74	7,91	8,04	7,83	7,86	8,01
	pH _t (titrage)	6,78	6,82	6,92	6,8	6,9	6,75
	V(AgNO ₃)	3	2,8	2,7	2,2	2,35	2,5
	Cl ⁻ %	0,085	0,079	0,076	0,062	0,067	0,071
	NaCl %	0,014	0,139	0,125	0,102	0,109	0,116

2.2.5.4. Analyse par diffraction des rayons X sur les graviers KI et KII :

Nous avons utilisé cette technique pour identifier les compositions chimiques des granulats [68].

Le tableau 2.18 présente les résultats d'analyse par diffraction des rayons X des deux graviers, ils sont presque identiques

Tableau 2.18. Résultats de DRX sur les graviers KI et KII

Graviers	SiO ₂ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)
G KI	33.34	24.17	6.37	5.58	4.07	0.17
G KII	33.11	23.99	7.60	5.74	4.93	0.11

Les deux graviers contiennent environ 33% de silice (SiO₂) et 24% de chaux (CaO).

2.3.La correction du sable de dunes :

Selon Ingalkar [72], la résistance à la compression du béton varie en fonction des différentes carrières à un taux de remplacement de 40 à 50 % des sables concassés, le béton obtenu semble donner une résistance maximale à la compression.

Rmili [81], a trouvé que la combinaison des sables, de granulométrie variable, contribue à l'amélioration des caractéristiques du béton autocompactant, à l'état frais. Ce résultat a été obtenu par l'ajout du sable de dunes au sable concassé.

Bouziani [60], a montré que l'utilisation de sable de dunes (0/1.25mm), à environ 61 % en masse du sable total, avec le sable roulé (0/5mm) (SR), donne une compacité des grains de sable améliorée. La teneur optimale du sable de dunes (61%), permet, d'une part, d'avoir une bonne fluidité pour le béton de sable, et d'autre part, d'obtenir de meilleures performances en termes de résistance à la compression à 28 jours.

D'après Benabed [82], les résultats de la résistance à la compression indiquent que la meilleure proposition de mélange binaire (sable concassé ou sable de rivière) avec le sable de dunes est de 25%.

L'utilisation des granulats concassés donne des résistances plus élevées que celles avec des granulats roulés [8].

Benmalek [83], conclu que pour obtenir une granulométrie plus étendue de sable de dunes, on doit employer un filler calcaire, cette correction peut constituer le squelette d'un béton pour des constructions peux étagées.

L'ouvrabilité du béton diminue lorsque le taux de sable de dunes est supérieur à 60%, la résistance à la compression est aussi diminuée avec une augmentation de la teneur en sable de dunes [84].

L'utilisation du sable alluvionnaire (0/5mm) dans la formulation du béton, donne des résistances à la compression supérieures à celles obtenues dans le cas de l'utilisation du sable de dunes (0/0.63). Un gain de 30% en résistance à la compression a été observé [85].

Le problème d'utilisation du sable concassé (100%) dans un mélange granulaire du béton provient souvent de son pourcentage élevé en fines, une quantité d'environ 10% de filler calcaire est bénéfique pour les propriétés du béton, les grains inférieurs à 0.08 mm augmentent de façon excessive le besoin en eau du béton [45].

2.3.1. Le sable corrigé :

Comme nous l'avons déjà signalé, notre objectif est de corriger la distribution granulaire et la finesse de sable de dunes avec l'ajout d'un taux de sable concassé variant entre 20 et 80%. Pour connaître l'influence de cette correction sur les différentes caractéristiques, nous avons effectué les essais indispensables sur les sables corrigés étudiés.

Pour les trois types des sables de dunes, nous avons établi 36 propositions de sable de dunes corrigé avec les deux sables concassés KI et KII.

Tableau 2.19. Propositions des mélanges de sables corrigés étudiés

	SC KI						SC KII					
SC (%)	0%	20%	40%	60%	80%	100%	0%	20%	40%	60%	80%	100%
SD (%)	100%	80%	60%	40%	20%	0%	100%	80%	60%	40%	20%	0%

Le tableau 2.19, ci-dessus, présente les propositions des sables corrigés pour un seul type de sable de dunes avec les deux types des sables concassés. L'opération est donc répétée deux fois pour les deux autres sables de dunes.

2.3.1.1. La masse volumique absolue des sables corrigés :

La méthode utilisée pour déterminer la masse volumique des sables est la méthode du pycnomètre, cette méthode permet de déterminer le volume des échantillons de forme irrégulière, tels que les granulats [86].

Tableau 2.20. Masse volumique absolue en (g/cm^3) des sables SD et SC KI, KII

	SC KI						SC KII				
SD (%)	100%	80%	60%	40%	20%	0%	80%	60%	40%	20%	0%
SD ON	2,65	2,63	2,61	2,56	2,55	2,55	2,56	2,56	2,56	2,56	2,58
SD MA	2,63	2,64	2,63	2,57	2,56	2,55	2,63	2,63	2,63	2,56	2,58
SD MI	2,63	2,62	2,61	2,59	2,57	2,55	2,63	2,63	2,63	2,57	2,58

D'après ce tableau 2.20, nous pouvons constater que :

- ✓ La masse volumique absolue des sables corrigés SD et SC KI varie entre 2.55 et 2.65 g/cm³, ce qui signifie qu'il y'a une influence du taux du sable SC KI sur le volume du sable SD. Le sable SC KI, qui contient des grains gros, occupe un volume plus grand que celui du sable SD.
- ✓ Les valeurs de la masse volumique absolue des sables de dunes corrigés avec le sable concassé SC KII varient entre 2.58 et 2.65 g/cm³.
- ✓ Il y'a une diminution de la masse volumique du sable corrigé à cause du taux élevé du sable SC KII dans le mélange.
- ✓ Pour les deux sables SD MA et SD MI, les valeurs de la masse volumique restent constantes jusqu'au taux de 40% de SC KII. Nous pouvons justifier ces résultats par le module de finesse du sable qui est égal à 1.77 et supérieur à celui du sable SD ON qui a un module de finesse égal à 1.55.

2.3.1.2. Le module de finesse :

Le module de finesse permet de contrôler la régularité de sable. Nous avons fait une comparaison entre les résultats du module de finesse obtenus avec la norme [61] qui est défini comme étant la somme des pourcentages cumulés en masse des refus sur la série de tamis suivante (mm), exprimée en pourcentage :

$$FM = \frac{\sum(> 4) + (> 2) + (> 1) + (> 0.5) + (> 0.25) + (> 0.125)}{100}$$

Aussi, nous pourrions utiliser la règle d'Abrams [52]:

- Proposition du sable SC = $\frac{(Mf-Mf2)}{(Mf1-Mf2)}$
- Proposition du sable SD = $\frac{(Mf1-Mf)}{(Mf1-Mf2)}$

Mf1 : module de finesse du sable concassé ;

Mf2 : module de finesse du sable de dunes ;

Mf : module de finesse du sable corrigé.

Le tableau suivant présente les valeurs du module de finesse calculé avec la règle d'Abrams et les valeurs obtenues avec la norme [61].

Tableau 2.21. Module de finesse des sables de dunes et des deux sables concassés SC KI, SC KII

Sable corrigé		Sable concassé de la carrière de Koussane									
		KI	KII	KI	KII	KI	KII	KI	KII	KI	KII
SD (%)	100%	80%		60%		40%		20%		0%	
SD ON (%) Sable de dunes d'Ouaienna											
FM théorique	1.55	1.91	1.83	2.29	2.13	2.67	2.43	3.05	2.72	3.43	3.02
FM expérimental		1.68	1.65	2.20	2.06	2.51	2.37	3.03	2.69		
SD MA (%) Sable de dunes d'El Mansour											
FM théorique	1.67	2.03	1.94	2.37	2.21	2.72	2.48	3.08	2.75	3.43	3.02
FM expérimental		1.91	2.15	2.34	2.26	2.72	2.67	3.04	2.86		
SD MI (%) Sable de dunes de Mimoune											
FM théorique	1.74	2.07	1.99	2.41	2.25	2.75	2.51	3.10	2.76	3.43	3.02
FM expérimental		1.86	1.90	2.24	2.19	2.68	2.53	2.92	2.81		
Standard [61]	Grains fin			Préférentiel				Grain grossier			

D'après les résultats du tableau 2.21 et les deux figures (2.11, 2.12), nous remarquons que :

- Les modules de finesse théorique et expérimental sont presque les mêmes, nous avons confirmé que nos résultats expérimentaux du module de finesse, sont très proches de ceux calculés par la règle d'Abrams ;
- Les valeurs du module de finesse des sables corrigés augmentent progressivement avec l'augmentation des taux de sables concassés KI et KII de 1.54 à 3.43.
- Les valeurs du module de finesse des sables de dunes (100%) et des sables corrigés (80% de sable de dunes), varient entre 0.6 et 2.1. Selon l'exigence de la norme [61], les sables corrigés sont donc classés comme étant des sables à grains fin;
- Pour les sables corrigés avec des taux de 60% et 40% de sable de dunes et en utilisant les deux sables concassés KI et KII, le module de finesse obtenu est supérieur à 2.1. Ces sables sont préférentiels selon l'exigence de la norme [61].
- Les sables de dunes corrigés avec des taux de 80 et 100% de sable concassé, contiennent une quantité de grains grossiers plus importante que celle des autres sables corrigés, lorsque leur module de finesse est supérieur à 2.80.

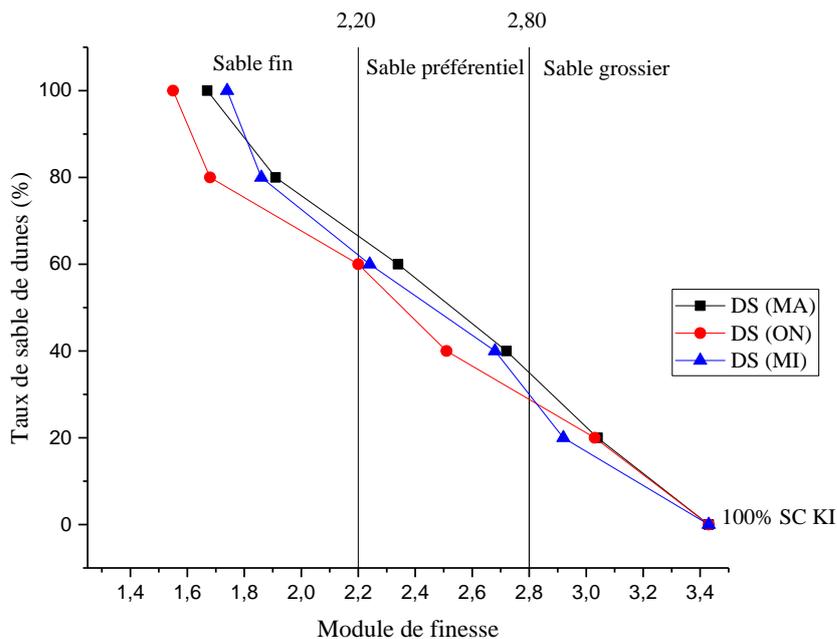


Figure 2.11. Module de finesse des sables de dunes corrigés avec le sable concassé KI

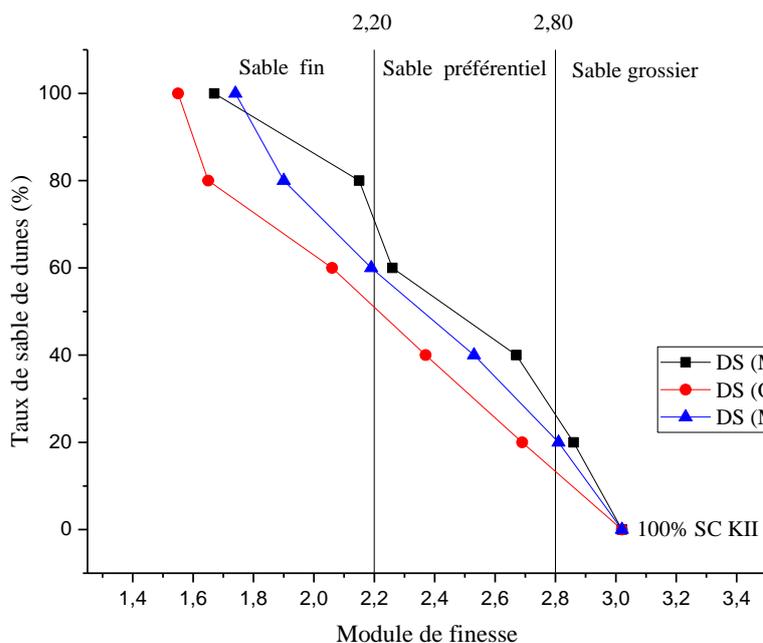


Figure 2.12. Module de finesse des sables de dunes corrigés avec le sable concassé KII

2.3.1.3. La granularité des sables corrigés :

Afin de connaître l’influence de la correction de la granulométrie des sables de dunes avec le sable concassé, nous devons faire une analyse granulométrique par tamisage pour chaque mélange. Selon les propositions sélectionnées, les résultats sont présentés sur les deux figures 2.13 et 2.14 suivantes :

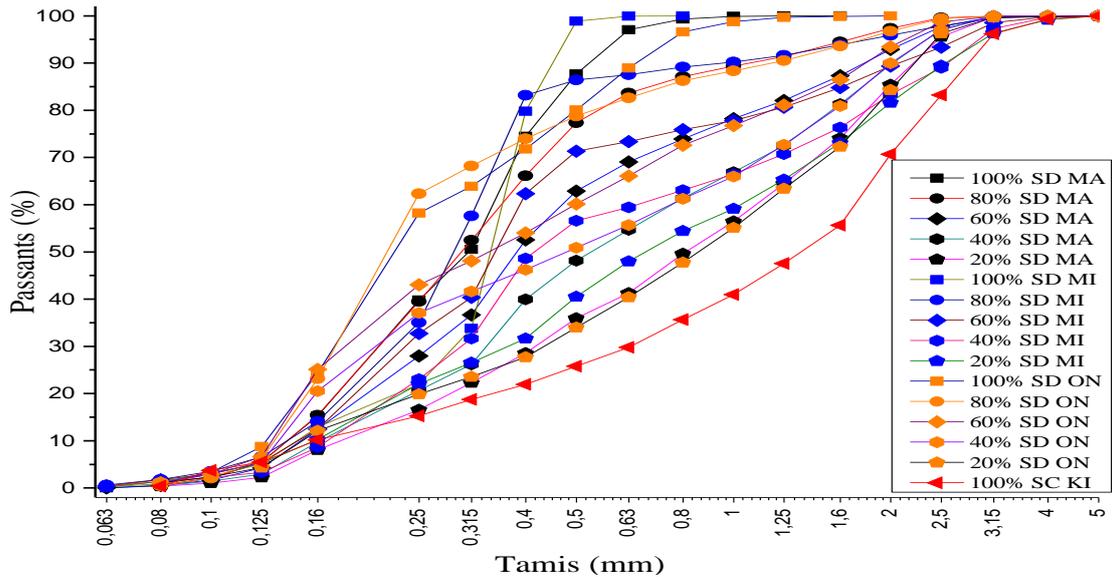


Figure 2.13. Les courbes granulométriques des sables SD corrigés avec le sable SC KI

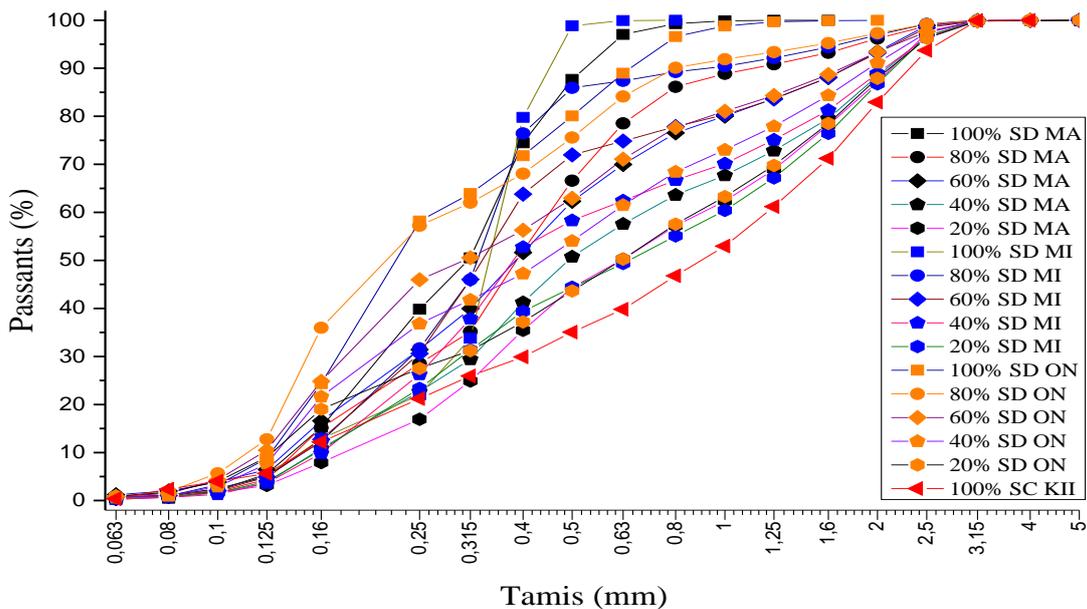


Figure 2.14. Les courbes granulométriques des sables SD corrigés avec le sable SC KII

D'après ces deux figures, nous pouvons remarquer que :

- ✓ Pour les trois types de sables de dunes étudiés, l'ajout du sable concassé SC KI avec un taux variant de 20% à 80%, provoque un changement intéressant dans les courbes granulométriques des sables corrigés, ce changement influe directement sur la quantité des grains fins et grossiers ;

- ✓ Les grains des sables corrigés ayant un diamètre compris entre 0.063mm et 0.635mm sont distribués de la même manière et le pourcentage des tamisât cumulés ne dépasse pas 61%.
- ✓ La distribution des grains, de diamètre compris entre 2.5 et 5mm, est unique pour les trois sables corrigés.
- ✓ Avec des diamètres de grains compris entre 0.635mm et 2.5mm, il existe une variation granulaire, ce qui signifie que les sables étudiés sont différents.
- ✓ Le fuseau de la distribution granulaire des sables corrigés avec le sable SC KI est très vaste par rapport au sable SC KII, lorsque le SC KI contient des grains plus grossiers que ceux du SC KII.

2.4.Conclusion :

D'après les résultats des essais effectués sur les sables de dunes et les sables concassés ainsi que sur les sables corrigés, nous pouvons conclure que :

- Les sables de dunes sont propres mais la distribution granulaire est très serrée et la courbe granulométrique est mal graduée, ce qui influe sur la continuité d'un mélange granulaire ;
- Le module de finesse de chaque sable de dunes, ne répond pas aux exigences des normes ;
- La forme du sable concassé est plus anguleuse et la texture de sa surface est plus rugueuse que celle du sable naturel ;
- Le sable concassé contient beaucoup plus de fines (particules inférieures à 80 μm). En conséquence, la maniabilité du béton frais est altérée par le besoin d'eau plus élevé.

Après la correction du sable de dunes avec un taux de sable concassé variant entre 20% et 80%, nous avons constaté que :

- Les valeurs du module de finesse augmentent progressivement de 1.5 à 3.0 à cause du mélange binaire des deux sables de dunes et concassés ;
- Il y'a une amélioration de la distribution granulaire des sables corrigés par rapport au sable non corrigé (100% SD et 100% SC) ;

Pour connaître les meilleures propositions des sables corrigés, nous proposons utiliser les différents mélanges granulaires dans les formulations des bétons et les mortiers et faire des essais aux états frais et durci.

En effet et après avoir détaillé, dans ce chapitre 2, la caractérisation des matériaux utilisés et en particulier celle des sables, nous essayerons, dans le chapitre 3 suivant, en premier lieu de

justifier notre choix de la méthode de formulation du béton "Dreux". Nous poursuivrons, en deuxième lieu, notre programme de recherche en faisant varier les taux pondéraux des différents sables introduits dans le béton. Nous comparons à la fin entre les principales propriétés obtenues sur les bétons aux états frais et durci pour pouvoir justifier scientifiquement ce que c'est une formulation optimale vis-à-vis de l'économie, de la résistance, de l'environnement...etc.

Chapitre 3 :
Formulation et caractérisations
des bétons contenant du sable
corrigé

3.1. Introduction :

L'étude de la formulation d'un béton est basée essentiellement sur la sélection de ses constituants et leurs proportions, ainsi que sur les propriétés ciblées, à l'état frais (l'ouvrabilité) et à l'état durci (la résistance mécanique). L'objectif de notre programme expérimental est d'élaborer une composition optimale d'un béton ordinaire avec l'utilisation des matériaux locaux, qui soit la plus économique possible et qui donne les propriétés désirées. L'étude est principalement axée sur le mélange sable de dunes + sable concassé + granulat.

Plusieurs études ont été effectuées sur les bétons ordinaires dans le but de déterminer leurs compositions optimales, leurs caractéristiques et leurs comportements rhéologiques [87]. Ces études ont pu prouver que le béton à base de sable de dunes pourrait remplacer avantageusement le béton ordinaire dans certains secteurs du bâtiment et des travaux publics.

On sait que la qualité du sable dans un mélange du béton a une influence très importante sur la qualité du béton. Elle influence directement son ouvrabilité, sa durabilité et sa résistance [51].

La thématique traitée dans cette thèse repose sur la valorisation du sable de dunes en corrigeant sa granulométrie très fine avec du sable concassé artificiel, afin de fabriquer un béton ordinaire à base de sable corrigé (% sable de dunes + % sable concassé) ayant une granulométrie acceptable selon les normes en vigueur.

Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé par l'identification des caractéristiques physico-mécaniques et chimiques des granulats utilisés, les résultats ont été détaillés dans le chapitre précédent.

Dans ce chapitre, nous essayons de déterminer, par la méthode graphique de Dreux-Gorisse, les différentes proportions des constituants de chaque béton étudié.

Il s'agit donc de corriger la granulométrie du sable de dunes, qui est généralement mal étalée, par l'ajout de sable concassé. Les compositions du béton étudiées sont déterminées en substituant le sable de dunes par le sable concassé, à différentes teneurs pondérales 20%, 40%, 60%, 80%, 100%.

3.2. Calcul approché de la formulation des bétons :

Nous déterminons les proportions de chaque constituant du béton formulé par la méthode Dreux-Gorisse. La méthode consiste à déterminer le rapport E/C qui varie selon la résistance désirée et l'ouvrabilité souhaitée.

3.3. Plan expérimental :

Pour atteindre notre objectif d'étudier l'influence du sable de dunes, du sable concassé ainsi que du sable corrigé, sur les propriétés du béton à l'état frais (la densité et l'ouvrabilité) et à l'état durci (la densité et la résistance mécanique à la compression), nous présentons notre programme expérimental, sous forme d'organigrammes présentés en figures 3.1 et 3.2.

Les bétons sont formulés sur la base de taux du sable de dunes dans le sable corrigé (80%, 60%, 40%, 20% et 0%) et sur l'étendue granulaire du granulat (25mm et 15mm). Ce programme expérimental est répété pour les trois sables des dunes et pour les deux types des granulats concassés.

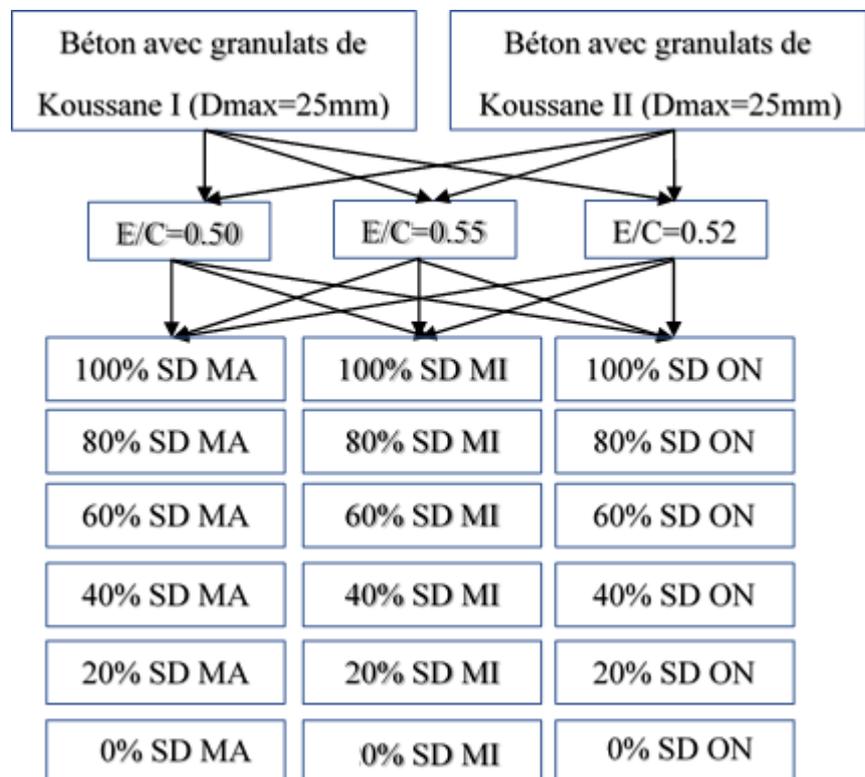


Figure 3.1. Organigramme des bétons étudiés (Dmax=25mm)

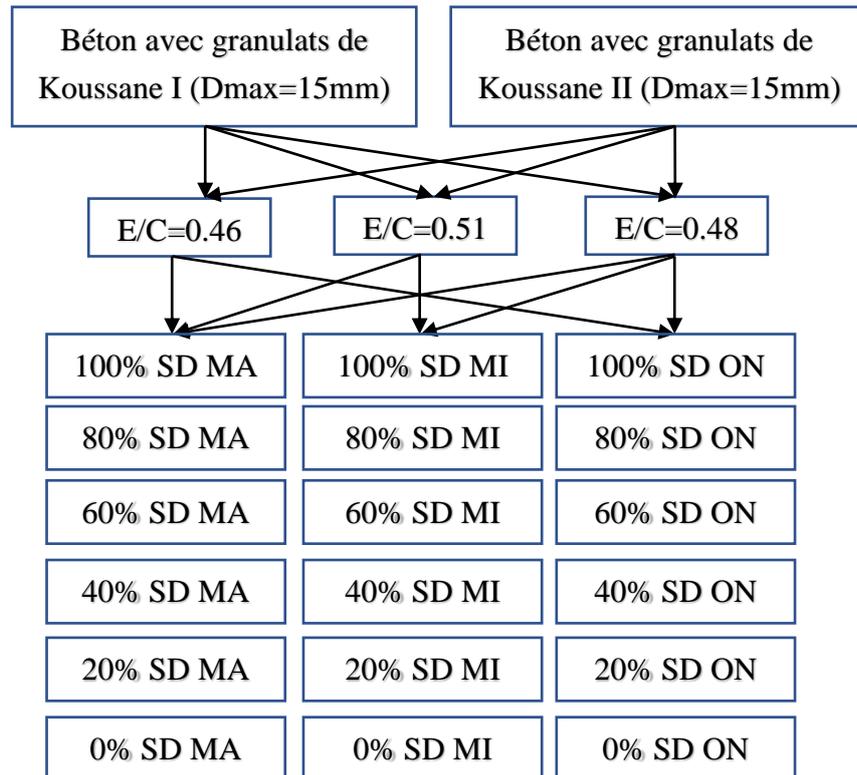


Figure 3.2. Organigramme des bétons étudiés (Dmax=15mm)

3.4. Étude de la formulation du béton :

3.4.1. Étendue granulaire : (Dmax=25mm)

Selon (Festa et Dreux) [8], la dimension maximale Dmax du granulat est limitée à cause de plusieurs facteurs, liés (à l'épaisseur de l'élément, à la densité de ferrailage, à la mise en œuvre et au risque de ségrégation...etc.

3.4.1.1. Type de granulat : granulats Koussane I (KI)

3.4.1.1.1. La consistance ciblée : béton ferme (affaissement=4 cm et E/C=0.50)

Le tableau 3.1 présente les différentes proportions des bétons étudiés selon les taux des trois sables corrigés.

Tableau 3.1. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane I et les sables de dunes ($C=390 \text{ kg/m}^3$) ($D_{\max}=25\text{m}$)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2 : CA3)		
	Béton KI et SD MA	Béton KI et SD MI	Béton KI et SD ON
B-0.50-100%	1 : 1.24 : 0.57 : 0.57 : 2.37	1 : 1.23 : 0.62 : 0.61 : 2.27	1 : 1.28 : 0.52 : 0.57 : 2.37
B-0.50-80%	1 : 1.37 : 0.47 : 0.66 : 2.23	1 : 1.36 : 0.47 : 0.66 : 2.23	1 : 1.32 : 0.47 : 0.61 : 2.32
B-0.50-60%	1 : 1.51 : 0.47 : 0.61 : 2.13	1 : 1.50 : 0.43 : 0.66 : 2.13	1 : 1.45 : 0.47 : 0.61 : 2.18
B-0.50-40%	1 : 1.57 : 0.51 : 0.60 : 1.89	1 : 1.63 : 0.46 : 0.55 : 1.93	1 : 1.52 : 0.46 : 0.60 : 1.98
B-0.50-20%	1 : 1.61 : 0.51 : 0.64 : 1.80	1 : 1.66 : 0.46 : 0.60 : 1.84	1 : 1.60 : 0.51 : 0.64 : 1.80
B-0.50-100% SC KI	1 : 1.69 : 0.51 : 0.64 : 1.70	1 : 1.69 : 0.51 : 0.64 : 1.70	1 : 1.69 : 0.51 : 0.64 : 1.70

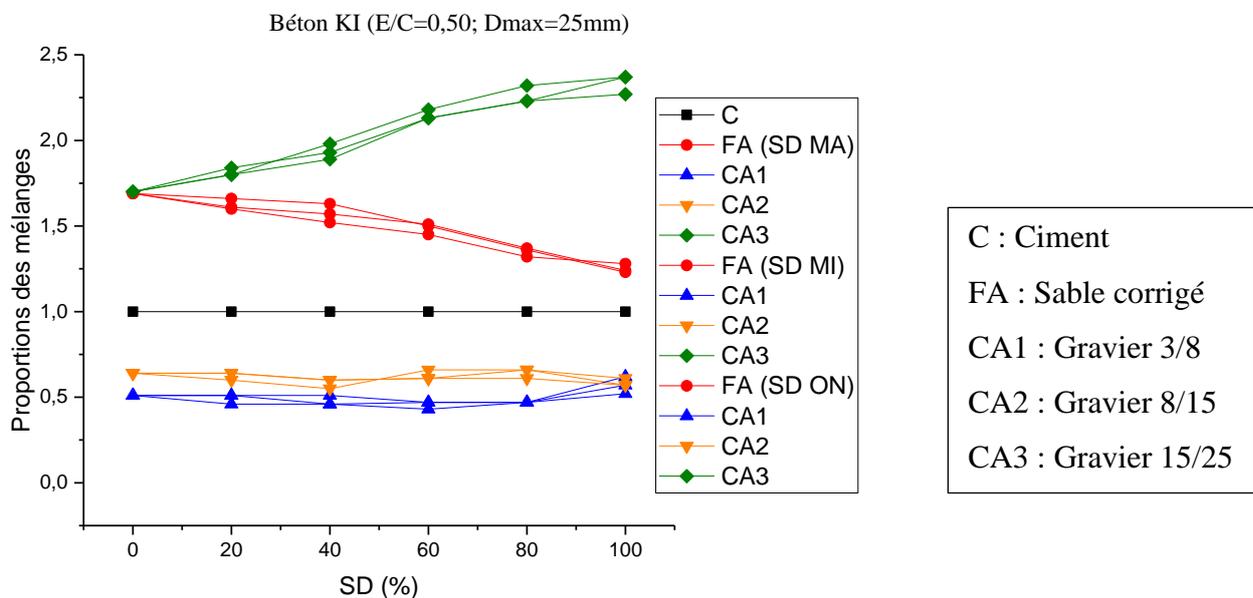


Figure 3.3. Proportions des mélanges du béton avec granulats KI et les sables corrigés

D'après ces résultats, nous avons constaté que :

- Nous remarquons que les proportions des granulats (CA1 et CA2) sont inférieures à 1, elles sont presque les mêmes pour tous les mélanges ;
- Il y'a augmentation de gros granulats (CA3 : gravier 15/25), cette augmentation est liée à la diminution des éléments fins des granulats (FA) ;
- Les proportions des (FA et CA3) sont supérieures au dosage obtenu du ciment.
- L'augmentation de taux de sable de dune dans le sable corrigé influe directement sur les proportions des éléments fins des (FA) et éléments gros des (CA3).

3.4.1.1.2. La consistance ciblée : béton plastique (affaissement=8 cm)

Les proportions des bétons de granulats KI et des trois sables corrigés sont présentées dans le tableau 3.2 ci-dessous.

Tableau 3.2. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane I et les sables de dunes (C=380 kg/m³)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2 : CA3)		
	Béton KI et SD MA	Béton KI et SD MI	Béton KI et SD ON
B-0.55-100%	1 : 1.30 : 0.62 : 0.62 : 2.25	1 : 1.29 : 0.67 : 0.62 : 2.20	1 : 1.30 : 0.57 : 0.67 : 2.25
B-0.55-80%	1 : 1.48 : 0.53 : 0.57 : 2.20	1 : 1.47 : 0.48 : 0.62 : 2.20	1 : 1.43 : 0.48 : 0.62 : 2.25
B-0.55-60%	1 : 1.57 : 0.53 : 0.62 : 2.06	1 : 1.56 : 0.48 : 0.62 : 2.10	1 : 1.51 : 0.53 : 0.62 : 2.10
B-0.55-40%	1 : 1.63 : 0.51 : 0.65 : 1.81	1 : 1.58 : 0.51 : 0.65 : 1.86	1 : 1.58 : 0.51 : 0.65 : 1.86
B-0.55-20%	1 : 1.67 : 0.56 : 0.65 : 1.72	1 : 1.67 : 0.51 : 0.65 : 1.76	1 : 1.66 : 0.56 : 0.65 : 1.72
B-0.55-100% SC KI	1 : 1.75 : 0.56 : 0.65 : 1.63	1 : 1.75 : 0.56 : 0.65 : 1.63	1 : 1.75 : 0.56 : 0.65 : 1.63

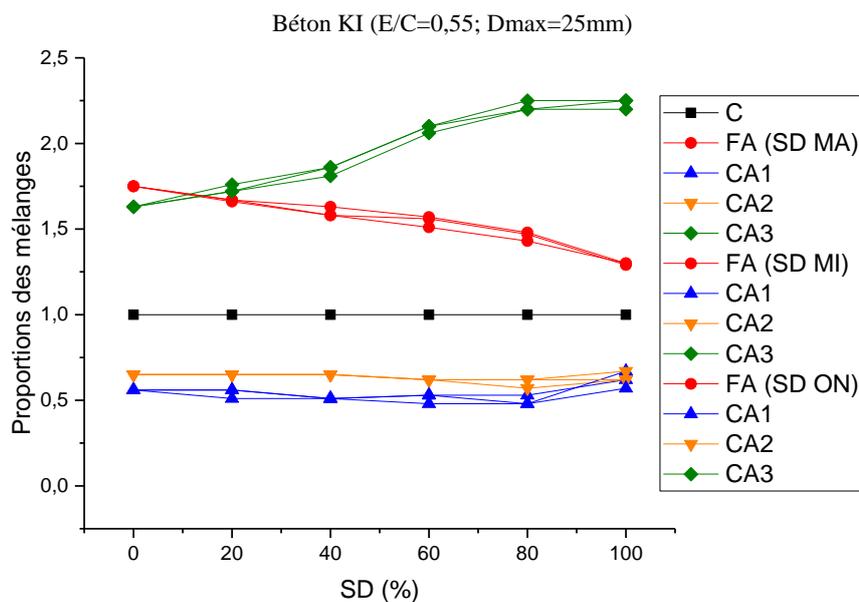


Figure 3.4. Proportions des mélanges du béton avec granulats KI et sables corrigés

D’après les résultats présentés dans le tableau 3.2 et la figure 3.4, nous remarquons que :

- Les proportions des granulats (CA1) sont les plus faibles dans tous les mélanges étudiés ;
- Les mélanges de béton contiennent une quantité de granulats (CA1 et CA2) faible que celle de ciment nécessaire ;

- Les proportions des gros granulats (CA3) sont plus élevées dans tous les mélanges, l'augmentation est constatée avec l'élévation du taux de sable de dune dans les sables corrigés.

3.4.1.1.3. La consistance ciblée : béton très plastique (affaissement=11.5 cm)

Les proportions des constituants pour un béton très plastique et pour un dosage de ciment (425 kg/m³), sont incluses dans le tableau 3.3 suivant.

Tableau 3.3. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane I et les sables de dunes (C=425 kg/m³)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2 : CA3)		
	Béton KI et SD MA	Béton KI et SD MI	Béton KI et SD ON
B-0.52-100%	1 : 1.15 : 0.57 : 0.53 : 1.84	1 : 1.14 : 0.57 : 0.53 : 1.84	1 : 1.19 : 0.49 : 0.53 : 1.88
B-0.52-80%	1 : 1.31 : 0.45 : 0.53 : 1.80	1 : 1.30 : 0.45 : 0.53 : 1.80	1 : 1.26 : 0.45 : 0.53 : 1.84
B-0.52-60%	1 : 1.39 : 0.49 : 0.49 : 1.72	1 : 1.37 : 0.41 : 0.57 : 1.72	1 : 1.33 : 0.45 : 0.57 : 1.72
B-0.52-40%	1 : 1.43 : 0.48 : 0.55 : 1.47	1 : 1.38 : 0.48 : 0.55 : 1.51	1 : 1.38 : 0.48 : 0.55 : 1.51
B-0.52-20%	1 : 1.50 : 0.48 : 0.55 : 1.39	1 : 1.51 : 0.48 : 0.51 : 1.43	1 : 1.49 : 0.48 : 0.55 : 1.39
B-0.52-100% SC KI	1 : 1.57 : 0.48 : 0.55 : 1.31	1 : 1.57 : 0.48 : 0.55 : 1.31	1 : 1.57 : 0.48 : 0.55 : 1.31

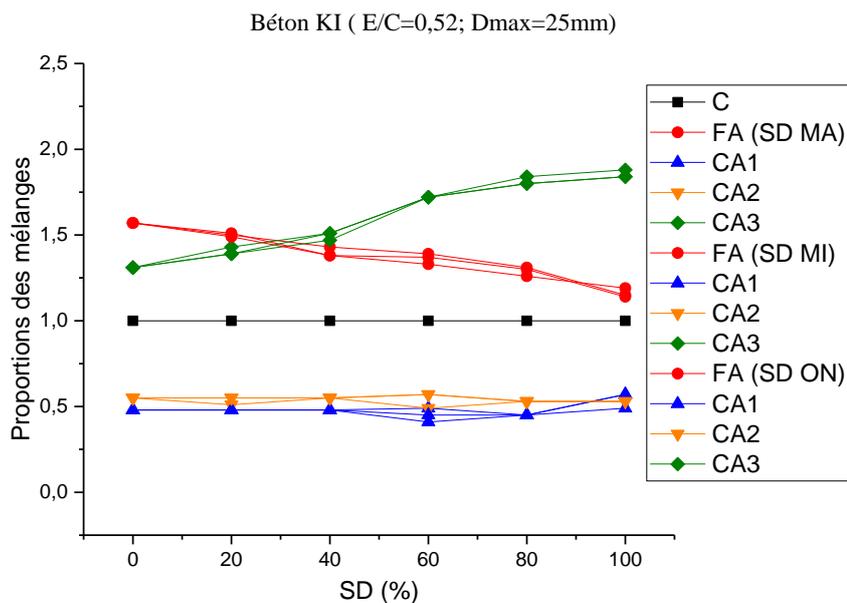


Figure 3.5. Proportions des mélanges du béton avec granulats KI et sables corrigés

D’après les résultats détaillés dans le tableau ci-dessus, nous constatons que :

- Dans les mélanges ayant un taux de 0% et 20% de sable de dunes, les proportions des granulats (FA) sont supérieures à celles des gros granulats (CA3) ;
- Dans les autres mélanges ayant un taux de sable de dune supérieur à 40%, les proportions des gros granulats dans les bétons étudiés sont les plus importantes ;
- La proportion des gros granulats augmente avec l’augmentation du taux de sable de dune, par contre il y’a diminution de celle des grains fins (FA).

3.4.1.2.Type de granulat : granulats Koussane II (KII)

3.4.1.2.1. La consistance ciblée : béton ferme (affaissement=4 cm et E/C=0.50)

Le tableau 3.4 présente les proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane II et les différents taux des sables corrigés.

Tableau 3.4. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane II et les sables de dunes (C=390 kg/m³)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2 : CA3)		
	Béton KII et SD MA	Béton KII et SD MI	Béton KII et SD ON
B-0.50-100%	1 : 1.23 : 0.56 : 0.98 : 1.94	1 : 1.23 : 0.56 : 0.98 : 1.94	1 : 1.19 : 0.51 : 0.93 : 2.08
B-0.50-80%	1 : 1.42 : 0.46 : 0.98 : 1.85	1 : 1.37 : 0.46 : 0.93 : 1.94	1 : 1.29 : 0.46 : 0.93 : 1.99
B-0.50-60%	1 : 1.46 : 0.46 : 0.93 : 1.85	1 : 1.46 : 0.46 : 0.93 : 1.85	1 : 1.38 : 0.46 : 0.93 : 1.90
B-0.50-40%	1 : 1.60 : 0.45 : 0.90 : 1.61	1 : 1.56 : 0.45 : 0.90 : 1.66	1 : 1.47 : 0.45 : 0.95 : 1.66
B-0.50-20%	1 : 1.56 : 0.50 : 0.90 : 1.57	1 : 1.57 : 0.50 : 0.90 : 1.57	1 : 1.56 : 0.45 : 0.90 : 1.61
B-0.50-100% SC KII	1 : 1.62 : 0.50 : 1.22 : 1.20	1 : 1.62 : 0.50 : 1.22 : 1.20	1 : 1.62 : 0.50 : 1.22 : 1.20

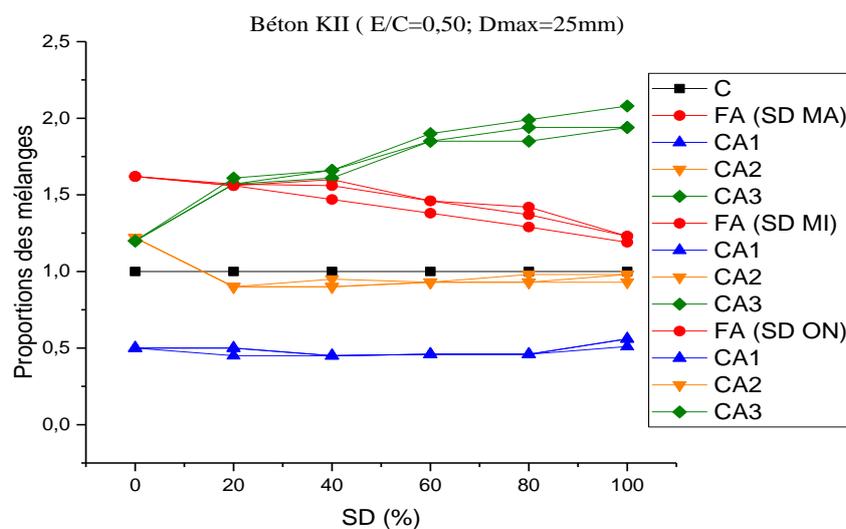


Figure 3.6. Proportions des mélanges du béton avec granulats KII et sables corrigés

D'après la figure 3.6, nous remarquons que :

- Les proportions des granulats (CA2) sont presque superposées sur le ciment, ce qui signifie que ces mélanges contiennent une quantité de (CA2) égale à celle du ciment ;
- La proportion des grains fins (FA) diminue linéairement avec l'augmentation de taux de sable de dune, par contre la proportion des gros grains (CA3) augmente progressivement ;
- Les proportions des grains (CA1) sont égales à la moitié de la quantité de ciment (0.5).

3.4.1.2.2. La consistance ciblée : béton plastique (affaissement=8 cm et E/C=0.55)

Les proportions des bétons plastiques ayant un dosage de ciment ($C=380 \text{ kg/m}^3$) sont détaillées dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 3.5. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane II et sables de dunes ($C=380 \text{ kg/m}^3$)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2 : CA3)		
	Béton KII et SD MA	Béton KII et SD MI	Béton KII et SD ON
B-0.55-100%	1 : 1.29 : 0.56 : 0.99 : 1.91	1 : 1.29 : 0.61 : 0.94 : 1.91	1 : 1.30 : 0.52 : 0.99 : 1.96
B-0.55-80%	1 : 1.48 : 0.52 : 0.99 : 1.77	1 : 1.43 : 0.52 : 0.94 : 1.87	1 : 1.39 : 0.47 : 0.94 : 1.91
B-0.55-60%	1 : 1.52 : 0.52 : 0.99 : 1.72	1 : 1.52 : 0.47 : 0.99 : 1.77	1 : 1.48 : 0.47 : 0.94 : 1.82
B-0.55-40%	1 : 1.67 : 0.50 : 0.91 : 1.53	1 : 1.62 : 0.50 : 0.91 : 1.58	1 : 1.53 : 0.50 : 0.96 : 1.58
B-0.55-20%	1 : 1.62 : 0.55 : 0.91 : 1.49	1 : 1.63 : 0.50 : 0.91 : 1.53	1 : 1.62 : 0.50 : 0.91 : 1.53
B-0.55-100% SC KII	1 : 1.68 : 0.50 : 0.96 : 1.44	1 : 1.68 : 0.50 : 0.96 : 1.44	1 : 1.68 : 0.50 : 0.96 : 1.44

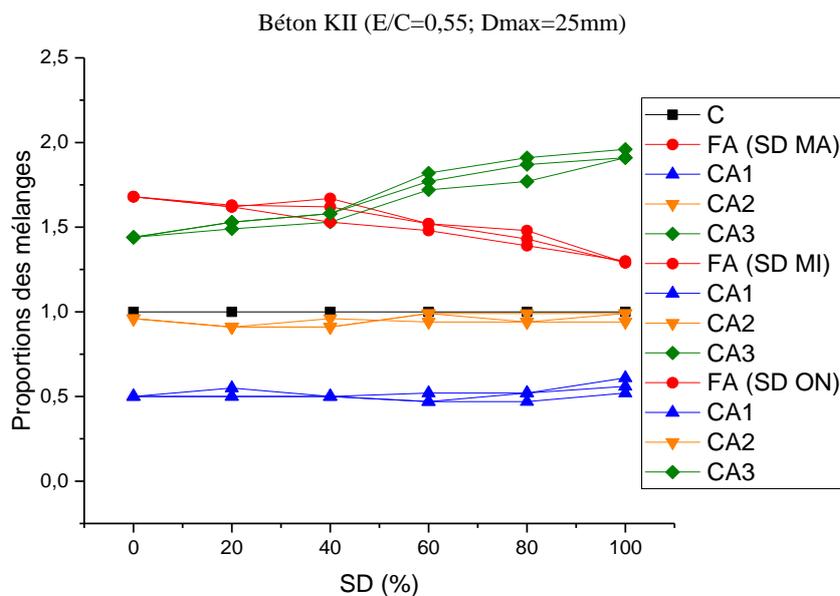


Figure 3.7. Proportions des mélanges du béton avec granulats KII et sables corrigés

D'après le tableau 3.5 et la figure 3.7, nous pouvons constater que :

- Les proportions des granulats (CA1) sont égales à 0.5, par rapport aux quantités de ciment calculé (1) ;
- Ces mélanges contiennent une quantité de granulats (CA2) presque égale à celle du ciment ;
- Pour les deux mélanges béton avec granulats de KI et béton avec granulats KII avec un taux de sable des dunes (0%, 20% et 40%), les proportions des granulats (FA) sont supérieures à celles des granulats (CA3) ;
- Les proportions des granulats (CA3) augmentent progressivement et celles des granulats (FA) diminuent.

3.4.1.2.3. La consistance ciblée : béton très plastique (affaissement=11.5 cm et E/C=0.52)

Les proportions des mélanges du béton avec les granulats Koussane II et les différents taux de sable des dunes correspondant à un béton très plastique sont présentés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane II et les sables des dunes (C=425 kg/m³)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2 : CA3)		
	Béton KII et SD MA	Béton KII et SD MI	Béton KII et SD ON
B-0.52-100%	1 : 1.14 : 0.52 : 0.80 : 1.59	1 : 1.14 : 0.52 : 0.84 : 1.55	1 : 1.15 : 0.48 : 0.80 : 1.64
B-0.52-80%	1 : 1.34 : 0.44 : 0.80 : 1.47	1 : 1.30 : 0.44 : 0.80 : 1.51	1 : 1.23 : 0.44 : 0.80 : 1.55
B-0.52-60%	1 : 1.39 : 0.44 : 0.80 : 1.43	1 : 1.39 : 0.40 : 0.84 : 1.43	1 : 1.31 : 0.40 : 0.84 : 1.47
B-0.52-40%	1 : 1.46 : 0.43 : 0.78 : 1.27	1 : 1.46 : 0.43 : 0.78 : 1.27	1 : 1.38 : 0.43 : 0.78 : 1.31
B-0.52-20%	1 : 1.46 : 0.43 : 0.78 : 1.23	1 : 1.47 : 0.43 : 0.78 : 1.23	1 : 1.46 : 0.43 : 0.78 : 1.23
B-0.52-100% SC KII	1 : 1.47 : 0.47 : 0.78 : 1.19	1 : 1.47 : 0.47 : 0.78 : 1.19	1 : 1.47 : 0.47 : 0.78 : 1.19

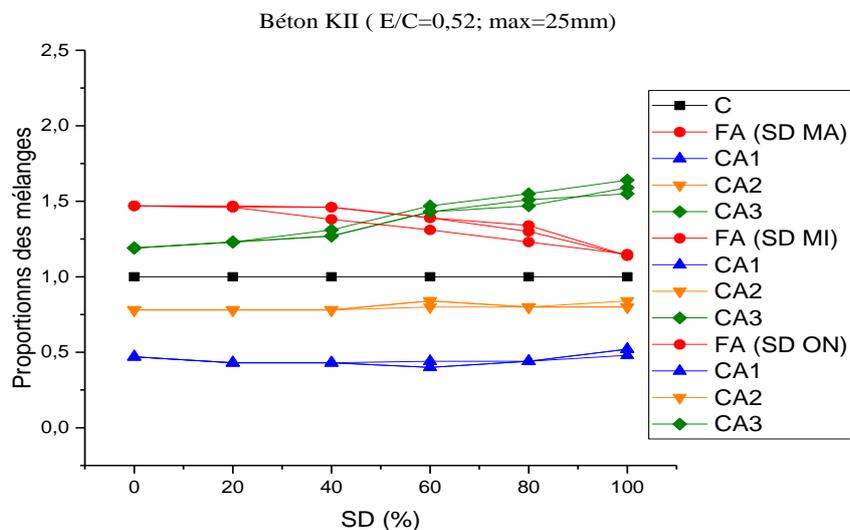


Figure 3.8. Proportions des mélanges du béton avec granulats KII et sables corrigés

D'après les résultats obtenus, nous constatons que :

- Les proportions des granulats (CA2) sont presque les mêmes, elles sont égales à 0.75 correspondant au dosage du ciment ($C=425 \text{ kg/m}^3$) ;
- Pour les mélanges ayant un taux de (0%, 20% et 40%), les proportions des granulats (FA) sont supérieures à celles des granulats (CA3);
- Ces mélanges contiennent les mêmes proportions de granulats (CA1), qui sont égales à la moitié de la quantité de ciment.

3.4.2. Étendue granulaire : ($D_{\max}=15\text{mm}$)

3.4.2.1. Type de granulat : granulats de Koussane I (KI)

3.4.2.1.1. La consistance ciblée : béton ferme (affaissement=4 cm et $E/C=0.46$)

Les bétons étudiés ayant un agrégat avec $D_{\max}=15\text{mm}$, contiennent trois types de granulats (sable corrigée, gravier 3/8mm et gravier 8/15mm). Le tableau 3.7 présente les proportions des constituants en fonction du sable de dunes et le taux des sables corrigés.

Tableau 3.7. Proportions des constituants des bétons avec les granulats Koussane I et les sables de dunes ($C=447.20 \text{ kg/m}^3$)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2)		
	Béton KI et SD MA	Béton KI et SD MI	Béton KI et SD ON
B-0.46-100%	1 : 1.15 : 0.54 : 2.21	1 : 1.14 : 0.54 : 2.21	1 : 1.15 : 0.47 : 2.29
B-0.46-80%	1 : 1.31 : 0.43 : 2.18	1 : 1.30 : 0.43 : 2.18	1 : 1.26 : 0.43 : 2.21
B-0.46-60%	1 : 1.42 : 0.43 : 2.06	1 : 1.41 : 0.39 : 2.10	1 : 1.37 : 0.43 : 2.10
B-0.46-40%	1 : 1.46 : 0.45 : 1.85	1 : 1.51 : 0.41 : 1.85	1 : 1.42 : 0.45 : 1.88
B-0.46-20%	1 : 1.53 : 0.45 : 1.77	1 : 1.54 : 0.41 : 1.81	1 : 1.49 : 0.49 : 1.77
B-0.46-100% SC KI	1 : 1.56 : 0.49 : 1.70	1 : 1.56 : 0.49 : 1.70	1 : 1.56 : 0.49 : 1.70

D'après le tableau 3.7 et la figure 3.9, nous pouvons remarquer que :

- Il y'a une croissance entre les proportions des granulats fin et granulats grossier ;
- Les taux des gros granulats (CA2) augmentent avec la croissance du taux de sable de dunes, par contre les taux des granulats fins diminuent ;
- Le taux des proportions des granulats (FA et CA) est supérieur à 1, mais celui des proportions des granulats (CA1) est égal 0.5.

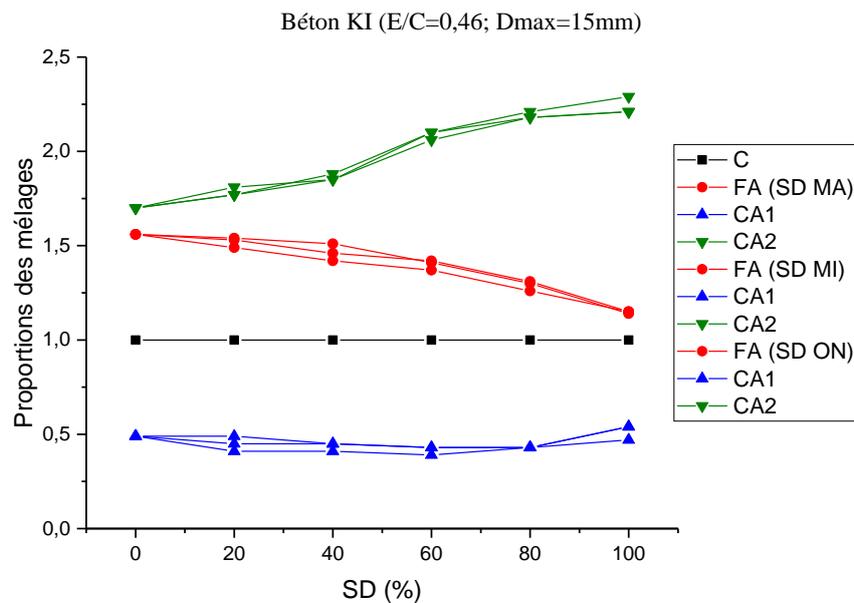


Figure 3.9. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KI et des sables corrigés (E/C=0,46 ; Dmax=15mm)

3.4.2.1.2. La consistance ciblée : béton plastique (affaissement=8 cm et E/C=0.51)

Les proportions des granulats (FA, CA1 et CA2) pour les mélanges du béton en fonction des granulats Koussane I et pour un dosage de ciment (C=436.80kg/m³), sont présentées dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane I et des sables des dunes (C=436.80 kg/m³)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2)		
	Béton KI et SD MA	Béton KI et SD MI	Béton KI et SD ON
B-0.51-100%	1 :1.24 :0.55 :2.15	1 :1.19 :0.59 :2.15	1 :1.20 :0.51 :2.23
B-0.51-80%	1 :1.36 :0.47 :2.11	1 :1.34 :0.47 :2.11	1 :1.31 :0.47 :2.15
B-0.51-60%	1 :1.47 :0.47 :1.99	1 :1.46 :0.43 :2.03	1 :1.42 :0.47 :2.03
B-0.51-40%	1 :1.50 :0.49 :1.78	1 :1.55 :0.45 :1.78	1 :1.46 :0.49 :1.82
B-0.51-20%	1 :1.58 :0.49 :1.71	1 :1.59 :0.45 :1.74	1 :1.57 :0.49 :1.71
B-0.51-100% SC KI	1 :1.64 :0.49 :1.63	1 :1.64 :0.49 :1.63	1 :1.64 :0.49 :1.63

Le tableau 3.8 et la figure 3.10 montrent que :

- Ces mélanges du béton contiennent une proportion de granulats (CA1), presque identique à celles des autres bétons étudiés ;
- Les proportions des granulats (FA et CA2) sont supérieures à celle du dosage de ciment.

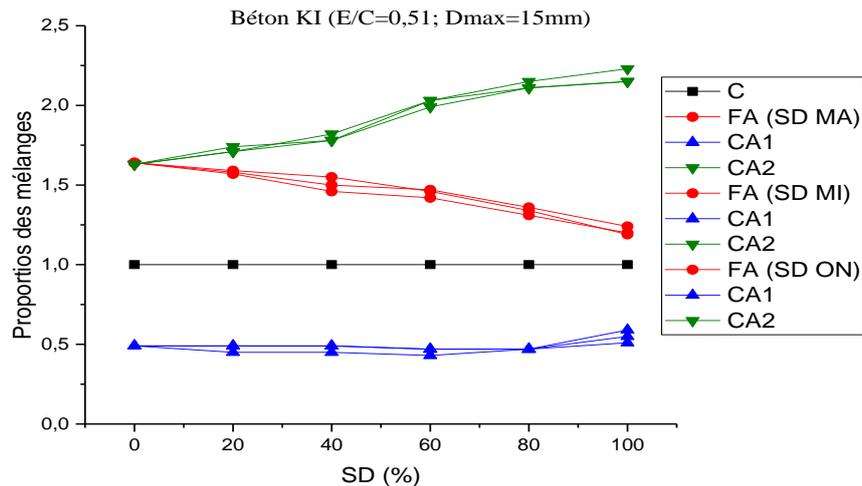


Figure 3.10. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KI et des sables corrigés (E/C=0,51 ; Dmax=15mm)

3.4.2.1.3. La consistance ciblée : béton très plastique (affaissement=11.5 cm et E/C=0.48)

Le tableau 3.9 présente les proportions des constituants des bétons préparés avec les granulats Koussane I et les sables des dunes corrigés.

Tableau 3.9. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane I et des sables de dunes (C=474.24 kg/m³)

Type des bétons	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2)		
	Béton KI et SD MA	Béton KI et SD MI	Béton KI et SD ON
B-0.48-100%	1 : 1.13 : 0.52 : 1.83	1 : 1.09 : 0.55 : 1.83	1 : 1.09 : 0.48 : 1.90
B-0.48-80%	1 : 1.27 : 0.41 : 1.79	1 : 1.26 : 0.41 : 1.79	1 : 1.23 : 0.41 : 1.83
B-0.48-60%	1 : 1.37 : 0.41 : 1.69	1 : 1.36 : 0.38 : 1.73	1 : 1.32 : 0.41 : 1.73
B-0.48-40%	1 : 1.39 : 0.43 : 1.50	1 : 1.44 : 0.40 : 1.50	1 : 1.35 : 0.43 : 1.54
B-0.48-20%	1 : 1.46 : 0.43 : 1.44	1 : 1.46 : 0.40 : 1.47	1 : 1.45 : 0.43 : 1.44
B-0.48-100% SC KI	1 : 1.48 : 0.47 : 1.37	1 : 1.48 : 0.47 : 1.37	1 : 1.48 : 0.47 : 1.37

La figure 3.11 ci-dessous montre que :

- Les proportions des granulats (CA1) sont presque constantes pour tous les mélanges, ils sont inférieurs que la proportion de ciment ;
- Les granulats (FA) et (CA2) présentent des proportions supérieures que le ciment ;
- Nous remarquons que les proportions des granulats fins diminuent avec l’augmentation de taux de sables de dunes, par contre que les proportions des gros granulats augmentent avec l’augmentation du taux de sable de dunes dans le sable corrigé.

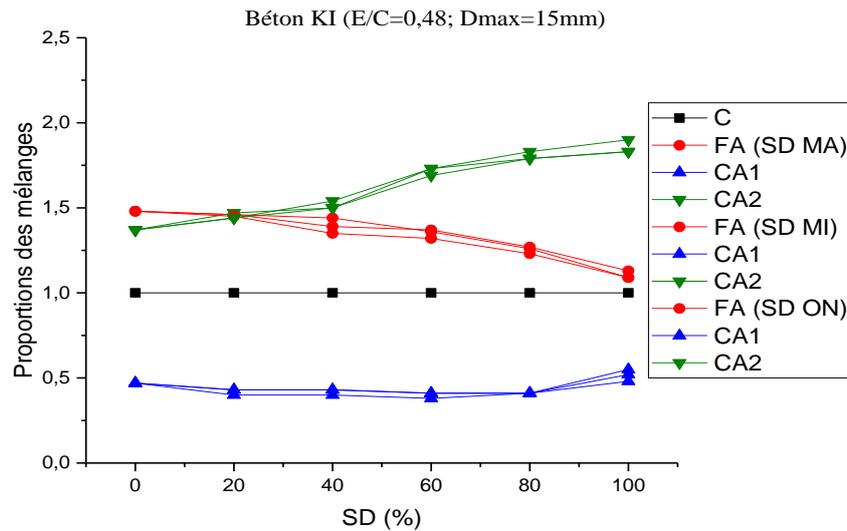


Figure 3.11. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulates KI et des sables corrigés (E/C=0,48 ; Dmax=15mm)

3.4.2.2. Type de granulat : granulates Koussane II (KII)

3.4.2.2.1. La consistance ciblée : béton ferme (affaissement=4 cm et E/C=0.46)

Les proportions des granulates (FA, CA1 et CA2) pour les mélanges du béton en fonction des granulates Koussane II et pour un dosage de ciment (C=447.20 kg/m³), sont présentées dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulates Koussane II et des sables de dunes (C=447.20 kg/m³)

Type des bétons (Dmax=15mm)	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2)		
	Béton KII et SD MA	Béton KII et SD MI	Béton KII et SD ON
B-0.46-100%	1 :1.14 :0.51 :2.25	1 :1.14 :0.51 :2.25	1 :1.11 :0.47 :2.33
B-0.46-80%	1 :1.34 :0.43 :2.14	1 :1.26 :0.43 :2.21	1 :1.19 :0.43 :2.25
B-0.46-60%	1 :1.38 :0.39 :2.14	1 :1.38 :0.39 :2.14	1 :1.31 :0.39 :2.18
B-0.46-40%	1 :1.45 :0.45 :1.88	1 :1.45 :0.41 :1.92	1 :1.38 :0.41 :1.96
B-0.46-20%	1 :1.45 :0.45 :1.85	1 :1.46 :0.45 :1.85	1 :1.45 :0.41 :1.88
B-0.46-100% SC KII	1 :1.50 :0.45 :1.81	1 :1.50 :0.45 :1.81	1 :1.50 :0.45 :1.81

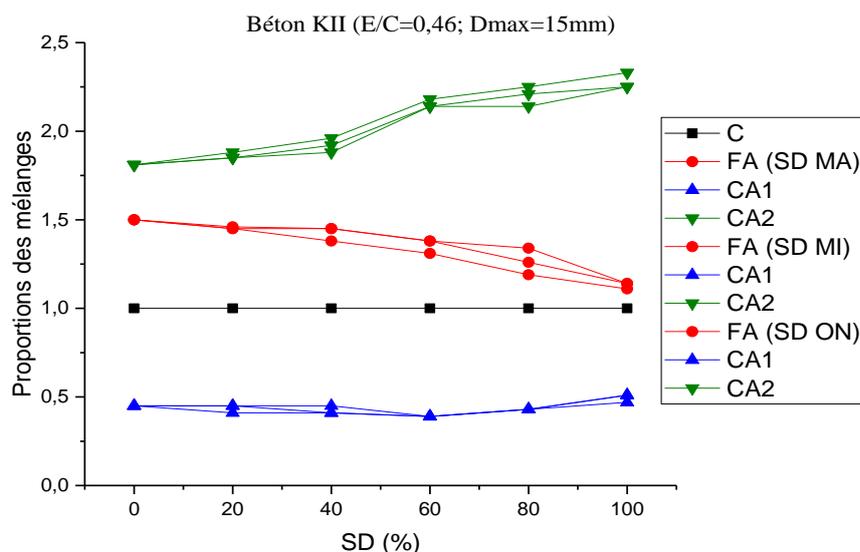


Figure 3.12. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KII et des sables corrigés (E/C=0,46 ; Dmax=15mm)

D’après les résultats présentés dans la figure 3.12, nous pouvons conclure que :

- Les proportions des granulats (CA2) sont supérieures à 1.75 et les proportions des granulats (FA) inférieurs à 1.5 ;
- Pour les granulats (CA1), les proportions des granulats dans les mélanges sont presque constant est égale 0.5.

3.4.2.2.2. La consistance ciblée : béton plastique (affaissement=8 cm et E/C=0.51)

Les résultats des proportions obtenus des mélanges en fonction des granulats Koussane II et des sables corrigés avec un dosage de ciment (C=436.80 kg/m³) sont présentés dans le tableau 3.11 ci-dessous.

Tableau 3.11. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane II et des sables des dunes (C=436.80 kg/m³)

Type des bétons (Dmax=15mm)	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2)		
	Béton KII et SD MA	Béton KII et SD MI	Béton KII et SD ON
B-0.51-100%	1 :1.19 :0.55 :2.19	1 :1.19 :0.55 :2.19	1 :1.20 :0.47 :2.27
B-0.51-80%	1 :1.39 :0.47 :2.07	1 :1.35 :0.43 :2.15	1 :1.28 :0.43 :2.19
B-0.51-60%	1 :1.43 :0.43 :2.07	1 :1.43 :0.43 :2.07	1 :1.35 :0.43 :2.11
B-0.51-40%	1 :1.54 :0.45 :1.82	1 :1.50 :0.45 :1.86	1 :1.46 :0.42 :1.90
B-0.51-20%	1 :1.54 :0.45 :1.78	1 :1.54 :0.45 :1.78	1 :1.50 :0.45 :1.82
B-0.51-100% SC KII	1 :1.59 :0.45 :1.74	1 :1.59 :0.45 :1.74	1 :1.59 :0.45 :1.74

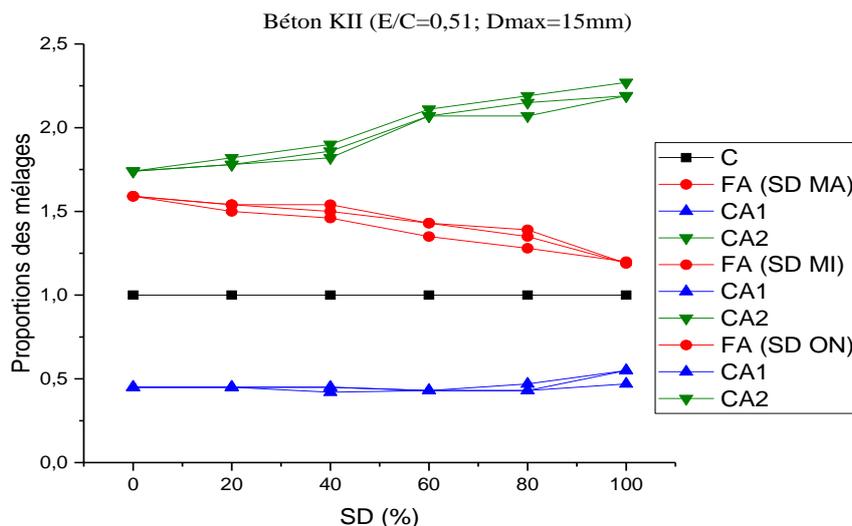


Figure 3.13. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KII et des sables corrigés (E/C=0,51 ; Dmax=15mm)

D’après les résultats mentionnés dans la figure 3.13, nous pouvons conclure que :

- Une augmentation des proportions des granulats grossiers (CA2) de 1.75 à 2.25 et une diminution des granulats fins (FA) de 1.50 à 1.25 ;
- Les proportions des granulats moyennes (CA1) reste constants, est égale 0.5.

3.4.2.2.3. La consistance ciblée : béton très plastique (affaissement=11.5 cm et E/C=0.48)

Les proportions des constituants (FA, CA1 et CA2) des mélanges en fonction des granulats Koussane II et sables corrigés, sont présentés dans le tableau 3.12.

Tableau 3.12. Proportions des constituants des bétons en fonction des granulats Koussane II et des sables des dunes (C=474.24 kg/m³)

Type des bétons (Dmax=15mm)	Proportions du mélange (C : FA : CA1 : CA2)		
	Béton KII et SD MA	Béton KII et SD MI	Béton KII et SD ON
B-0.48-100%	1 : 1.09 : 0.52 : 1.86	1 : 1.09 : 0.52 : 1.86	1 : 1.09 : 0.45 : 1.93
B-0.48-80%	1 : 1.26 : 0.45 : 1.76	1 : 1.23 : 0.41 : 1.83	1 : 1.16 : 0.41 : 1.86
B-0.48-60%	1 : 1.33 : 0.38 : 1.76	1 : 1.30 : 0.41 : 1.76	1 : 1.26 : 0.38 : 1.79
B-0.48-40%	1 : 1.39 : 0.43 : 1.54	1 : 1.39 : 0.40 : 1.57	1 : 1.32 : 0.40 : 1.60
B-0.48-20%	1 : 1.39 : 0.43 : 1.50	1 : 1.39 : 0.43 : 1.50	1 : 1.39 : 0.40 : 1.54
B-0.48-100% SC KII	1 : 1.46 : 0.40 : 1.74	1 : 1.46 : 0.40 : 1.74	1 : 1.46 : 0.40 : 1.74

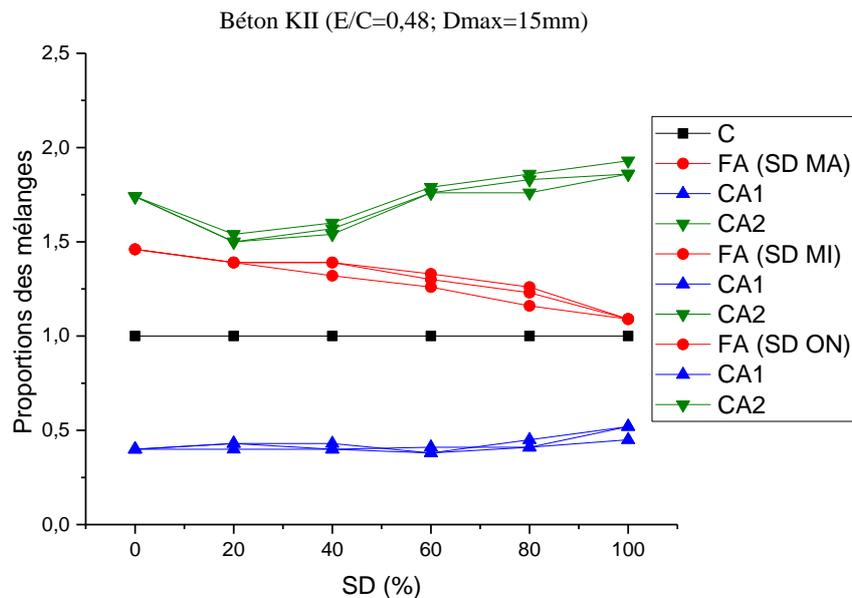


Figure 3.14. Proportions des mélanges du béton en fonction des granulats KII et des sables corrigés (E/C=0,48 ; Dmax=15mm)

D'après le tableau 3.12 et la figure 3.14, nous pouvons constater que :

- Les gros grains (CA2) représentent les proportions importantes et augmentent avec de taux de sable des dunes ;
- Les proportions des grains fins (FA) sont inférieures à celle du ciment et diminuent avec l'augmentation du taux de sable des dunes ;
- Les proportions des grains (CA1) varient linéairement et sont inférieures à 0.5, pour tous les taux de sable de dunes.

3.5. L'influence du sable corrigée sur le rapport G/S

3.5.1. Étendue granulaire 25 mm

3.5.1.1. Béton granulats KI

Les rapports gravillons/sable des bétons étudiés, sont présentés dans le tableau 3.13 ci-dessous pour les bétons du granulat KI et les trois sables de dunes étudiés.

Tableau 3.13. Le rapport G/S pour les bétons du granulat KI et SD (Dmax=25mm)

Béton KI et SD (Dmax=25mm)	Ouvrabilité du Béton	SD MA	SD MI	SD ON
		G/S		
B-100%	F	2.85	2.85	2.70
	P	2.70	2.70	2.70
	TP	2.57	2.57	2.45
B-80%	F	2.45	2.45	2.57
	P	2.23	2.23	2.33
	TP	2.13	2.13	2.23
B-60%	F	2.13	2.13	2.23
	P	2.03	2.03	2.13
	TP	1.94	1.94	2.03
B-40%	F	1.86	1.78	1.94
	P	1.78	1.86	1.86
	TP	1.70	1.78	1.78
B-20%	F	1.78	1.70	1.78
	P	1.70	1.70	1.70
	TP	1.56	1.56	1.56
B-100% SC KI	F	1.63	1.63	1.63
	P	1.56	1.56	1.56
	TP	1.44	1.44	1.44

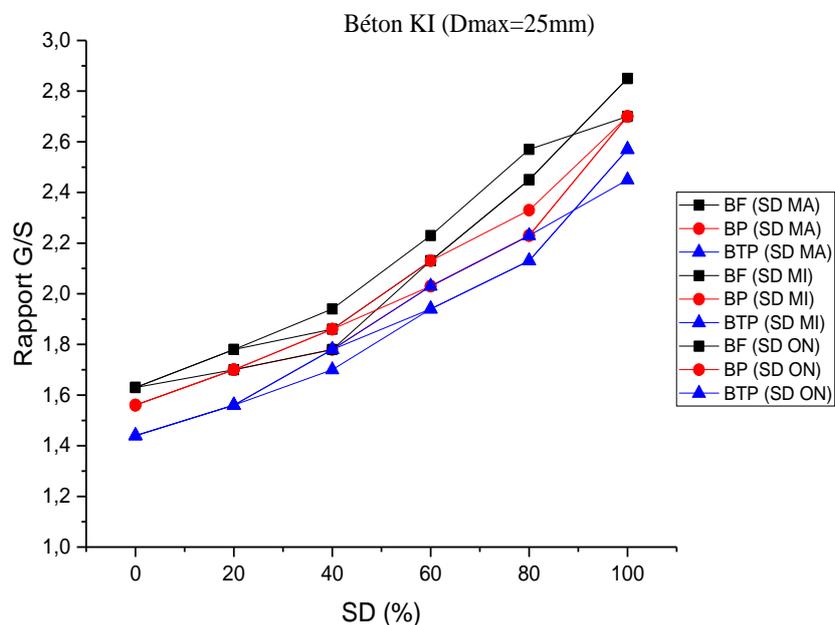


Figure. 3.15. L'influence de taux de sable de dunes sur le rapport G/S (béton KI, Dmax=25mm)

D'après les résultats présentés dans le tableau 3.13 et la figure 3.15, nous constatons que :

- Le rapport G/S des bétons avec les granulats KI et un diamètre maximal de 25mm varie entre 1.4 et 2.85;

- Les valeurs du rapport G/S pour les bétons fermes, sont les plus élevées ;
- Le rapport G/S est lié avec la consistance du béton et le taux de sable de dunes, lorsque ce rapport a une influence directe sur la consistance du béton, selon Dreux, l'ouvrabilité est moins bonne pour un rapport G/S supérieur que 2.2;
- Les bétons très plastiques obtiennent les valeurs plus faibles du rapport G/S ;

3.5.1.2. Béton granulats KII

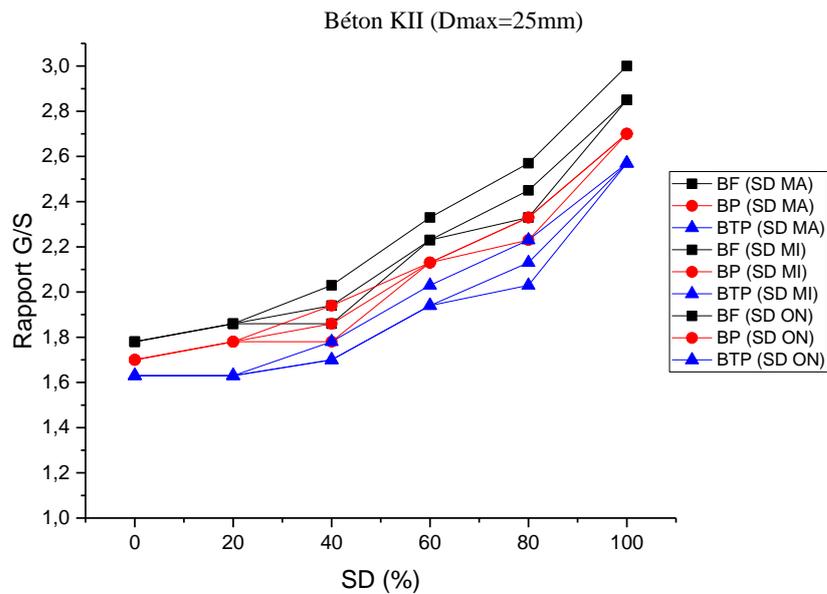
Le tableau ci-dessous présente les valeurs du rapport G/S, pour les bétons de granulats KII et les trois sables de dunes.

Tableau 3.14. Le rapport G/S pour les bétons du granulats KII et SD (Dmax=25mm)

Béton KII et SD (Dmax=25mm)	Ouvrabilité du Béton	SD MA	SD MI	SD ON
		G/S		
B-100%	F	2.85	2.85	3.00
	P	2.70	2.70	2.70
	TP	2.57	2.57	2.57
B-80%	F	2.33	2.45	2.57
	P	2.23	2.33	2.33
	TP	2.03	2.13	2.23
B-60%	F	2.23	2.23	2.33
	P	2.13	2.13	2.13
	TP	1.94	1.94	2.03
B-40%	F	1.86	1.94	2.03
	P	1.78	1.86	1.94
	TP	1.70	1.70	1.78
B-20%	F	1.86	1.86	1.86
	P	1.78	1.78	1.78
	TP	1.63	1.63	1.63
B-100% SC KII	F	1.78	1.78	1.78
	P	1.70	1.70	1.70
	TP	1.63	1.63	1.63

D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, nous pouvons conclure que :

- Les valeurs du rapport G/S varient entre 1.63 et 3.00, pour les bétons avec les granulats de Koussane II et les trois types de sable de dunes ;
- Les plus faibles rapports sont obtenus pour les bétons avec une consistance très plastique, et les plus grandes valeurs sont obtenues pour les bétons fermes ;
- Une diminution du rapport G/S avec la diminution de taux de sable de dunes dans les sables corrigés.



3.16. L'influence de taux de sable de dunes sur le rapport G/S (béton KII, Dmax=25mm)

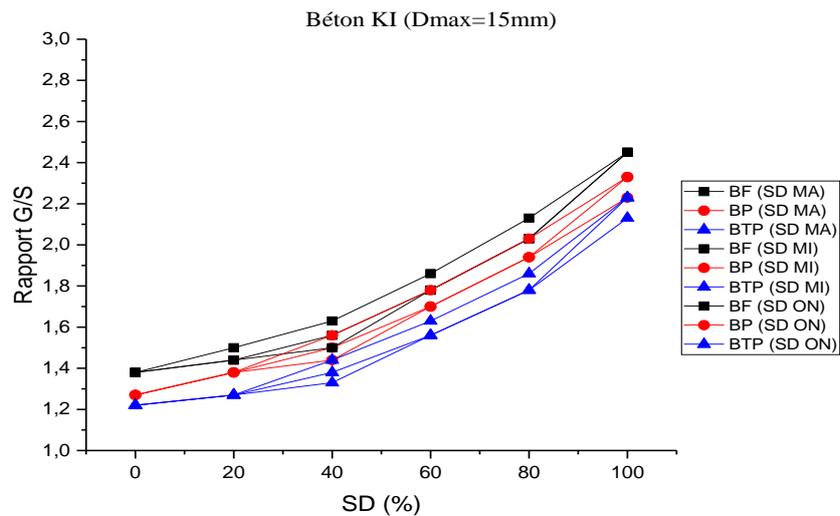
3.5.2. Étendue granulaire 15 mm

3.5.2.1. Granulats Koussane I

Le tableau 3.15, présente les différents résultats du rapport G/S pour les bétons étudiés de granulats Koussane I et les sables corrigés.

Tableau 3.15. Le rapport G/S pour les bétons du granulat KII et SD (Dmax=15mm)

Béton KI et SD (Dmax=15mm)	Ouvrabilité du Béton	SD MA	SD MI	SD ON
		G/S		
B-100%	F	2.45	2.45	2.45
	P	2.23	2.33	2.33
	TP	2.13	2.23	2.23
B-80%	F	2.03	2.03	2.13
	P	1.94	1.94	2.03
	TP	1.78	1.78	1.86
B-60%	F	1.78	1.78	1.86
	P	1.70	1.70	1.78
	TP	1.56	1.56	1.63
B-40%	F	1.56	1.50	1.63
	P	1.50	1.44	1.56
	TP	1.38	1.33	1.44
B-20%	F	1.44	1.44	1.50
	P	1.38	1.38	1.38
	TP	1.27	1.27	1.27
B-100% SC KI	F	1.38	1.38	1.38
	P	1.27	1.27	1.27
	TP	1.22	1.22	1.22



3.17. L'influence de taux de sable de dunes sur le rapport G/S (béton KI, D_{max}=15mm)

D'après ces résultats, nous remarquons que :

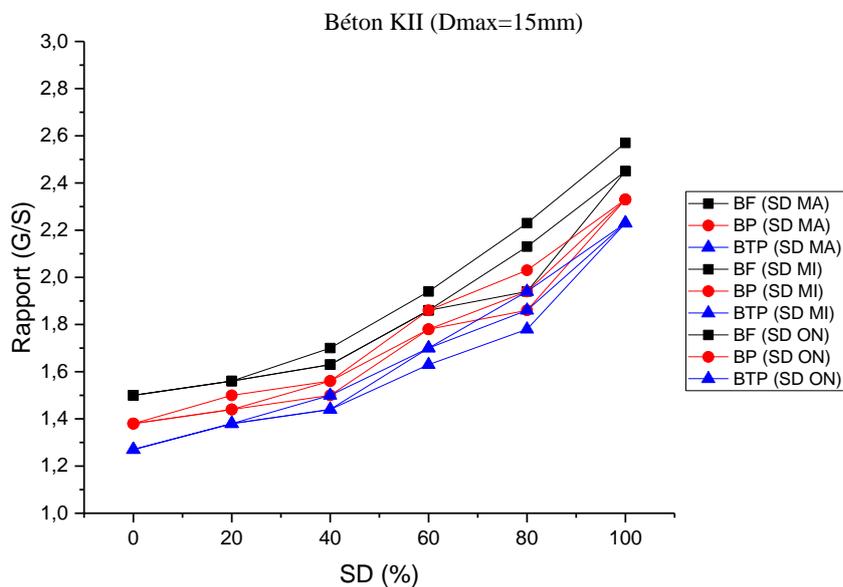
- Une influence directe de taux de sable de dunes dans les sables corrigés sur le rapport G/S des bétons étudiés ;
- La valeur maximale du rapport G/S=2.45, est obtenus pour un béton ferme avec un taux de 100% de sable de dunes ;
- La plus faible valeur du rapport G/S est égale 1.22, pour un béton très plastique avec un taux de 100% de sable concassé ;
- Les courbes du rapport G/S sont présentées dans la figure 3.18, en haut celles des bétons fermes, au milieu celles des bétons plastiques et en bas les courbes des bétons très plastiques.

3.5.2.2. Granulats Koussane II

Les résultats obtenus du rapport G/S des bétons avec les granulats de Koussane II, sont détaillés dans le tableau 3.16 suivant :

Tableau 3.16. Le rapport G/S pour les bétons du granulat KII et SD (Dmax=15mm)

Béton KII et SD (Dmax=15mm)	Ouvrabilité du Béton	SD MA	SD MI	SD ON
		G/S		
B-100%	F	2.45	2.45	2.57
	P	2.33	2.33	2.33
	TP	2.23	2.23	2.23
B-80%	F	1.94	2.13	2.23
	P	1.86	1.94	2.03
	TP	1.78	1.86	1.94
B-60%	F	1.86	1.86	1.94
	P	1.78	1.78	1.86
	TP	1.63	1.70	1.70
B-40%	F	1.63	1.63	1.70
	P	1.50	1.56	1.56
	TP	1.44	1.44	1.50
B-20%	F	1.56	1.56	1.56
	P	1.44	1.44	1.50
	TP	1.38	1.38	1.38
B-100% SC KII	F	1.50	1.50	1.50
	P	1.38	1.38	1.38
	TP	1.27	1.27	1.27



3.18. L'influence de taux de sable de dunes sur le rapport G/S (béton KI, Dmax=15mm)

D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, nous pouvons conclure que :

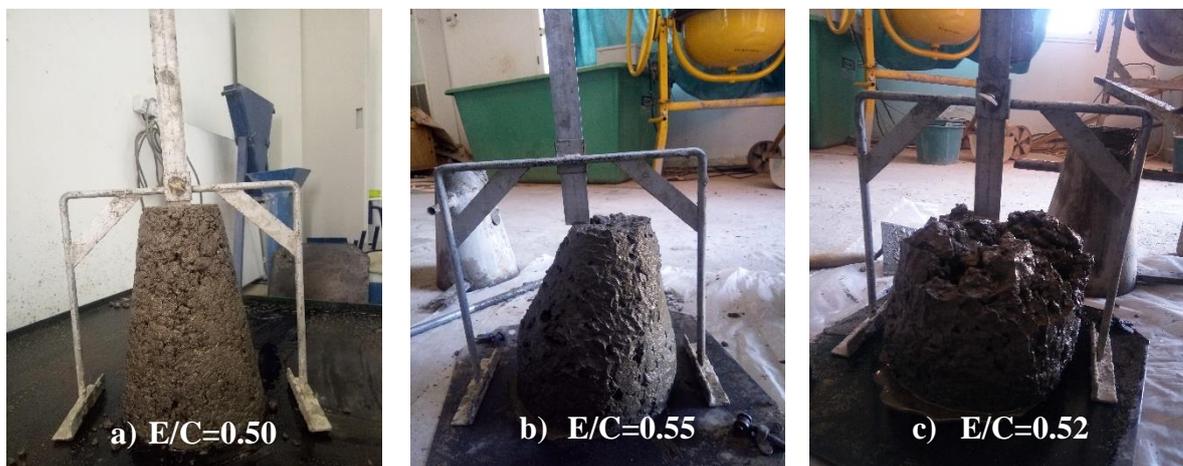
- Les valeurs du rapport G/S, varient entre 1.27 et 2.57 ;
- Les valeurs maximales sont obtenues pour les bétons avec une consistance ferme, quel que soit le sable de dunes utilisé ;
- La valeur minimale du rapport G/S=1.27, est obtenue pour un béton très plastique avec un taux de 100% de sable concassé ;
- Les courbes du rapport G/S pour les bétons plastiques sont situées au milieu entre les courbes des bétons fermes (en haut) et les courbes des bétons très plastiques (en bas).

3.6. Caractéristiques et résultats des bétons à l'état frais :

Après les opérations de malaxage, la masse volumique et l'affaissement au cône d'Abrams sont réalisés pour chaque gâchée.

3.6.1. L'affaissement au cône d'Abrams :

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, des bétons frais, est effectué selon l'exigence de la norme algérienne NA 5102 [88]. Les photos 1, présentent un exemple de cet essai pour trois types bétons avec des consistances différentes (ferme, plastique et très plastique).



Photos 3.1. Mesure de l'affaissement avec le cône d'Abrams

D'après les résultats obtenus, nous constatons qu'il existe une légère variation de la valeur de l'affaissement entre les différentes gâchées réalisées. Ceci est dû à plusieurs considérations : le

changement de la température des constituants avec le temps et la variation du taux des éléments fins dans les sables corrigés.

3.6.2. La masse volumique du béton à l'état frais :

Nous avons déterminé la masse volumique du béton à l'état frais selon l'exigence de la norme NF EN 12350-6 [89]. Cet essai permet de comparer le volume expérimental humide avec le volume théorique.

3.7. Confection des éprouvettes :

3.7.1. Remplissage des moules :

Une fois le malaxage terminé et après la mesure de l'affaissement et la masse volumique, nous faisons couler le béton dans des moules cubiques (15x15x15) cm³, conformément à la norme NA 2600 [90].

3.7.2. Mise en place du béton

La mise en place du béton frais a été effectuée en fonction de la consistance du béton mesurée avec le cône d'Abrams, selon l'exigence de la norme NA 2598 [91].

3.7.3. Conservation des éprouvettes

3.7.3.1. Conservation avant démoulage

Après la numérotation des éprouvettes (la date, le type du béton), les éprouvettes doivent rester dans le moule au sein de notre laboratoire et protégées contre les chocs et les vibrations, pendant 24 heures, à la température de $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ [92].

3.7.3.2. Conservation après démoulage :

Le démoulage des éprouvettes s'est effectué avec l'application d'une pression pneumatique de l'air en bas des moules cubiques.

Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé trois modes de conservation des éprouvettes de béton ; une conservation à l'intérieur du laboratoire (à l'air libre), une conservation à l'extérieur du laboratoire (au soleil) et une conservation en immersion dans l'eau à une température de $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$, conformément à la norme NA 5093 [92]. Les éprouvettes sont conservées, dans ces milieux, pendant 28 jours avant l'essai de la compression.

3.8. Caractérisation du béton à l'état durci

La résistance à la compression traduit généralement une idée générale sur la qualité d'un béton à l'état durci, puisqu'elle est reliée directement à la structure de la pâte de ciment hydraté et aussi aux granulats. Dans la pratique, la résistance à la compression et la masse volumique apparente d'un béton sont les propriétés les plus importantes.

3.8.1. La masse volumique apparente :

La mesure de la masse volumique apparente des éprouvettes a été effectuée conformément à la norme NA 435 [93], et ce quelques heures avant l'essai destructif de la résistance à la compression.

3.8.2. Essai de résistance à la compression

Dans le cas des éprouvettes cubiques et quand les faces sont lisses, il n'est pas nécessaire d'effectuer l'opération de surfacage. L'essai pour la détermination de la résistance à la compression des éprouvettes, est exécuté conformément aux prescriptions de la norme NA 427 [94].

3.9. Résultats et discussion :

3.9.1. Résultats des bétons à l'état frais :

3.9.1.1. L'affaissement des bétons à l'état frais :

3.9.1.1.1. Étendue granulaire $D_{max}=25mm$

a. Bétons avec les granulats Koussane I :

Les résultats de la mesure de l'ouvrabilité sont présentés dans le tableau 3.17. Nous avons mesuré l'affaissement avec le cône d'Abrams pour vérifier la consistance réelle avec la consistance souhaitée.

Tableau 3.17. L'affaissement au cône d'Abrams des bétons KI à l'état frais

Béton KI et SD (25mm)	Ouvrabilité du Béton	Affaissement (cm)			
		Théorique	SD MA	SD MI	SD ON
			Réal		
B-100%	F	4	3	2	4
	P	8	9	6	6
	TP	11.5	15	7	10
B-80%	F	4	2	1	2
	P	8	7	4	7
	TP	11.5	12	6	11
B-60%	F	4	1	0	2
	P	8	6	3	6
	TP	11.5	7	4	10
B-40%	F	4	0	0	2
	P	8	3	2	5
	TP	11.5	4	3	10
B-20%	F	4	0	1	2
	P	8	2	1	5
	TP	11.5	3	3	8
B-100% SC KI	F	4	0	0	0
	P	8	0	0	0
	TP	11.5	0	0	0

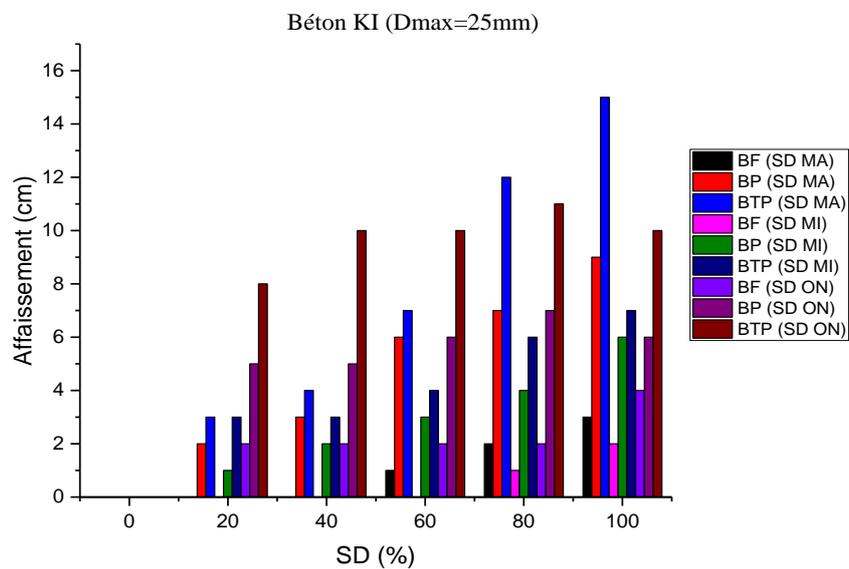


Figure 3.19. L'affaissement des bétons avec les granulats Koussane I (Dmax=25mm)

D'après ces résultats, nous remarquons que :

- Pour un taux de 100% de sable des dunes, la consistance obtenue est presque la même que la consistance désirée, mais avec la diminution de taux de sable de dune, l'ouvrabilité du béton a diminué, cette diminution a une relation directe avec l'augmentation du taux des éléments fins dans les sables corrigés.
- Dans les bétons contenant un taux de 100% de sable concassé, la consistance est ferme pour les trois consistances ciblées, nous pouvons justifier ce phénomène par le taux très élevé des grains fins dans le sable concassé utilisé.

b. Bétons avec les granulats Koussane II :

Le tableau 3.18, ci-dessous présente les résultats de l'affaissement des bétons étudiés. Les résultats obtenus sont comparés avec la consistance ciblée.

Tableau 3.18. L'affaissement au cône d'Abrams des bétons KII à l'état frais

Béton KII et SD (25mm)	Ouvrabilité du Béton	Affaissement (cm)			
		Théorique	SD MA	SD MI	SD ON
			Réal		
B-100%	F	4	7	4	6
	P	8	13	10	12
	TP	11.5	16	12	14
B-80%	F	4	6	3	5
	P	8	8	8	9
	TP	11.5	12	11	11
B-60%	F	4	3	3	2
	P	8	5	7	7
	TP	11.5	8	10	7
B-40%	F	4	0	0	1
	P	8	3	5	5
	TP	11.5	4	8	6
B-20%	F	4	0	0	0
	P	8	2	4	4
	TP	11.5	4	6	6
B-100% SC KII	F	4	0	0	0
	P	8	0	0	0
	TP	11.5	0	0	0

D'après le tableau 3.18 et la figure 3.20, nous remarquons que :

- La consistance des bétons ayant un taux de 100% de sable des dunes est plus que la consistance théorique souhaitée ;

- La valeur maximale de l'affaissement 16 cm est obtenus pour le béton très plastique avec un taux de 100% de sable de dunes de MA, lorsque le module de finesse de ce sable est plus élevé que les deux sables de dunes ;
- Pour un taux de 80% de sable des dunes, la consistance réelle des bétons est équivalente à la consistance désirée ;
- Il existe une petite variation entre les consistances théorie et réelle, pour un taux de 60% de sable des dunes ;
- Pour un taux inférieur à 60% de sable des dunes, la consistance réelle est moins que la consistance ciblée. En général, la consistance est ferme pour tous les types du béton quel que soit le sable des dunes utilisé.

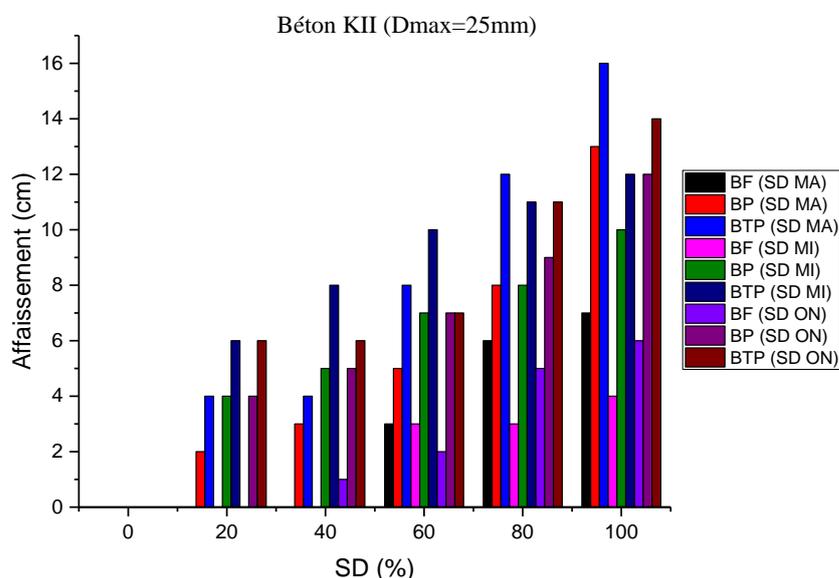


Figure 3.20. L'affaissement des bétons avec les granulats Koussane II (Dmax=25mm)

3.9.1.1.2. Étendue granulaire Dmax=15mm

a. Bétons avec les granulats Koussane I :

Les résultats de l'affaissement pour les bétons avec les granulats Koussane I, sont présentés dans le tableau 3.19 suivant.

Tableau 3.19. L'affaissement au cône d'Abrams des bétons KI (Dmax=15mm)

Béton KI et SD (15mm)	Ouvrabilité du Béton	Affaissement (cm)			
		Théorique	SD MA	SD MI	SD ON
			Réal		
B-100%	F	4	5	3	3
	P	8	12	6	9
	TP	11.5	12	8	8
B-80%	F	4	3	2	2
	P	8	8	6	7
	TP	11.5	9	7	8
B-60%	F	4	2	1	2
	P	8	7	4	5
	TP	11.5	6	4	5
B-40%	F	4	1	0	1
	P	8	5	3	5
	TP	11.5	5	3	5
B-20%	F	4	0	0	0
	P	8	2	0	2
	TP	11.5	2	0	2
B-100% SC KI	F	4	0	0	0
	P	8	0	0	0
	TP	11.5	0	0	0

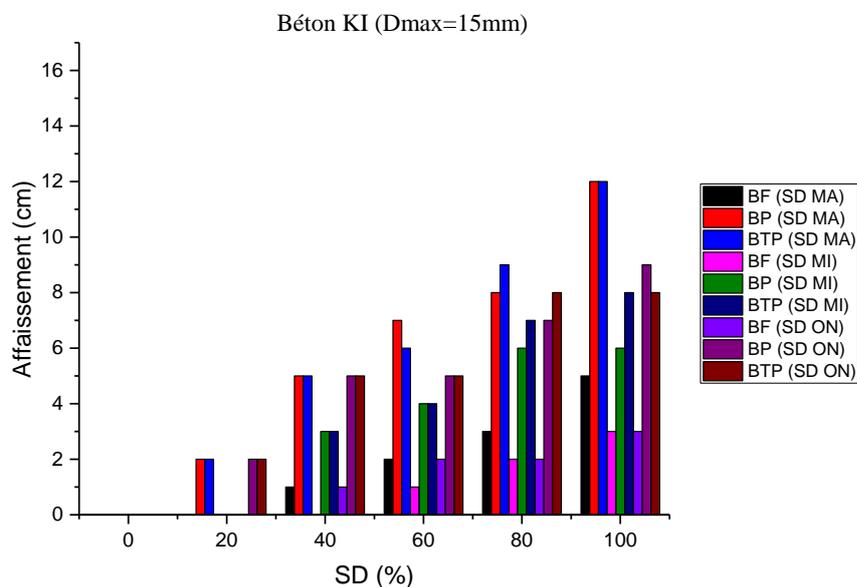


Figure 3.21. L'affaissement des bétons avec les granulats Koussane I (Dmax=15mm)

La figure 3.21, qui présente les résultats de l'affaissement réel des mélanges avec les granulats KI et les différents taux des sables corrigées, montre que :

- Les valeurs de l’affaissement des bétons plastiques et très plastiques sont les mêmes pour tous les mélanges étudiés ;
- On observe la même remarque pour les bétons plastique et très plastiques pour les deux types de béton avec les deux sables de dunes (ON et MI) ;
- Les bétons ferme qui contiennent le sable de dunes MA présentent une consistance plus que les deux sables de dunes ;
- La diminution de taux de sable de dunes dans les sables corrigés influe sur la consistance du béton, cette diminution est accentuée lorsque le taux des fines dans les sables corrigés est augmenté ;

b. Bétons avec les granulats Koussane II :

Les résultats de l’affaissement des bétons à l’état frais, sont présentés en détail dans le tableau 3.20 ci-dessous.

Tableau 3.20. L’affaissement au cône d’Abrams des bétons KII (Dmax=15mm)

Béton KII et SD (15mm)	Ouvrabilité du Béton	Affaissement (cm)			
		Théorique	SD MA	SD MI	SD ON
			Réal		
B-100%	F	4	3	3	3
	P	8	8	9	8
	TP	11.5	12	10	8
B-80%	F	4	3	3	1
	P	8	8	8	6
	TP	11.5	8	8	6
B-60%	F	4	2	1	0
	P	8	5	4	5
	TP	11.5	5	4	6
B-40%	F	4	0	0	0
	P	8	3	3	4
	TP	11.5	3	2	5
B-20%	F	4	0	0	0
	P	8	1	0	0
	TP	11.5	1	0	0
B-100% SC KII	F	4	0	0	0
	P	8	0	0	0
	TP	11.5	0	0	0

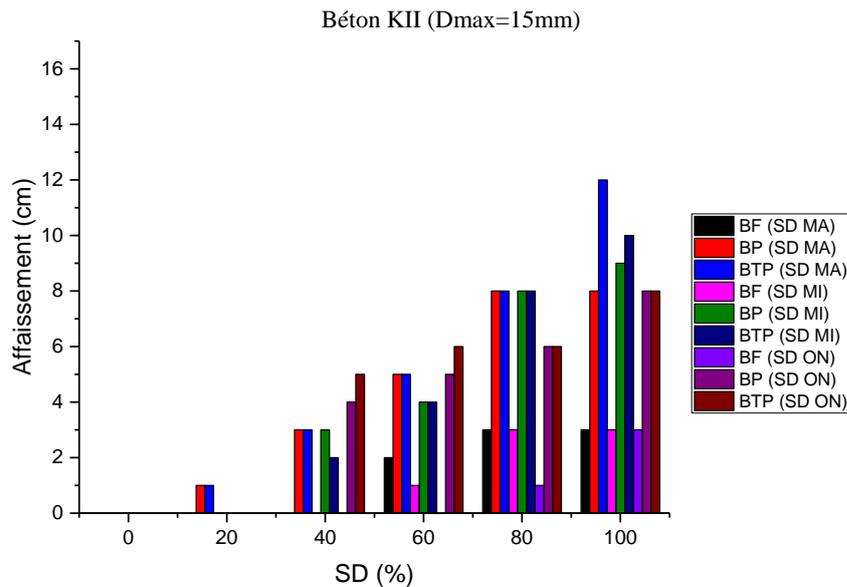


Figure 3.22. L'affaissement des bétons avec les granulats Koussane II (Dmax=15mm)

Les résultats des tableaux 3.19 et 3.22, montrent que :

- Pour des taux de 100% et 80%, les résultats de l'affaissement réel sont presque les mêmes que l'affaissement ciblé,
- Pour des taux inférieurs à 60% de sable des dunes, l'affaissement elle est inférieur à l'affaissement souhaité,
- Pour des taux de 20% et 0% de sable des dunes, l'affaissement est égal à 0 cm,
- L'affaissement diminue lorsque le taux des éléments fins dans le sable corrigé augmente, ceci est vérifié lorsque le taux de sable concassé est supérieur à 80%.

3.9.1.2. La masse volumique du béton à l'état frais :

Avant le remplissage des moules, nous avons mesuré la masse volumique des bétons à l'état frais afin de la comparer avec la masse volumique calculé.

3.9.1.2.1. Étendue granulaire (Dmax=25mm)

a. Type de granulat : granulats Koussane I

Les résultats de la masse volumique des bétons frais avec les granulats KI, sont présentés dans le tableau 3.21 suivant, pour comparer avec les valeurs de la masse volumique théorique.

Tableau 3.21. La masse volumique des bétons à l'état frais KI (Dmax=25mm)

Béton KI et SD (Dmax=25mm)	Ouvrabilité du Béton	SD MA		SD MI		SD ON	
		M _{VH} (kg/L)					
		Théorique	Réelle	Théorique	Réelle	Théorique	Réelle
B-100%	F	2.43	2.43	2.43	2.40	2.43	2.44
	P	2.41	2.41	2.40	2.41	2.41	2.39
	TP	2.39	2.39	2.38	2.38	2.39	2.39
B-80%	F	2.43	2.43	2.43	2.39	2.43	2.41
	P	2.41	2.41	2.40	2.40	2.40	2.41
	TP	2.38	2.38	2.38	2.39	2.38	2.38
B-60%	F	2.43	2.43	2.43	2.39	2.43	2.38
	P	2.40	2.40	2.40	2.39	2.40	2.42
	TP	2.38	2.38	2.38	2.39	2.38	2.37
B-40%	F	2.36	2.36	2.37	2.38	2.36	2.36
	P	2.34	2.34	2.34	2.39	2.34	2.33
	TP	2.31	2.31	2.31	2.42	2.31	2.35
B-20%	F	2.36	2.36	2.36	2.42	2.36	2.34
	P	2.33	2.33	2.34	2.38	2.33	2.33
	TP	2.31	2.31	2.32	2.34	2.31	2.35
B-100% SC KI	F	2.36	2.42	2.36	2.42	2.36	2.42
	P	2.33	2.35	2.33	2.35	2.33	2.35
	TP	2.31	2.34	2.31	2.34	2.31	2.34

D'après les résultats présentés dans le tableau 3.21, nous avons constatons que :

- Les valeurs de la masse volumique réelle du béton avec le sable de dunes MA, sont les mêmes que les valeurs de la masse volumique calculé théoriquement ;
- Pour les deux sables de dunes (ON et MI) il existe une légère variation pour les taux de sable corrigé supérieur à 60 ; mais les taux de sable corrigé inférieur ou égale 40% de sable de dunes une différence de 0.05.

b. Type de granulat : granulats Koussane II

Les résultats de la masse volumique des bétons à l'état frais avec les granulats KII et une étendue granulaire 25mm, sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3.22. La masse volumique des bétons à l'état frais KII ($D_{max}=25mm$)

Béton KII et SD ($D_{max}=25mm$)	Ouvrabilité du Béton	SD MA		SD MI		SD ON	
		M _{VH} (kg/L)					
		Théorique	Réelle	Théorique	Réelle	Théorique	Réelle
B-100%	F	2.42	2.41	2.42	2.42	2.42	2.42
	P	2.39	2.39	2.39	2.39	2.40	2.39
	TP	2.37	2.37	2.37	2.37	2.38	2.38
B-80%	F	2.42	2.44	2.42	2.42	2.41	2.42
	P	2.39	2.39	2.39	2.37	2.38	2.39
	TP	2.37	2.37	2.37	2.37	2.36	2.40
B-60%	F	2.42	2.43	2.42	2.43	2.40	2.40
	P	2.39	2.40	2.39	2.40	2.38	2.38
	TP	2.37	2.38	2.37	2.37	2.36	2.37
B-40%	F	2.37	2.41	2.37	2.42	2.35	2.42
	P	2.34	2.40	2.34	2.37	2.32	2.37
	TP	2.32	2.34	2.32	2.38	2.30	2.35
B-20%	F	2.35	2.42	2.35	2.40	2.35	2.41
	P	2.32	2.39	2.33	2.38	2.32	2.37
	TP	2.30	2.34	2.31	2.37	2.30	2.38
B-100% SC KII	F	2.35	2.39	2.35	2.39	2.35	2.39
	P	2.33	2.39	2.33	2.39	2.33	2.39
	TP	2.31	2.38	2.31	2.38	2.31	2.38

D'après les résultats présentés dans le tableau 3.22, nous constatons que :

- La masse volumique des bétons à l'état frais, varie entre 2.30 et 2.44kg/L pour tous les bétons étudiés ;
- La masse volumique à une relation directe avec la consistance du béton, on sait que la teneur en eau influe sur la valeur de la masse volumique ;
- Les valeurs de la masse volumique des bétons ayant un taux de sable des dunes supérieur ou égale 60%, sont supérieures à celles ayant un taux inférieur à 40%, le sable corrigé influe donc sur la masse volumique du béton à l'état frais.

3.9.1.2.2. Étendue granulaire ($D_{max}=15mm$)

a. Type de granulat : granulats Koussane I :

Le tableau 3.23, présente les valeurs de la masse volumique des bétons à l'état frais.

Tableau 3.23. La masse volumique des bétons à l'état frais KI (Dmax=15mm)

Béton KI et SD (Dmax=15mm)	Ouvrabilité du Béton	SD MA		SD MI		SD ON	
		M _{VH} (kg/L)					
		Théorique	Réelle	Théorique	Réelle	Théorique	Réelle
B-100%	F	2.40	2.39	2.40	2.37	2.40	2.39
	P	2.38	2.36	2.37	2.35	2.38	2.37
	TP	2.35	2.35	2.35	2.34	2.35	2.35
B-80%	F	2.40	2.39	2.40	2.37	2.40	2.40
	P	2.38	2.38	2.37	2.34	2.38	2.36
	TP	2.35	2.36	2.35	2.33	2.35	2.36
B-60%	F	2.40	2.36	2.40	2.36	2.40	2.37
	P	2.38	2.35	2.37	2.33	2.37	2.35
	TP	2.35	2.35	2.34	2.32	2.34	2.34
B-40%	F	2.33	2.37	2.34	2.35	2.33	2.37
	P	2.31	2.34	2.31	2.35	2.31	2.36
	TP	2.28	2.35	2.29	2.31	2.28	2.34
B-20%	F	2.33	2.35	2.34	2.35	2.33	2.35
	P	2.31	2.33	2.31	2.34	2.31	2.35
	TP	2.28	2.34	2.29	2.32	2.28	2.34
B-100% SC KI	F	2.33	2.36	2.33	2.36	2.33	2.36
	P	2.30	2.34	2.30	2.34	2.30	2.34
	TP	2.28	2.33	2.28	2.33	2.28	2.33

D'après ces résultats obtenus, nous pouvons remarquer que :

- La masse volumique des bétons à l'état frais, avec une étendue granulaire de 15mm, est comprise entre 2.28 et 2.40 kg/L ;
- Les valeurs les plus élevées de la masse volumique des bétons à l'état frais sont obtenues pour un taux de sable des dunes inférieur à 60% ;
- Les bétons ayant un taux de 100% de sable concassé présentent les valeurs minimales de la masse volumique, ceci est probablement dû au taux des pores supérieur.

b. Type de granulat : granulats Koussane II

Le tableau 3.24 ci-dessous présente les valeurs de la masse volumique des bétons à l'état frais avec les granulats KII et un Dmax=15mm.

Tableau 3.24. La masse volumique des bétons à l'état frais KII (Dmax=15mm)

Béton KII et SD (Dmax=15mm)	Ouvrabilité du Béton	SD MA		SD MI		SD ON	
		M _{vH} (kg/L)					
		Théorique	Réelle	Théorique	Réelle	Théorique	Réelle
B-100%	F	2.40	2.40	2.40	2.39	2.40	2.40
	P	2.37	2.39	2.37	2.38	2.38	2.37
	TP	2.35	2.38	2.35	2.36	2.35	2.36
B-80%	F	2.40	2.40	2.40	2.39	2.38	2.38
	P	2.38	2.39	2.38	2.37	2.36	2.37
	TP	2.35	2.36	2.35	2.34	2.33	2.38
B-60%	F	2.40	2.40	2.40	2.39	2.38	2.39
	P	2.38	2.37	2.38	2.35	2.36	2.38
	TP	2.35	2.35	2.35	2.37	2.33	2.38
B-40%	F	2.35	2.40	2.35	2.40	2.33	2.38
	P	2.33	2.37	2.32	2.35	2.31	2.36
	TP	2.30	2.36	2.30	2.35	2.28	2.35
B-20%	F	2.33	2.39	2.33	2.39	2.33	2.38
	P	2.31	2.36	2.31	2.36	2.31	2.38
	TP	2.28	2.35	2.28	2.36	2.28	2.36
B-100% SC KII	F	2.34	2.39	2.34	2.39	2.34	2.39
	P	2.31	2.34	2.31	2.34	2.31	2.34
	TP	2.29	2.35	2.29	2.35	2.29	2.35

Les résultats obtenus de la masse volumique, présentés dans les tableaux 3.23 et 3.24, montrent que :

- Les valeurs de la masse volumique réelle variant entre 2.28 et 2.40 kg/L ;
- La plus grande valeur de la masse volumique est obtenue pour les bétons fermes=ayant un taux de sable des dunes supérieur à 60% et la plus petite valeur correspond aux bétons très plastiques ayant un taux de sable des dunes inférieur à 40% ;
- Les masses volumiques théorique et réelle sont les mêmes pour les taux des sables des dunes de 60%, 80% et 100%, mais pour les taux de 40%, 20% et 0%, il y'a une différence d'environ 0.04.

3.9.2. Résultats des bétons à l'état durcis :

3.9.2.1. La résistance mécanique à la compression

3.9.2.1.1. Étendue granulaire Dmax=25mm

a. Mode de conservation à l'extérieur du laboratoire

• **Granulats Koussane I**

Nous avons conservé les éprouvettes de bétons pendant 28 jours à l’extérieur du laboratoire, exposées au soleil sous une température d’environ 45°C±5°C.

Tableau 3.25. Résultats de la résistance à la compression des bétons KI (à l’extérieur du laboratoire)

Béton KI et SD	Ouvrabilité	Extérieur du laboratoire		
		SD MA	SD MI	SD ON
		Rc 28 (MPa)		
B-100%	F	45,59	45,95	48,35
	P	43,38	37,18	37,41
	TP	42,58	37,53	34,95
B-80%	F	48,41	42,89	44,54
	P	40,01	37,57	40,68
	TP	41,94	37,27	40,28
B-60%	F	50,15	48,19	43,48
	P	39,08	39,91	37,70
	TP	43,58	39,59	40,58
B-40%	F	45,77	46,54	40,19
	P	45,49	40,44	41,61
	TP	42,63	40,89	41,72
B-20%	F	48,08	49,67	43,40
	P	43,56	41,84	37,69
	TP	43,44	44,67	39,47
B-100% SC KI	F	43,00	43,00	43,00
	P	39,41	39,41	39,41
	TP	42,62	42,62	42,62

D’après les résultats obtenus dans le tableau 3.25 nous avons constaté que :

- La résistance à la compression des bétons avec les granulats Koussane I et pour le mode de conservation à l’extérieur du laboratoire varie entre 37 et 50,15 MPa ;
- La majorité des valeurs les plus élevées de la résistance sont obtenues pour les bétons ayant des taux de sable des dunes de 60%, 40% et 20% ;
- Les plus faibles résistances à la compression des bétons correspondent aux deux sables de dunes SD MA et SD MI ayant des taux de 100%, 80% et 0%.

• **Granulats Koussane II**

Le tableau 3.26, présente les résultats de la résistance mécanique à la compression après 28 jours, pour les bétons KII conservés à l’extérieur de laboratoire.

Tableau 3.26. Résultats de la résistance à la compression pour les bétons KII (à l'extérieur du laboratoire)

Béton KII et SD	Ouvrabilité	Extérieur du laboratoire		
		SD MA	SD MI	SD ON
		Rc 28 (MPa)		
B-100%	F	37,60	39,75	43,45
	P	34,50	36,56	37,32
	TP	37,67	37,24	37,94
B-80%	F	43,85	41,88	43,72
	P	37,82	37,69	36,69
	TP	40,11	38,22	37,59
B-60%	F	39,21	44,27	47,56
	P	33,45	38,54	41,78
	TP	36,38	38,22	38,58
B-40%	F	41,73	44,34	44,65
	P	38,48	38,89	39,14
	TP	39,38	38,54	38,29
B-20%	F	44,99	41,19	48,69
	P	36,99	39,26	42,46
	TP	40,05	40,24	38,41
B-100% SC KII	F	38,19	38,19	38,19
	P	30,68	30,68	30,68
	TP	34,08	34,08	34,08

D'après les résultats présentés dans le tableau 3.26, nous observons que :

- La résistance varie entre 30 et 48MPa ;
- Les taux de 60%, 40% et 20% de sable des dunes, donnent les meilleurs résultats de la résistance à la compression, quelle que soit la consistance désirée ;
- Les plus faibles résultats sont obtenus pour le taux de 100% de sable concassé ;
- Les bétons ayant une consistance ferme donnent une résistance supérieure que celles des bétons ayant des consistances plastique et très plastique.

b. Mode de conservation à l'intérieur du laboratoire :

• Granulats Koussane I

Après le démoulage, les éprouvettes de béton sont conservées à l'intérieur du laboratoire sous une température $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Les résultats obtenus de la résistance à la compression après 28 jours sont présentés dans le tableau 3.27 suivant.

Tableau 3.27. Résultats de la résistance à la compression pour les bétons KI (à l'intérieur du laboratoire)

		Intérieur du laboratoire		
		SD MA	SD MI	SD ON
Béton KII (25mm)	Ouvrabilité	Rc 28 (MPa)		
B-100%	F	42,23	42,57	43,07
	P	38,36	37,67	38,94
	TP	39,22	41,18	40,51
B-80%	F	44,41	43,70	43,34
	P	39,77	39,34	37,50
	TP	43,00	40,05	40,12
B-60%	F	41,92	44,09	46,51
	P	35,91	40,11	42,77
	TP	39,53	40,66	40,68
B-40%	F	44,51	45,71	43,84
	P	39,85	39,56	39,30
	TP	41,35	40,90	39,57
B-20%	F	44,57	43,27	44,63
	P	38,68	41,30	41,37
	TP	41,35	42,33	39,87
B-100% SC KII	F	38,08	38,08	38,08
	P	30,57	30,57	30,57
	TP	35,85	35,85	35,85

D'après ces résultats obtenus, nous remarquons que :

- La résistance la plus élevée du béton à la compression est de 48MPa pour un taux de 60% de sable de dunes, tandis que la plus faible est de 36MPa pour un taux de 100% de sables de dunes ;
- Les taux 60%, 40% et 20% de sable de dunes donnent les meilleurs résultats de la résistance à la compression ;
- Les plus faibles résultats sont obtenus pour les taux de 100%, 80% et 0% de sable de dunes.
- **Granulats Koussane II**

Les résultats de la résistance à la compression après 28 jours des bétons avec les granulats Koussane II ($D_{max}=25\text{mm}$) et les éprouvettes conservées à l'intérieur de laboratoire, sont présentés dans le tableau 3.28.

Tableau 3.28. Résultats de la résistance à la compression pour les bétons KII (à l'intérieur du laboratoire)

		Intérieur du laboratoire		
		SD MA	SD MI	SD ON
Béton KI et SD	Ouvrabilité	Rc 28 (MPa)		
B-100%	F	44,92	43,69	45,75
	P	44,94	36,53	37,28
	TP	44,08	38,00	35,11
B-80%	F	48,08	40,93	42,34
	P	41,30	37,90	39,45
	TP	41,41	37,72	39,68
B-60%	F	48,19	46,38	41,59
	P	41,68	37,94	37,51
	TP	44,58	39,36	40,40
B-40%	F	43,02	44,08	39,64
	P	45,24	39,51	41,48
	TP	43,70	40,29	42,70
B-20%	F	46,14	46,15	42,12
	P	43,63	41,29	37,37
	TP	44,46	40,34	39,39
B-100% SC KI	F	44,06	44,06	44,06
	P	40,30	40,30	40,30
	TP	41,46	41,46	41,46

D'après les résultats présentés dans le tableau 3.28, nous remarquons que :

- Les valeurs de la résistance du béton à la compression varient entre 30 et 46MPa ;
- La plus grande valeur est obtenue pour le taux de 60% de sable des dunes, tandis que la plus faible, elle correspond à un taux de 100% de sable concassé ;
- Les taux de 60%, 40% et 20% donnent les meilleurs résultats de la résistance à la compression ;
- Les taux de 100%, 80% et 0% de sable des dunes donnent les résultats faibles de la résistance du béton à la compression.

c. Mode de conservation dans l'eau :

- **Granulats Koussane I**

Les éprouvettes de bétons ont été conservées dans un bassin d'eau, la température mesurée est de $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, selon l'exigence de la norme NA 5093 [92].

Tableau 3.29. Résultats de la résistance à la compression des bétons KI (dans l'eau)

Béton KI (25mm)	Ouvrabilité	Dans l'eau		
		SD MA	SD MI	SD ON
		Rc 28 (MPa)		
B-100%	F	53,03	46,92	52,76
	P	50,20	43,14	43,45
	TP	50,19	42,35	41,17
B-80%	F	54,04	47,81	47,48
	P	51,42	41,81	45,38
	TP	50,73	44,24	49,05
B-60%	F	57,96	48,29	46,67
	P	52,43	42,05	42,97
	TP	50,68	44,95	47,15
B-40%	F	48,59	46,48	43,70
	P	49,44	44,50	48,10
	TP	50,54	44,14	48,15
B-20%	F	54,56	49,58	48,68
	P	49,10	42,34	41,48
	TP	57,51	45,05	43,32
B-100% SC KI	F	50,37	50,37	50,37
	P	44,27	44,27	44,27
	TP	51,08	51,08	51,08

D'après les résultats obtenus, nous constatons que :

- Les valeurs de la résistance des éprouvettes de béton, conservées dans l'eau sont les plus élevées par rapport à celles des deux autres modes de conservation (à l'extérieur et à l'intérieur du laboratoire), les résultats varient entre 41 et 57MPa ;
- Les valeurs maximales sont obtenues pour les mélanges avec un taux de 60%, 40% et 20% de sable de dunes.

- **Granulats Koussane II**

Après 28 jours de conservation des éprouvettes dans l'eau, les résultats de la résistance à la compression obtenus sont présentés dans le tableau 3.30 suivant.

Tableau 3.30. Résultats de la résistance à la compression pour les bétons KI (dans l'eau)

Béton KII (25mm)	Ouvrabilité	Dans l'eau		
		SD MA	SD MI	SD ON
		Rc 28 (MPa)		
B-100%	F	49,29	45,79	49,07
	P	47,24	41,70	43,30
	TP	47,52	42,52	42,46
B-80%	F	52,27	44,96	49,56
	P	48,48	43,61	43,86
	TP	50,78	44,84	44,11
B-60%	F	56,51	50,59	50,79
	P	50,15	46,03	45,54
	TP	50,65	45,88	45,31
B-40%	F	55,43	50,73	48,21
	P	49,83	43,47	45,37
	TP	47,70	46,14	43,48
B-20%	F	50,49	49,44	50,08
	P	48,67	48,48	44,19
	TP	48,48	49,33	46,84
B-100% SC KII	F	45,03	45,03	45,03
	P	35,55	35,55	35,55
	TP	41,69	41,69	41,69

Nous remarquons, d'après ces résultats, que :

- La valeur minimale de la résistance à la compression est de 35MPa pour un béton avec un taux de 100% de sable concassé et la plus élevée est de 56MPa pour un taux de 60% de sable des dunes ;
- Les taux de 60, 40% et 20% de sable des dunes présentent les valeurs maximales de la résistance ;
- Les résultats de la résistance du béton avec un taux de 100% de sable des dunes ou avec 100% de sable concassé, sont les plus faibles.

3.9.2.1.2. Étendue granulaire $D_{max}=15mm$

a. Granulats Koussane I

Les éprouvettes des bétons, avec les granulats Koussane I, sont conservées pendant 28 jours à l'intérieur de laboratoire dans une température ($30\pm 5^{\circ}C$).

Tableau 3.31. Résultats de la résistance à la compression des bétons KI (Dmax=15mm)

		SD MA	SD MI	SD ON
Béton KI (15mm)	Ouvrabilité	Rc 28 (MPa)		
B-100%	F	48,23	47,35	45,86
	P	42,55	40,45	40,82
	TP	42,61	41,58	41,05
B-80%	F	49,70	46,81	47,74
	P	42,79	40,45	41,30
	TP	44,61	41,76	41,25
B-60%	F	51,22	45,20	47,44
	P	42,72	43,62	41,51
	TP	41,42	44,82	42,16
B-40%	F	51,37	51,48	49,38
	P	44,20	45,47	44,90
	TP	45,50	47,23	45,59
B-20%	F	52,81	50,11	51,21
	P	45,70	43,37	44,26
	TP	46,37	44,80	44,92
B-100% SC KI	F	48,71	48,71	48,71
	P	41,06	41,06	41,06
	TP	41,46	41,46	41,46

D'après les résultats obtenus de la résistance à la compression dans le tableau 3.31, nous constatons que :

- Les valeurs de la résistance mécanique à la compression mentionnés dans le tableau 3.31, sont compris entre 40 et 52MPa ;
- Les bétons avec un taux de 60%, 40% et 20% présentent les meilleurs résultats de la résistance à la compression ;
- L'introduction de sable corrigé dans le béton influe sur la résistance à la compression.

b. Granulats Koussane II

Le tableau 3.32 ci-dessous présente les résultats obtenus de la résistance à la compression des bétons KII. Les éprouvettes sont conservées pendant 28 jours à l'intérieur du laboratoire ($30\pm 5^{\circ}\text{C}$).

Tableau 3.32. Résultats de la résistance à la compression des bétons KII ($D_{max}=15mm$)

Béton KII (15mm)	Ouvrabilité	SD MA	SD MI	SD ON
		Rc 28 (MPa)		
B-100%	F	44,66	45,24	44,29
	P	38,48	38,49	43,07
	TP	40,12	40,36	43,17
B-80%	F	47,64	46,81	45,45
	P	42,43	42,23	40,49
	TP	43,64	42,03	42,53
B-60%	F	47,32	48,20	46,79
	P	42,59	42,99	43,24
	TP	42,34	43,00	43,59
B-40%	F	47,73	48,40	46,60
	P	41,38	42,41	41,64
	TP	43,26	43,54	42,51
B-20%	F	45,60	52,33	49,28
	P	40,34	45,26	42,74
	TP	41,47	44,71	44,61
B-100% SC KII	F	47,40	47,40	47,40
	P	40,65	40,65	40,65
	TP	42,87	42,87	42,87

D'après les résultats présentés dans le tableau 3.32, nous pouvons conclure que :

- La résistance à la compression des bétons avec les granulats Koussane II varie entre 38 et 52MPa ;
- Les valeurs les plus élevées de la résistance sont obtenues pour les bétons avec un taux de sable de dunes de 60%, 40% et 20%, pour les deux types de granulats et pour les trois types de consistance ;
- Les taux de 100%, 80% et 0% de sable des dunes influent négativement sur la résistance à la compression du béton pour les trois types de sables de dunes.

3.9.2.2. La masse volumique des bétons à l'état durci

3.9.2.2.1. Étendue granulaire $D_{max}=25mm$

a. Granulats Koussane I

Après 28 jours de conservation des éprouvettes dans les trois modes de conservation, nous avons mesuré la masse volumique des bétons à l'état durci. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.33. La masse volumique des bétons de granulats KI à l'état durci (Dmax=25mm)

Béton KI (25mm)	Ouvrabilité	Mvs (kg/L)								
		MA			MI			ON		
		EX	IN	SE	EX	IN	SE	EX	IN	SE
B-100%	F	2,30	2,30	2,37	2,29	2,33	2,38	2,30	2,32	2,35
	P	2,33	2,33	2,40	2,25	2,28	2,35	2,27	2,29	2,35
	TP	2,28	2,28	2,36	2,23	2,28	2,34	2,25	2,27	2,34
B-80%	F	2,28	2,28	2,38	2,30	2,32	2,39	2,31	2,32	2,37
	P	2,29	2,29	2,37	2,26	2,30	2,36	2,28	2,29	2,34
	TP	2,28	2,28	2,34	2,24	2,27	2,34	2,26	2,28	2,33
B-60%	F	2,31	2,31	2,35	2,31	2,34	2,40	2,28	2,32	2,37
	P	2,30	2,30	2,37	2,27	2,30	2,36	2,25	2,28	2,33
	TP	2,26	2,26	2,32	2,26	2,29	2,34	2,24	2,27	2,32
B-40%	F	2,32	2,32	2,36	2,29	2,34	2,37	2,27	2,29	2,36
	P	2,30	2,30	2,36	2,27	2,31	2,35	2,26	2,29	2,32
	TP	2,27	2,27	2,33	2,23	2,29	2,34	2,24	2,26	2,32
B-20%	F	2,31	2,31	2,36	2,29	2,32	2,37	2,26	2,29	2,33
	P	2,29	2,29	2,34	2,26	2,29	2,33	2,25	2,30	2,32
	TP	2,25	2,25	2,30	2,24	2,28	2,33	2,23	2,26	2,30
B-100% SC KI	F	2,27	2,27	2,33	2,27	2,32	2,33	2,27	2,32	2,33
	P	2,16	2,16	2,25	2,16	2,22	2,25	2,16	2,22	2,25
	TP	2,22	2,22	2,26	2,22	2,26	2,26	2,22	2,26	2,26

D'après les résultats détaillés dans le tableau ci-dessus, nous remarquons que :

- La masse volumique des bétons à l'état durci est variée dans l'intervalle 2.16 et 2.40 kg/L ;
- Pour les bétons avec une consistance ferme, les valeurs de la masse volumique sont les plus grandes par rapport aux bétons avec une consistance plastique et très plastique ;
- Il existe une influence du mode de conservation sur la masse volumique ;
- Les bétons conservés à l'extérieur présentent les valeurs minimales de la masse volumique.

b- Granulats Koussane II

Les résultats obtenus de la masse volumique des bétons de granulat KII à l'état durci, sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.34. La masse volumique des bétons de granulats KII à l'état durci (Dmax=25mm)

Béton KII (25mm)	Ouvrabilité	Mvs (kg/L)								
		MA			MI			ON		
		EX	IN	SE	EX	IN	SE	EX	IN	SE
B-100%	F	2,31	2,37	2,40	2,31	2,35	2,38	2,34	2,36	2,39
	P	2,27	2,32	2,36	2,26	2,32	2,36	2,28	2,33	2,37
	TP	2,25	2,30	2,34	2,26	2,31	2,35	2,27	2,31	2,35
B-80%	F	2,32	2,37	2,40	2,33	2,37	2,41	2,31	2,36	2,40
	P	2,27	2,32	2,37	2,27	2,32	2,34	2,27	2,31	2,37
	TP	2,26	2,30	2,33	2,24	2,30	2,32	2,27	2,31	2,35
B-60%	F	2,31	2,36	2,40	2,33	2,36	2,38	2,34	2,36	2,38
	P	2,25	2,32	2,36	2,26	2,32	2,35	2,31	2,34	2,35
	TP	2,24	2,29	2,33	2,24	2,30	2,33	2,26	2,30	2,34
B-40%	F	2,29	2,33	2,39	2,31	2,36	2,36	2,32	2,37	2,38
	P	2,27	2,31	2,36	2,26	2,30	2,31	2,29	2,32	2,36
	TP	2,25	2,30	2,35	2,25	2,29	2,33	2,26	2,31	2,35
B-20%	F	2,30	2,34	2,38	2,31	2,33	2,36	2,34	2,37	2,40
	P	2,28	2,31	2,35	2,26	2,32	2,34	2,30	2,32	2,36
	TP	2,25	2,32	2,35	2,24	2,28	2,32	2,26	2,30	2,34
B-100% SC KI	F	2,23	2,33	2,36	2,23	2,33	2,36	2,23	2,33	2,36
	P	2,14	2,21	2,21	2,14	2,21	2,21	2,14	2,21	2,21
	TP	2,23	2,25	2,29	2,23	2,25	2,29	2,23	2,25	2,29

D'après les résultats détaillés dans le tableau 3.34 ci-dessus, nous remarquons que :

- La masse volumique des bétons à l'état durci varie dans l'intervalle 2.14 et 2.41 kg/L ;
- Les valeurs de la masse volumique des bétons avec une consistance ferme, sont les plus grandes par rapport aux bétons avec une consistance plastique et très plastique ;
- Une influence du mode de conservation sur la masse volumique ;
- Les bétons conservés à l'extérieur du laboratoire, présentent les valeurs minimales de la masse volumique, lorsque le durcissement a été effectué rapidement, l'évaporation rapide d'eau augmente la porosité de structure granulaire, qui diminue la masse mesurée des éprouvettes, à l'inverse des éprouvettes conservées dans l'eau.

3.9.2.2.2. Étendue granulaire $D_{max}=15mm$

a. Granulats Koussane I

Le tableau 3.35 présente la masse volumique des bétons à l'état durci, des bétons granulats Koussane I. Les éprouvettes sont conservées à l'intérieur du laboratoire.

Tableau 3.35. La masse volumique des bétons à l'état durci

Béton KI (15mm)	Ouvrabilité	Mvs (kg/L)		
		SD MA	SD MI	SD ON
B-100%	F	2,34	2,32	2,32
	P	2,29	2,28	2,29
	TP	2,26	2,28	2,28
B-80%	F	2,33	2,33	2,32
	P	2,29	2,28	2,30
	TP	2,28	2,28	2,28
B-60%	F	2,33	2,31	2,32
	P	2,29	2,27	2,28
	TP	2,28	2,28	2,28
B-40%	F	2,32	2,30	2,32
	P	2,30	2,27	2,29
	TP	2,28	2,27	2,29
B-20%	F	2,31	2,29	2,32
	P	2,28	2,28	2,29
	TP	2,28	2,27	2,28
B-100% SC KI	F	2,30	2,30	2,30
	P	2,27	2,27	2,27
	TP	2,26	2,26	2,26

D'après ces résultats, nous constatons que :

- La masse volumique des bétons à l'état durci, varie entre 2.26 et 2.34 kg/L ;
- Les valeurs maximales obtenues pour les bétons d'une consistance ferme, et la valeur maximale est obtenue pour un taux de 100% de SC avec une consistance très plastique ;
- Il y'a une légère variation de la masse volumique entre les trois sables de dunes utilisés ;
- Le taux de sable de dunes dans les sables corrigés influe légèrement sur la masse volumique.

b- Granulats Koussane II

Les résultats obtenus de la masse volumique des bétons à l'état durci, sont présentés dans le tableau 3.36 suivant :

Tableau 3.36. La masse volumique des bétons KII à l'état durci

Béton KII (15mm)	Ouvrabilité	Mvs (kg/L)		
		SD MA	SD MI	SD ON
B-100%	F	2,35	2,35	2,35
	P	2,31	2,31	2,30
	TP	2,30	2,28	2,30
B-80%	F	2,36	2,34	2,36
	P	2,32	2,31	2,32
	TP	2,31	2,31	2,31
B-60%	F	2,36	2,34	2,34
	P	2,32	2,30	2,31
	TP	2,30	2,30	2,30
B-40%	F	2,34	2,33	2,33
	P	2,31	2,30	2,30
	TP	2,31	2,29	2,30
B-20%	F	2,32	2,34	2,35
	P	2,31	2,31	2,31
	TP	2,30	2,29	2,29
B-100% SC KII	F	2,34	2,34	2,34
	P	2,31	2,31	2,31
	TP	2,29	2,29	2,29

D'après ces résultats, nous remarquons que :

- Les valeurs de la masse volumique varient dans l'intervalle 2.29 et 2.35 kg/L ;
- Les bétons avec une ouvrabilité ferme présentent les valeurs maximales de la masse volumique, les valeurs maximales sont obtenues pour les bétons très plastique ;
- Les valeurs de la masse volumique pour les trois sables de dunes, sont presque identiques pour tous les taux de sable de dunes introduits dans les sables corrigées ;

3.10. L'influence de la masse volumique des bétons à l'état durci sur la résistance à la compression :

3.10.1. Granulats Koussane I (Dmax=25mm)

Nous avons étudié dans cette partie l'influence de la masse volumique des bétons à l'état durci, sur la résistance à la compression après 28 jours, selon le mode de conservation et le taux de sable de dunes dans les sables corrigés.

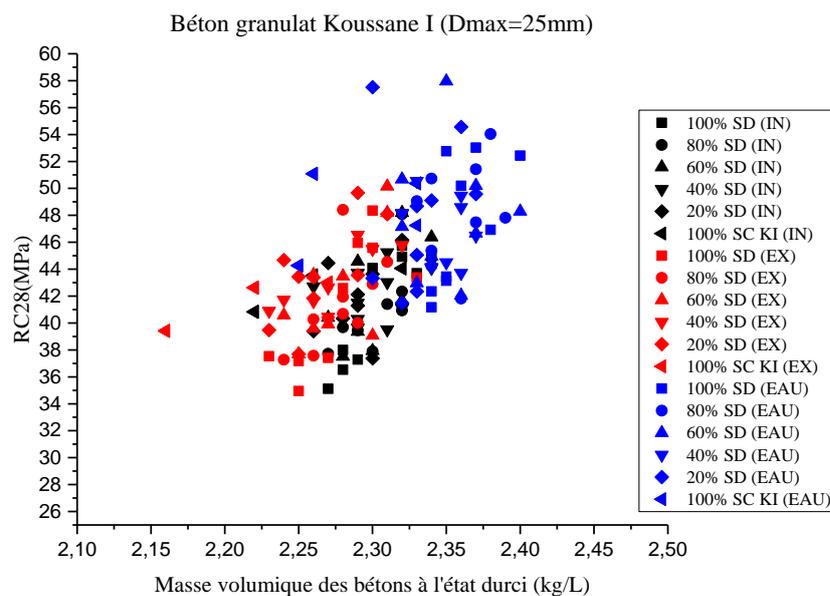


Figure 3.23. La résistance à la compression et la masse volumique des bétons avec granulats Koussane I et SD (Dmax=25mm)

Nous remarquons, dans la figure 3.23, que :

- Les valeurs maximales de la résistance à la compression sont obtenues pour les masses volumiques supérieures à 2.30 kg/L concernant les bétons conservés dans l'eau ;
- Pour les masses volumiques inférieures à 2.30 kg/L, les résultats de la résistance à la compression, sont les plus faibles, surtout pour le mode de conservation à l'extérieur ;
- Une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la masse volumique.

3.10.2. Granulats Koussane II (Dmax=25mm)

La figure 3.24, présente la relation entre la masse volumique du béton à l'état durci et sa résistance mécanique à la compression.

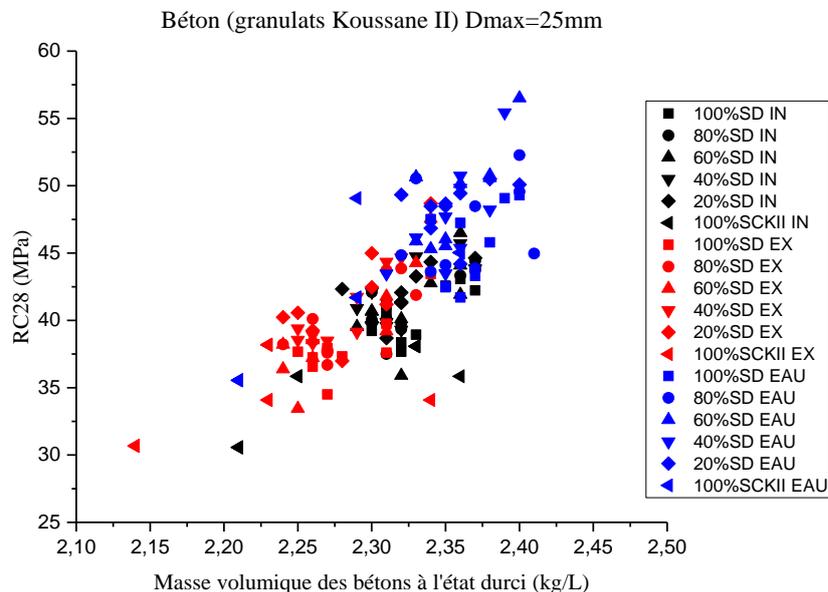


Figure 3.24. La résistance à la compression et la masse volumique des bétons avec granulats Koussane II et SD (Dmax=25mm)

D'après cette figure 3.24, nous constatons que :

- Pour une valeur de la masse volumique supérieure à 2.40kg/L, nous avons les meilleurs résultats de la résistance à la compression, dépassant 55 MPa ;
- La résistance minimale 30MPa, est obtenue pour une valeur minimale de 2.15kg/L de la masse volumique des bétons à l'état durci ;
- Une augmentation linéaire de la résistance à la compression avec l'augmentation de la masse volumique ;
- Les bétons conservés à l'extérieur du laboratoire, présentent les plus faibles valeurs de la masse volumique, et aussi les plus faibles valeurs de la résistance à la compression ;
- Il y'a une relation directe entre la masse volumique des bétons à l'état durci et la résistance à la compression.

3.10.3. Granulats Koussane I (Dmax=15mm)

La figure 3.26, présente l'influence de la masse volumique du béton à l'état durci sur la résistance à la compression.

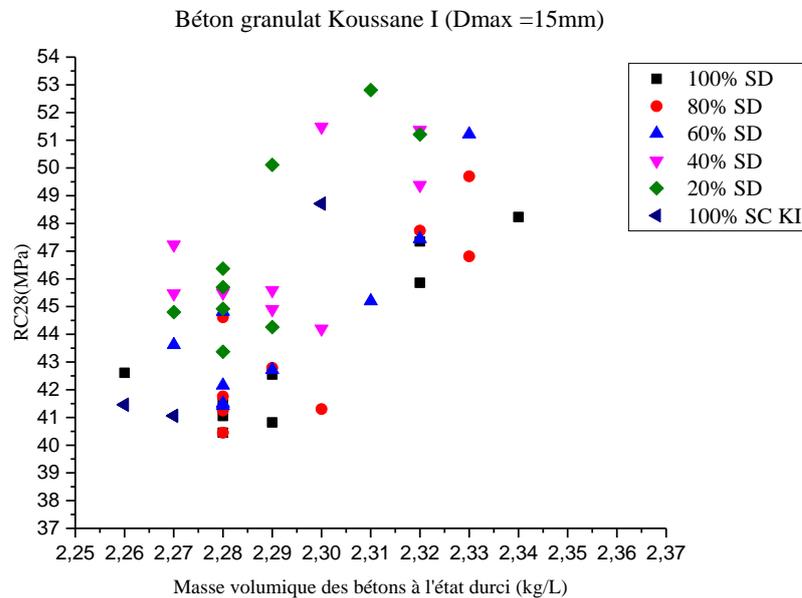


Figure 3.25. La résistance à la compression et la masse volumique des bétons avec granulats Koussane I et SD (Dmax=15mm)

D'après la figure 3.25, nous pouvons conclure, que :

- Les valeurs minimales de la résistance sont obtenues pour les valeurs minimales de la masse volumique ;
- Il y'a une augmentation de la résistance à la compression de 40 à 53 MPa, avec l'augmentation de la masse volumique de 2.26 à 2.31 kg/L ;
- Une légère diminution de la résistance avec une valeur de la masse volumique supérieure à 2.32 kg/L.

3.10.4. Granulats Koussane II (Dmax=15mm)

Les valeurs de la résistance à la compression sont liées avec les valeurs de la masse volumique du béton à l'état durci, comme il est présenté sur la figure 3.26 suivante :

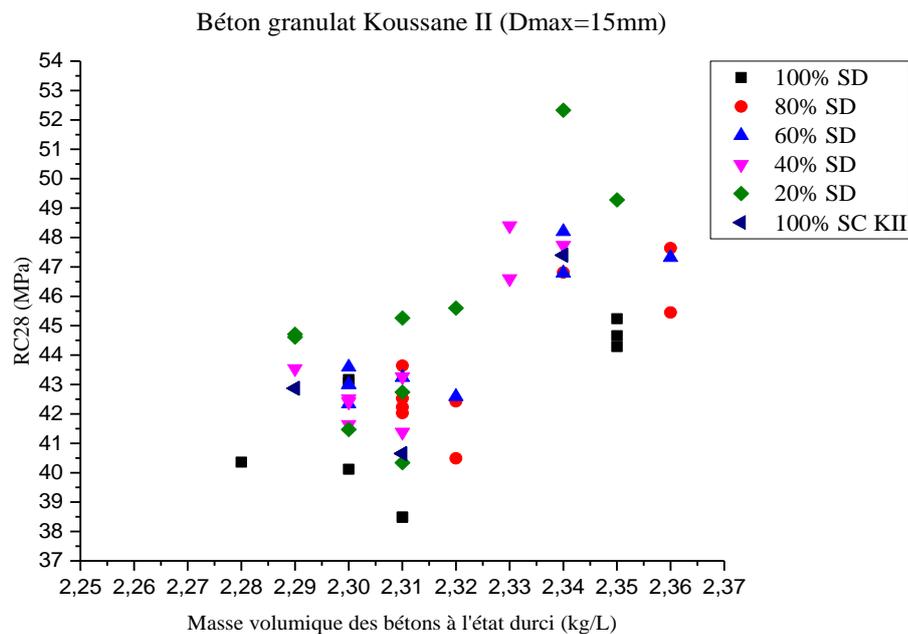


Figure 3.26. La résistance à la compression et la masse volumique des bétons avec granulats Koussane II et SD (Dmax=15mm)

D'après les résultats présentés dans la figure 3.26, nous pouvons constater que :

- Une influence nette de la masse volumique du béton à l'état durci, sur les valeurs de la résistance à la compression ;
- La valeur 52MPa, maximale, est obtenue pour une valeur de la masse volumique de 2.34 kg/L ;
- Une diminution de la résistance pour les valeurs de la masse volumique, supérieures à 2.34 kg/L ;

3.11. Conclusion :

Les principales conclusions que nous pouvons tirer, après cette série de plusieurs essais, portant sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci en fonction de taux variables de sables de dunes, de sables concassés et des agrégats, sont les suivants :

- Le taux de sable de dunes dans les sables corrigés influe sur le rapport G/S des bétons étudiés. En effet, il y a augmentation de ce rapport G/S quand le taux de sable de dunes augmente ;
- L'affaissement du béton varie en fonction du taux de sable des dunes incorporé dans le béton, les bétons ayant des taux inférieurs à 80% de sable des dunes enregistre un affaissement

mesuré différent de celui ciblé, cette diminution est liée au taux des éléments fins dans le sable corrigé. Ceci est dû à l'absorption, par ces éléments fins, d'une quantité d'eau nécessaire l'ouvrabilité et à l'hydratation de ciment.

- La masse volumique apparente des bétons frais varie en fonction du taux de sables des dunes et la consistance du béton, les bétons ayant un taux de sable des dunes inférieur à 60% présentent des valeurs plus élevées, ce qui signifie que ces bétons contiennent un taux de pores inférieur à celui des autres bétons avec un taux inférieur à 40% de sables des dunes.
- Un béton ayant un taux de 100% de sable de dune ou bien un taux de 100% de sable concassé, quel que soit le D_{max} des granulats et le mode de conservation, présente les faibles valeurs de la résistance mécanique à la compression. Nous pouvons justifier ces résultats par la distribution granulaire, le module de finesse du sable de dune et par le sable concassé qui contient un taux, de grains inférieurs à 0.08 mm, supérieur à 16%. Cette finesse absorbe une quantité importante d'eau. Aussi, il y a absence des grains de diamètre compris entre 1.25 et 3mm pour les bétons ayant un taux de 100% de SD ;
- Le mode de conservation influe sur la résistance à la compression, les éprouvettes conservées dans l'eau présentent les résultats les plus élevés par rapport à ceux des deux autres modes de conservation. Les résultats du mode de conservation à l'extérieur du laboratoire sont faibles, cette variation est due à l'accélération du durcissement des bétons exposés au soleil sous une température dépassant 45°C.
- Les taux de 60%, 40% et 20% de SD présentent les meilleurs résultats de la résistance à la compression et le module de finesse de ces sables corrigés varie entre 2.20 et 2.86, ainsi qu'une distribution granulaire étalée ;
- Il existe une influence directe de la masse volumique du béton à l'état durci sur sa résistance à la compression ;
- Nous constatons que pour un béton ordinaire avec une étendue granulaire compris entre 15mm et 25mm et un taux de sable de dune variant entre 60% et 20% de sable de dunes, nous obtenons des résistances à la compression du béton supérieures à 45MPa, sans adjuvant et sans addition.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Nous sommes convaincus qu'une des causes de dégradation rapide d'un béton est sa mauvaise formulation. Ce phénomène peut être accentué en cas de gradient de température important, de faible humidité ou de vent chaud. Nous avons pris, dans ce contexte, comme cas d'étude, dans notre programme de recherche, la région d'Adrar. Cette dernière se caractérise par un climat préjudiciable au béton et aux différents matériaux de construction. Les caractéristiques des constituants du béton, ses proportions, son malaxage, sa maniabilité, son état frais, l'hydratation du liant, sa résistance à la compression...etc., sont autant de paramètres pouvant être influencés par l'élévation de la température et par son gradient.

Les différentes méthodes de formulation des mélanges du béton, basées sur des modèles reliant la structure interne du béton à ses propriétés d'usage, permettent de déterminer une composition optimale répondant aux conditions de sa réalisation. Toutes ces méthodes sont simples et n'impliquent aucun calcul complexe. La connaissance de l'influence de divers facteurs sur les propriétés du béton frais et durci, doit être basée sur une compréhension du comportement du béton.

Le choix de la formulation d'un béton doit être basée sur des calculs préliminaires et de suivi par plusieurs gâchées d'essais au niveau du laboratoire avant d'appliquer les résultats au chantier. La réussite de l'application de la formulation demande l'expérience, la connaissance de l'influence des nombreux paramètres sur les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci, et la compréhension du comportement du béton. Le premier mélange d'essai peut être satisfaisant et correctement ajusté pour obtenir les propriétés désirées, lorsque ces trois éléments ; l'expérience, la connaissance et la compréhension sont toutes réunies.

D'après les résultats des essais d'identification sur les sables de dunes et les sables concassés ainsi que sur les sables corrigés, nous concluons que :

- Les sables de dunes étudiés sont propres mais leur distribution granulométrique est très serrée, ce qui influe directement sur la continuité d'un mélange granulométrique ;
- Le module de finesse de chaque sable de dunes, ne répond pas aux exigences des normes en vigueur ;
- La forme du sable concassé artificiel est plus anguleuse et la texture de sa surface est plus rugueuse que celle du sable de dunes naturel ;
- Le sable concassé contient beaucoup plus de fines (particules inférieures à 80 µm) avec un taux supérieur à 16%. Par conséquent, la maniabilité du béton frais est altérée par le besoin d'eau plus élevée ;

Conclusion générale

Après la correction du sable de dunes avec un taux de sable concassé variant entre 20% et 80%, nous avons constaté que :

- Les valeurs du module de finesse augmentent progressivement de 1.5 à 3.0 à cause du mélange binaire des sables de dunes et concassé ;
- Il y'a une amélioration de la distribution granulaire des sables corrigés par rapport au sable non corrigé (100% de sable de dunes ou 100% sable de concassé) ;
- Il y'a une variation de la masse volumique absolue des sables corrigés en fonction du taux de sable de dunes dans le sable corrigé ;

Pour connaître les meilleures propositions des sables corrigés, nous proposons d'utiliser les différents mélanges granulaires dans les compositions des bétons et effectuer des essais aux états frais et durci.

Les principales conclusions que nous pouvons tirer, après plusieurs séries d'essais expérimentaux, portant sur les propriétés du béton à l'état frais (l'affaissement et la masse volumique apparente) et à l'état durci (la résistance à la compression) en fonction de taux variables de sables de dunes, de sables concassés et des graviers, sont les suivantes :

- Les proportions des constituants des mélanges varient selon la consistance ciblée et le taux de sable de dunes dans le sable corrigé ;
- Les proportions des granulats fins et des gros granulats sont influencées par l'introduction de sable corrigé dans les mélanges ;
- Les proportions des autres granulats restent constantes pour tous les mélanges étudiés ;
- L'affaissement du béton varie en fonction du taux de sable de dunes incorporé dans le béton. Les bétons ayant des taux inférieurs à 80% de sable de dunes enregistrent un affaissement mesuré différent de celui ciblé, cette diminution est liée au taux des éléments fins dans le sable corrigé. Ceci est dû à l'absorption, par ces éléments fins, d'une quantité d'eau nécessaire à l'ouvrabilité et à l'hydratation de ciment ;
- La masse volumique apparente des bétons à l'état frais varie en fonction du taux de sables des dunes et de la consistance du béton. Les bétons ayant un taux de sable de dunes inférieur à 60% présentent des valeurs plus élevées de la masse volumique, ce qui signifie que ces bétons contiennent un taux de pores inférieur à celui des autres bétons ayant un taux inférieur à 40% de sable de dunes ;
- Un béton ayant un taux de 100% de sable de dunes ou un taux de 100% de sable concassé, quel que soit le Dmax des granulats et le mode de conservation, présente les faibles valeurs de la résistance mécanique à la compression. Nous pouvons justifier

ces résultats par une mauvaise distribution granulaire, un faible module de finesse du sable de dunes et il y a une absence de grains de diamètre compris entre 1.25 et 3mm;

- Le défaut du sable concassé provient souvent de son pourcentage élevé en fines. Il a été montré qu'une quantité d'environ 10% de filler calcaire dans un sable est généralement bénéfique pour les propriétés du béton. En revanche, les sables concassés que nous avons utilisés contiennent environ 15% de particules inférieures à 80 μm , lesquelles font augmenter de façon excessive le besoin en eau du béton. Malheureusement et pour des raisons pratiques et économiques, nous ne pouvons pas proposer de laver le sable au niveau du chantier pour éliminer les particules fines. La bonne solution que nous recommandons consiste à utiliser ces sables concassés tels quels, en conservant leurs distributions, avec moins de ciment et d'eau, grâce à l'emploi d'un adjuvant ;
- Les bétons, que nous avons mis au point, couvrent une gamme de résistance extrêmement large, de 30 MPa jusqu'à 57 MPa, pour les bétons avec un granulat de diamètre maximal de 25mm, et de 38MPa jusqu'à 52 MPa pour les bétons avec une étendue granulaire de 15mm ;
- La résistance à la compression à 28 jours diminue avec l'augmentation de l'affaissement qui est dû à la variation de la consistance passant de ferme à plastique, à très plastique ;
- Lorsque le rapport E/C augmente de 0.50, 0.52 et 0.55, la résistance à la compression des bétons diminue ;
- Le mode de conservation influe sur la résistance à la compression, les éprouvettes conservées dans l'eau présentent les résultats les plus élevés par rapport à ceux des deux autres modes de conservation. Les résultats du mode de conservation à l'extérieur du laboratoire sont faibles, cette variation est due à l'accélération du durcissement des bétons exposés au soleil sous une température dépassant 45°C ;
- Les taux de 60%, 40% et 20% de sable de dunes présentent les meilleurs résultats de la résistance à la compression du béton et le module de finesse de ces sables corrigés varie entre 2.20 et 2.86. Ces sables sont classés comme des sables préférentiels selon l'exigence des normes. Ainsi, la distribution granulaire est étalée ;

Nous constatons que pour un béton ordinaire avec une étendue granulaire comprise entre 15mm et 25mm et un taux de sable de dune variant entre 60% et 20% de sable de dunes, les résistances à la compression du béton sont supérieures à 45MPa, sans utilisation d'adjuvant ni addition.

Perspectives :

Dans le cadre de nos futurs travaux de recherche, nous pouvons citer quelques axes de recherche, pouvant faire l'objet d'une continuité des travaux que nous avons pu développer dans ma présente thèse. Je cite à titre d'exemples :

- Introduction des adjuvants et des additions cimentaires dans la formulation du béton,
- Recherche d'une composition optimale en utilisant un diamètre maximal de granulats de 8mm,
- Étude de la durabilité de notre composition optimale vis-à-vis des sulfates (Adrar est connue par son sol gypseux et ses Sebkhas),
- Étude des déformations différées du béton dues au retrait (Adrar est connue par son fameux gradient de température ; 0°C à 60°C)

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] Ouali S., Baddari A. K. K. (2006), "Etude géothermique du Sud de l'Algérie". *Revue des énergies renouvelables*, volume 9, numéro 4, pages 297--306.
- [2] Bellal S., A., et Hadeid M., (2016), " Accès à l'eau souterraine et transformations de l'espace oasien : le cas d'Adrar (Sahara du Sud-Ouest algérien)", *cahiers de géographie du Québec*, Volume 60, N° 169, pp 29-56.
- [3] Boudjemlie F., Matari O., Faci M. F. Y, (2016), "Cas des vagues de chaleur sur l'Algérie en 2009 et 2012", *Journal Algérien des Régions Arides (JARA)*.
- [4] Bouchouicha K., Hassan M., Bailek N., Aoun N., (2019), " Estimating the global solar irradiation and optimizing the error estimates under algerian desert climate", *Renewable energy*, 139, pp 844-858.
- [5] Khezazna A., (2017), "Les changements climatiques au Nord-Est algérien. Evolution récente et projections futures". Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- [6] IHFR et O. N. M, (2001), "Sécheresse et changement climatique en Algérie", Oran, Journée d'étude nationale.
- [7] Chabbi K., (2003), "Bétonnage et comportement du béton en milieu aride", Thèse de doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- [8] Dreux G., Festa J. (1998), "Nouveau guide du béton et de ses constituants", Huitième édition. Eyrolles. Paris.
- [9] Robins P. J., Austin S. A., Issaad A., (1992), "Suitability of GGBFS as a cement replacement for concrete in hot arid climates", *Mater. Struct.*, 25 (10), pp. 598–612, Doi: 10.1007/BF02472228.
- [10] Lachmet L., (1995), "Effet du type et de la durée de cure sur les propriétés mécaniques du béton en climat chaud". Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- [11] Bella N., Asroun A., Marbough M., Bella I. A., Hasnat M., (2012), "Etat de l'art sur le bétonnage par temps chaud et partiques au Sud algérien". Conférence nationale sur les matériaux locaux dans la construction Volume 1. February, pp. 1–8. Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [12] 305, A.C., (2010), "Guide to Hot Weather Concreting", *Am. Concr. Ist.*
- [13] El rayyes M. S., 1990, "Remedies to rapid setting in hot weather concreting". In *Admixtures for Concrete-Improvement of Properties: Proceedings of the international RILEM Symposium (Vol. 5, p. 137)*. CRC Press.

- [14] Rizzuto J. P., Kamal M., Elsayad H., Bashandy A., Etman Z., Aboel M. N., Shaaban I. G., (2020), "Effect of self-curing admixture on concrete properties in hot climate Conditions", *Constr. Build. Mater.*, 261, pp. 119933, Doi: 10.1016/j. conbuildmat, 2020,119933.
- [15] Soroka I., Ravina D., (1998), "Hot weather concreting with admixtures", *Cem. Concrete Composition*, pp. 129–36, Doi: 10.1016/s0958-9465(98)80005-x.
- [16] Bulletin du ciment, (1989), "Bétonnage par temps chaud", Numéro 16, pp. 9.
- [17] Neville A. M., (2010), "Concrete technology", Book. Second édition. Pearson. London. pp 161-163.
- [18] Abdel Rahim M., Abdel Rahim A., (2001), "The effect of admixtures on concrete properties", Thèse de doctorat. Université de Khartoum. pp 70-85.
- [19] Hampton J. S., (1981), "Extended Workability of Concrete Containing High-Range Water-Reducing Admixtures in Hot Weather", In *Development in the Use of Superplasticizers. Special Publication*, 68, pp 409-422.
- [20] Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G., (1999), "Microstructural features of concrete in relation to initial temperature". *SEM and ESEM characterization*, 29, pp. 369–75.
- [21] Berhane Z., (1984), "Evaporation of water from fresh mortar and concrete at different environments", *ACI J. In Journal proceedings*. Vol. 81. No. 6. pp 560-565.
- [22] Cim béton, (2013), "Les bétons : Formulation, fabrication et mise en œuvre". Collection technique Cinbéton. G11. Fiches techniques. Tome 2. pp 35-91.
- [23] Maslehuddin M., Shameem M., Ibrahim M., (2007), "Shrinkage of plain and silica fume cement concrete under hot weather", 29, pp. 690–9, Doi: 10.1016/j. cemconcomp, 2007.05.006.
- [24] Almusallam A. A., (2001), "Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete", *Cement and concrete composites* 23. pp 353-361.
- [25] *Techno Béton* 5. (2014), "Fissure de retrait plastique".
- [26] Azzouz L. Bouchicha M. Bendjillali K., (2004), "Influence des paramètres de cure sur la résistance de béton en climat chaud, Algérie Equip, pp. 8–10.
- [27] Mamillan M. (1971), "Recherches expérimentales sur l'accélération du durcissement du béton par le chauffage", *Cem. Concr. Compos. Res. Vol. I*, pp. 211–23.
- [28] Mouret M., Bascoul A., et Escadeillas G., (1997), "Drops in concrete strength in summer related to the aggregate temperature", *Cem. Concr. Res.*, Vol. 27, pp. 345–57.
- [29] Wang, Q., Jing, J., Pei, F., Yan, Y., (2011), "An explanation for the negative effect of elevated temperature at early ages on the late-age strength of concrete", pp. 7279–88,

- Doi: 10.1007/s10853-011-5689-z.
- [30] Techno Béton 7, (2014), "Le bétonnage par temps chaud". Bulletin technique. Association béton Québec. pp 1-5.
- [31] Nasir M., Al-amoudi O. S. B., Al-gahtani H. J., Maslehuddin M., (2016), "Effect of casting temperature on strength and density of plain and blended cement concretes prepared and cured under hot weather conditions", *Constr. Build. Mater.*, 112, pp. 529–37, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.211.
- [32] Kim J., Hun S., Chul Y., (2002), "Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I . Experimental results", *Cement and Concrete research*. Vol 32. N 7. pp 1087–1094.
- [33] Deodonne K., (2015), "Etudes des caractéristiques physico-chimiques des bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental", Thèse de doctorat. Université de Strasbourg, 2015. pp 18-25.
- [34] Boukli Hacene S., M., (2009), "Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen". Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen, 2009. pp 60-70.
- [35] Frank C., (2007), "Produits préfabriqués en béton file: Vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production". Thèse de doctorat. Université de Toulouse III.
- [36] Feret R., (1892), "Sur la compacité des mortiers hydrauliques", *Annales des Ponts Chaussées. Série 7. Vol 4.* pp 5-164.
- [37] Fuller W. B., Thompson S. E. (1907), "The Laws of Proportioning Concrete, *Transactions of the American society of civil engineers*. Vol 59. Issue 2. pp 59.
- [38] Abrams D. A., (1923), "Scientific methods of making concrete", *Chem. Ind.*, 16, pp. 1094–8, Doi: <https://doi.org/10.1002/jctb.5000424602>.
- [39] Lanchon R., (1988), "Cours de laboratoire 2: Granulats Bétons Sols". Tome 1. Edition Casteilla. Paris. pp 63-70.
- [40] Bolomey J. C., (1925), "Durcissement des mortiers et bétons", Paris Rouge Cie??.
- [41] Chanvillard G., Basuyaux O., (1996), "Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées", *Bulletin du laboratoires des ponts et chaussées*, 205. Réf 4047. pp. 49–6.
- [42] Caquot A., (1937), "Le rôle des matériaux inertes dans le béton", *Mémoires la société des ingénieurs civil*, France, pp. 563–82.
- [43] Faury J., (1942), "Le béton: influence de ses constituants inertes, règles à adopter pour

Références bibliographiques

- sa meilleure composition", Dunod.
- [44] Technique du bâtiment, (1952), "Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics", Institut technique du bâtiment et des travaux publics, France.
- [45] De Larrard F., (1999), "Structures granulaires et formulation des bétons. Ouvrage d'art OA 34. Etude et recherche des laboratoires des ponts et chaussées. pp 103-155.
- [46] Horsin H., Jourdain X., (2018), "Formulation d'un béton ordinaire". Ecole normale supérieure. Paris. pp. 1–14.
- [47] Baron J., Lesage R., (1976), "La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier". Laboratoire des ponts et chaussées.
- [48] Neville A. M., (2011), "Properties of concrete", Fifth Edition. Pearson. Malaysia. pp 2403-2455.
- [49] ACI 211. 1-91, (2002), "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete", Reported by ACI Committee 211.
- [50] Baron J., Ollivier J. P., (1996), "Les betons. Bases et données pour leur formulation". Edition Eyrolles. Paris
- [51] Chanvillard G., Basuyaux O., (1996), "Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées", Bull. des lab. des ponts chaussées, 0 (205), pp. 49–63.
- [52] Dupain R., Saint-Arroman J. C., (2009), "Aggregates, soils, cement and concretes: Characterization of civil engineering materials by laboratory tests". Edition Casteilla. Paris. pp 120-150.
- [53]: NA 442. (2013). CIMENT: "Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants".
- [54] NA 231. (2006), "Méthodes d'essais des ciments détermination de la finesse", pp.1–16.
- [55] NA 230. (2010), "Methodes d'essais des ciments".
- [56] NA 234. (2007), "Méthodes d'essais des ciments, détermination des résistances mécaniques".
- [57] NA 5042 (2007), "Méthodes d'essais des ciments, analyse chimique des ciments".
- [58] Faerber J., (2004); "Microscopie électronique à balayage, Microanalyse X par sonde électronique", pp. 1–53.
- [59] NF EN 1008, (2003), "Eau de gachage pour bétons d'essais et d'évaluation de l'aptitude, Spécifications d'échantillonnage, des processus de l'industrie du béton, l'emploi, y compris les eaux telle que l'eau de gachage pour béton". Deuxième tirage. Afnor.

Références bibliographiques

- [60] Bouziani T., Bederina, M., Hadjoudja, M., (2012), "Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC)", *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 6(1), pp. 59–64, Doi: 10.1007/s40069-012-0006-z.
- [61] NF EN 12620. (2003). "Granulats pour béton".
- [62] Robitaille V., Tremblay D., (1997), "Mécanique des sols, Théorie et pratique". Modulo éditeur. Bibliothèque nationale du Canada. pp 38-67.
- [63] NF EN 1097-6, (2001), "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats", Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau".
- [64] NF EN 933-8+A1, (2015), "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8 : Évaluation des fines. Équivalent de sable".
- [65] NF EN 9331, (1997), "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1 : Détermination de la granularité — Analyse granulométrique par tamisage".
- [66] P18-595, (1990), "Graulats. Valeur de bleu méthylène".
- [67] XP P18-545, (2008), "Granulats éléments de définition, conformité et codification".
- [68] Serna F., Lagneau J., Carpentier J. M., (2014), "La diffraction des rayons X : une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques", *Diffr. Des Rayons X Catal.*, (1), pp. 1–11.
- [69] Abdeldjalil M., Yousfi S., (2020), "Identification of sands of dune and concretes using a granular model - Case of arid region", *Case Stud. Constr. Mater.* 13, Doi: 10.1016/j.cscm, 2020.e00458.
- [70] Abdeldjalil M., (2018), "Formulation du beton à base des matériaux, (Granulats d'Adrar) Gravier/Sable concassé et sable de dune", *Edition des universités Européennes*, pp. 27–37.
- [71] NF EN 1744-1, (1998), "Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats Partie 1 : Analyse chimique".
- [72] Ingalkar R. S., Harle S. M., (2017), "Replacement of Natural Sand by Crushed Sand in the Concrete", 2(1), pp. 13–22, Doi: 10.11648/j.larp.20170201.12.
- [73] NF EN 932-2, (1999), "Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats. Partie 2 : Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire".
- [74] XP 18-591, (1990), "Détermination de la propreté superficielle".
- [75] NF EN 1097-5, (1999), "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 5 : Détermination de la teneur en eau par séchage en

- étuve".
- [76] NF EN 1097-2, (1998), "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation".
- [77] NF EN 1097-1/A1, (2004), "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval)".
- [78] NF EN 1097-3, (1998), "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 3 : Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire".
- [79] NF EN 933-3, (1997), "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 3: Détermination de la forme des granlats- Coefficient d'aplatissement".
- [80] Rmili A., Ouezdou M. Ben., Added M., Ghorbel E., (2009), "Incorporation of crushed sands and tunisian desert sands in the composition of self compacting concretes Part I: study of formulation", *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, 3(1), pp. 3–9, Doi: 10.4334/ijcsm.2009.3.1.003.
- [81] Rmili A., Ouezdou, M. Ben., (2009), "Incorporation of crushed sands and tunisian desert sands in the composition of self compacting concretes Part II: SCC fresh and hardened states characteristics". *International journal of concrete structure and materials*. Vol 3. N°1. pp. 11–4.
- [82] Benabed B. (2018), "Effect of combined use of crushed sand and algerian desert dune sand on fresh properties and strength of self-compacting concrete", *Epa. - J. Silic. Based Compos. Mater.* 70(5), pp. 155–67, Doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.29.
- [83] Larbi Benmalek M., Derbala R., (2016), "Elaboration et caractérisation d'un béton à base de sable dunaire et de sous-produits industriels, Colloque "Sols et matériaux à problèmes". 9-11 février. Tunisie. pp 1-9.
- [84] Seif E. S. S. A., (2013), "Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: An experimental study", *Arab. J. Geosci.*, 6(3), pp. 857–63, Doi: 10.1007/s12517-011-0376-6.
- [85] Lynda Amel C., Kadri E. H., Sebaibi Y., Soualhi H., (2017), "Dune sand and pumice impact on mechanical and thermal lightweight concrete properties", *Constr. Build. Mater.*, 133, pp. 209–18, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.043.
- [86] NA 2595, (2006), "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques

- des granulats. détermination de la masse volumique réelle du filler. Méthode au pycnomètre".
- [87] Legrand C., (1972), "Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais", *Matériaux Constr.*, 5(5), pp. 275–95.
- [88] NA 5102, (2013), "Essais pour béton frais, Essai d'affaissement".
- [89] NF EN 12350-6, (1999), "Essai pour béton frais. Partie 6: Masse volumique".
- [90] NA 2600, (1992), "Béton- Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques", pp. 3.
- [91] NA 2598, (1992), "Bétons- Mise en place par microtable vibrante", pp. 6.
- [92] NA 5093, (2007), "Essai pour béton durci. Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance", pp. 7.
- [93] NA 435, (1992), "Béto durci- Détermination de la masse volumique", pp. 3.
- [94] NA 427, (1989), "Béton-Détermination de la résistance à la compression des éprouvettes", pp. 5.

Travaux scientifiques publiés du doctorant

- 1) **MOULAY ALI A., KHELAFI H., BELHADJ AISSA D., TAIBI M.,** (2018), « Caractérisations des constituants des bétons élaborés dans les zones arides, exemple de la région d'Adrar », Séminaire Internationale de Génie Civil 2018 (SIGC2018), École Nationale Polytechnique Maurice Audin d'Oran, le 27 et 28 November 2018.
- 2) **MOULAY ALI A., KHELAFI H., BELHADJ AISSA D., TAIBI M.,** (2018), « Étude de formulations des bétons en fonction d'un sable corrigé élaborés dans la région aride d'Adrar », Séminaire Internationale de Génie Civil 2018 (SIGC2018), École Nationale Polytechnique Maurice Audin d'Oran. Oran le 27 et 28 November 2018.
- 3) **MOULAY ALI A., KHELAFI H.,** (2018), « Caractérisations des bétons élaborés dans les zones arides. Vers une formulation optimale laboratoire/chantier ». Journée Doctorale sur les Énergies renouvelables, Matériaux et Environnement. Laboratoire d'Énergie Environnement et Système d'Information (LEESI). Université Ahmed Draïa Adrar. Le 18 Avril 2018.
- 4) **MOULAY ALI A., KHELAFI H., BELHADJ AISSA D., TAIBI M.,** (2019). « Étude expérimentale sur l'influence d'un sable corrigé sur les propriétés aux états frais et durci des bétons élaborés dans la région aride d'Adrar ». Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l'Environnement en Zones Arides. Université Ahmed DRAIA, Adrar le 17&18 Février 2019.
- 5) **MOULAY ALI A., ABDELJALIL M., KHELAFI H.,** “An experimental study on the optimal compositions of ordinary concrete based on corrected dune sand - Case of granular range of 25mm”, Case Studies in Construction Materials, n°14 (2021), 459-468, www.elsevier.com/locate/cscm.
- 6) **BELHADJ AISSA D., SEMCHA A., MOULAY ALI A., TAIBI M.,** « Valorisation des poussières des concasseurs des roches de la région d'Adrar comme addition fine dans les bétons autoplaçants », Séminaire Internationale de Génie Civil 2018 (SIGC2018), École Nationale Polytechnique Maurice Audin d'Oran. Oran le 27 et 28 Novembre 2018.

- 7) TAYEBI M., KHELAFI H., **MOULAY ALI A.**, BELHADJ AISSA D.,” État de fissurations des constructions en zone aride, cas de la région d’Adrar”. Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l’Environnement en Zones Arides. Université Ahmed DRAIA, Adrar le 17&18 Février 2019.
- 8) BELHADJ AISSA D., SEMCHA A., **MOULAY ALI A.**, TAIBI M., « Formulation et étude d'un béton autoplaçant en région aride d'Adrar », Conférence Internationale sur les Matériaux, le Patrimoine et l’Environnement en Zones Arides. Université Ahmed DRAIA, Adrar le 17&18 Février 2019.

Annexes

Annexe 1 :

Application de la méthode de DREUX GORISSE sur un béton ferme avec les granulats de Koussane I et sable de dunes MA

Étape 1 : Détermination de la résistance à la compression.

Le béton ordinaire que l'on cherche à formuler à une résistance visée à 28 jours de 32 MPa.

En reprenant l'équation : $f'_{c28} = f_{c28} \cdot 1.15 = 36.8 \text{ MPa}$

Étape 2 : Sélection de la consistance du béton frais.

La consistance ciblée : Béton ferme, affaissement=4cm

Étape 3 : Sélection de $D_{max}=25\text{mm}$

Étape 4 : Calcul du dosage en ciment et la quantité d'eau.

♦ Classe vraie de ciment à 28 jours, $\sigma'_c = 55 \text{ MPa}$

Détermination du rapport C/E de béton ferme

$f'_{c28} = G \cdot \sigma'_c (C/E - 0,5)$ On obtient $C/E = f'_{c28} / (\sigma'_c \cdot G + 0,5)$

Valeurs approximatives du coefficient granulaire G : $G = 0,50$

On a $C/E = 36.8 / (0,50 \cdot 55 + 0,5)$ donc $C/E = 2.01$

Détermination du dosage en ciment du béton ferme :

On va utiliser l'abaque de DREUX GORISSE

Et la projection de rapport $C/E=2.01$ et l'affaissement $A=4\text{cm}$. On trouve que $C=390 \text{ kg/m}^3$

Détermination dosage de béton (dosage de ciment et l'eau)

Dépare le rapport $C/E = 2.01$ et $C=390 \text{ kg/m}^3$ alors $E = 194.20 \text{ L/m}^3$

Pour un mélange granulaire de diamètre, $D_{max}=25\text{mm}$, la correction sur le dosage en eau égale à 0. $E = 194.20 \text{ L/m}^3$

Étape 5 : Tracé de la courbe granulaire de référence.

Détermination des points O, A, B :

Point O : (0,063 ; 0).

Point B : (25 ; 100).

Point A : (12.5; 42.02)

Étape 6 : Détermination du pourcentage des sables et des graviers

Sable de dunes MA : 26%

Gravier 3/8 : 12%

Gravier 8/15 : 12%

Gravier 15/25 : 50%.

Étape 7 : Coefficient de compacité

Pour un diamètre maximale $D=25$ et une consistance ferme, le serrage est effectué avec une vibration puissante, le coefficient de compacité égale : $\gamma = 0.840$,

Lorsque le sable roulé et le gravier concassé une correction de -0.01 sur la compacité, alors le coefficient de la compacité égale $\gamma = 0.830$,

Volume Total Absolu $V_s = 1000 \times \gamma = 830$ L

Volume Absolu Ciment $V_{ciment} = C / \gamma_c = 390/3 = 130$ L

$V_{granulat} = V_s - V_c = 830 - 130 = 700$ L

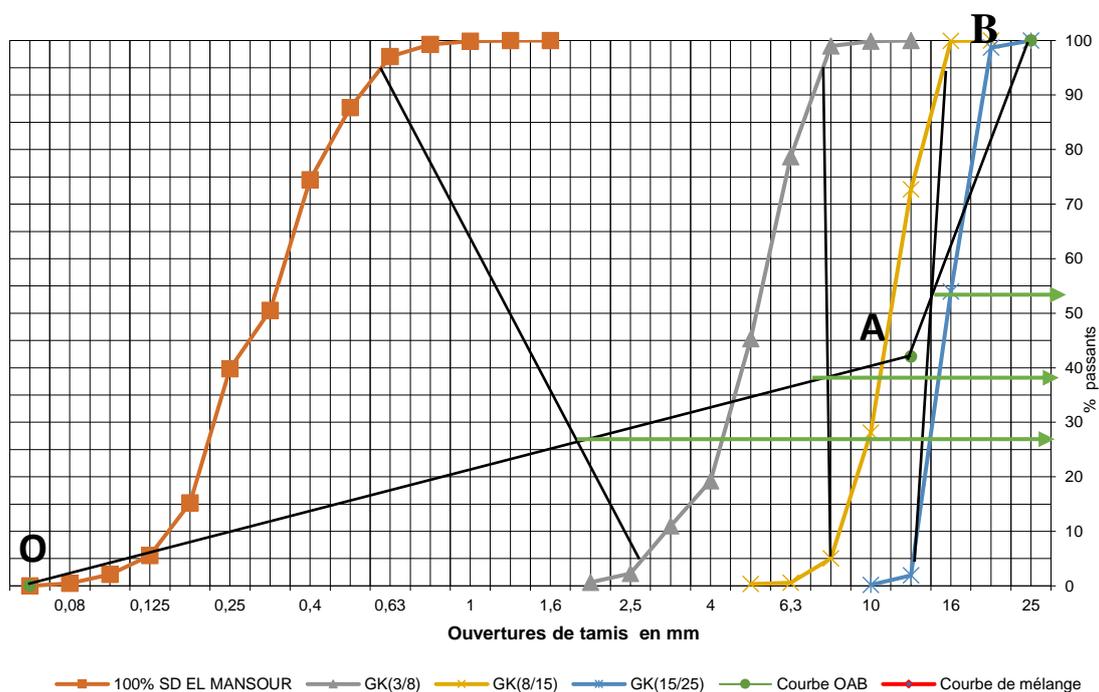


Figure A1. 1. Courbes granulométriques des granulates et la courbe de référence

Étape 8 : Calcul de la quantité de chaque constituant :

$$S(0/2) = 0.700 \times 0,26 \times 2650 = 482.30 \text{ kg/m}^3 ;$$

$$G(3/8) = 0,700 \times 0,12 \times 2640 = 221.76 \text{ kg/m}^3 ;$$

$$G(8/15) = 0,700 \times 0,12 \times 2630 = 220.92 \text{ kg/m}^3 ;$$

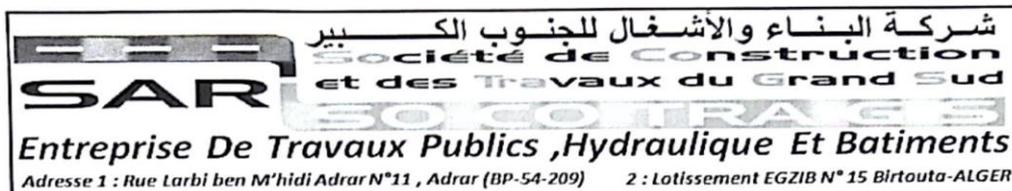
$$G(15/25) = 0,700 \times 0,50 \times 2640 = 924.00 \text{ kg/m}^3 ;$$

Tableau A1.1. Proportions des constituants du béton

N°	Composant	(%) Granulaire	Volume (L)	Mv S (g/cm ³)	Masse (kg)
1	Ciment	/	130	3,10	390.00
2	Eau	/	194.20	1,00	194.20
3	Sable	26	182.00	2,65	482.30
5	3/8	12	84.00	2,64	221.76
6	8/15	12	84.00	2,63	220.92
7	15/25	50	350.00	2,64	954.00
Total		100	1024.20		2433.18
Densité Théorique du Béton					2,43

Annexe 2 :

Exemple du taux de production des granulats de la carrière Koussane I



Ref / N°...002. /2020

ADRAR ,Le :02 Janvier 2020

A Monsieur Le Directeur de l'Industrie
et des Mines de la Wilayad' A D R A RObjet :/ Déclaration de production
2° Semestre 2019
Site de Koussane

Monsieur ,

Nous avons l'honneur de vous comminiquer notre
production d'agrégats pour la période du 2°Semestre 2019 de
notre carrière de KOUSSANE de OULED AHMED comme suit :

MOIS	P R D U I T S					TOTAUX	OBSERVATIONS
	0/3	3/8	8/15	15/25	0/31,5		
3°T 2019	769,00	1148,00	1183,00	959,00	725,00	4784,00	
4°T 2019	264,00	402,00	387,00	327,00	243,00	1623,00	
TOTAUX	1033,00	1550,00	1570,00	1286,00	968,00	6407,00	

Veuillez agréer Monsieur Le Directeur l'expression
de mes salutations distinguées.

Le Gérant,

Adresse 1 : Rue Larbi ben M'hidi Adrar N°11 , Adrar (BP-54-209) Tél : 049 36 37 81 /Fax : 049 36 37 80
Adresse 2 : Lotissement EGZIB N° 15 Birtouta-ALGER Tél : 021 44 16 04 /Fax : 021 44 16 05
e-mail : socotraqs@hotmail.com

Figure A2. 1. Taux de production semestrielle de la carrière Koussane I