

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 Sciences de la Technologie



THESE DE DOCTORAT LMD

Filière : Génie Civil

Spécialité : Génie Civil

Présentée et soutenue publiquement par :

Mr. TAYEBI M'hammed

Le : 25/10/2022

Thème

**Etude des types de fissurations dans les constructions
en climat aride, cas d'étude : Adrar**

Devant le jury composé de :

SEMCHA Abdélaziz	Pr	Université d'Adrar	Président
KHELAFI Hamid	Pr	Université d'Adrar	Rapporteur
MOULI Mohamed	Pr	Université ENPOran	Examineur
BALEGH Benamar	MCA	Université d'Adrar	Examineur
BENABDELFATTAH Mohamed	MCA	Université d'Adrar	Examineur

Année Universitaire 2021/2022

بسم الله والحمد لله،

والصلاة والسلام الأتمان الأكملان على سيد الوجود،

سيدنا وحيينا وشفيعنا ووسيلتنا إلى الله،

الحبيب المحبوب مولانا محمد رسول الله،

صلى الله عليه وآله وصحبه وسلم.

الحمد لله
حمدا كثيرا

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 m'a inculquées.

À ma femme et mes enfants : Amira Zineb, Aicha
Marwa, Meriem Yasmine et Bouchra Kheira, les plus
grandes sources de mon bonheur.

À ma chère sœur, et mes chers frères Abdelbasset, Abdellah et ses
enfants, à toute la famille.

À tous mes amis.

REMERCIEMENTS

Je voudrais adresser mes premiers remerciements qui vont à mon encadreur, Professeur Hamid KHELAFI, Professeur à l'université d'Adrar et responsable de notre formation doctorale, qui m'a dirigé tout au long de ces cinq années de thèse, avec beaucoup de compétence, d'enthousiasme et de disponibilité.

J'adresse également ma gratitude et mes remerciements à Monsieur SEMCHA Abdélaziz, Professeur à l'Université d'Adrar, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Mes vifs remerciements sont adressés à Monsieur MOULI Mohamed, Professeur à l'ENPO à Oran, et Monsieur BALEGH Benamar ainsi que Monsieur BENABDELFATTAH Mohamed, Maîtres de Conférences classe A à l'Université d'Adrar, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner et de participer à mon jury de thèse, ainsi que le Pr MEKERTA Belkacem membre de CFD qui m'a enseigné, et le Dr BASSOUD Abdelkader pour ses conseils, ses encouragements.

Je remercie également toutes les personnes qui ont participé directement et indirectement au bon déroulement de ce travail, pour leur aide et la gentillesse qu'ils m'ont réservés, leur soutien, exceptionnellement à Mr HARROUZ Abdelkader, Professeur à l'Université d'Adrar, et Mr BELATRECH Djamel, docteur de l'Université de Ouargla.

Je souhaite remercier Messieurs YAICHI Abdelkrim, et SOULAIMANI Yassine, responsable de laboratoire MDC à l'université d'Adrar.

Je ne saurais oublier d'adresser un souvenir ému à tous mes collègues en particulièrement au Dr. Abderrahmane MOULAY ALI, Mr. Djelloul BELHADJ AISSA, et Mr. Abderrahmane REGGANI.

Enfin, je voudrais exprimer mes plus profonds remerciements à ma mère, à ma chère femme, à mes enfants, pour leur soutien constant, leur patience et leur encouragement tout au long de ces années de thèse.

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Sommaire	i
Liste des figures, photos et tableaux	v
Résumé.....	1
المخلص	2
Abstract.....	3
Liste des notations.....	4
Introduction générale.....	6
Chapitre 1 : État de l'art sur la fissuration dans les constructions	
1.1. Introduction.....	10
1.2. Nature de fissuration.....	10
1.2.1. Fissures structurelles.....	11
1.2.2. Fissures non structurelles.....	11
1.3. Différents types de fissuration	11
1.3.1. Fissuration du béton plastique	12
1.3.1.1. Fissures dues au retrait plastique	12
1.3.1.2. Fissures de tassement plastique	13
1.3.2. Fissuration du béton durci	13
1.3.2.1. Retrait de séchage	13
1.3.2.2. Contraintes thermiques	14
1.3.2.3. Réactions chimiques	15
1.3.2.4. Corrosion des armatures	15
1.3.2.5. Mauvaises pratiques de construction	15
1.3.2.6. Surcharges de construction	15
1.3.2.7. Erreurs de conception et de détail.....	16
1.3.2.8. Charges appliquées de l'extérieur	16
1.4. Emplacement et description des fissures	16
1.4.1. Emplacement des fissures.....	16
1.4.1. Description des fissures	17
1.5. Fissurations précoces	18
1.5.1. Introduction.....	18
1.5.2. Les différents types de fissures précoces.....	18
1.5.3. Causes de la fissuration à un âge précoce.....	20
1.5.4. Facteurs affectant la fissuration à un âge précoce	21
1.5.4.1. Processus de conception	22
1.5.4.2. Matériaux et paramètres de mélange	22
1.5.4.3. Procédures de construction	23
1.5.4.4. Conditions environnementales.....	23
1.5.4.5. Conditions de chargement externe.....	24
1.5.5. Conséquences de la fissuration précoce	25
1.6. Lien entre fissuration et retrait plastique	25
1.7. Principaux facteurs affectant la fissuration par retrait plastique	26
1.8. Retrait plastique dans le matériau cimentaire.....	27
1.8.1. Introduction.....	27
1.8.2. Mécanisme du retrait plastique	28
1.8.3. Évaporation.....	30

1.8.4.	Pression capillaire	33
1.9.	Méthodes d'essai	35
1.9.1.	ASTM C 1579	35
1.9.2.	Méthode d'essai à l'anneau (NT BUILD 433)	36
1.9.3.	Méthode de mesure de pression capillaire	37
1.10.	Conclusion	38
Chapitre 2 : Etat de fissuration des constructions en zone aride, cas de la région d'Adrar		
2.1.	Introduction.....	40
2.2.	Climat désertique (aride)	40
2.2.1.	Zones arides	40
2.2.2.	Climat d'Adrar.....	41
2.3.	Etat des fissurations des constructions à Adrar	42
2.3.1.	État des projets investiguer	42
2.3.1.1.	1 ^{er} projet : Hôpital 60 lits à Aougrouit.....	42
2.3.1.2.	Bureau de poste à Timimoun RDC + 3 étages	44
2.3.1.3.	Institut national spécialisé de formation professionnelle (INFSP) de Timimoun ..	45
2.3.1.4.	Nouveau siège de la Daïra de Timimoun	47
2.3.1.5.	Hôpital de 60 lits à Zaouiet Kounta.....	48
2.3.1.6.	Hôpital général de 240 lits à Adrar.....	52
2.3.1.7.	Centre anti cancer "140 lits" à Adrar	53
2.3.1.8.	Lycée Berriche dans la commune de Sali.....	55
2.3.1.9.	APC de la commune de Tsabit	56
2.3.2.	État des projets réclamés par l'organisme CTC d'Adrar.....	58
2.3.2.1.	Projet « Adrar Touat Gaz » à Oued Zine, Adrar.....	58
2.3.2.2.	Nouveau Lycée Tamentit « Sidi Ahmed DIDI »	58
2.3.2.3.	Centre Culturel Islamique (CCI), Adrar :	59
2.3.2.4.	Subdivision d'hydraulique de Bordj Badji Mokhtar	60
2.4.	Conclusion	61
Chapitre 3 : Matériaux utilisés et méthodologie		
3.1.	Introduction.....	64
3.2.	Identification des matériaux	65
3.2.1.	Caractérisation des matériaux.....	65
3.2.1.1.	Ciment.....	65
3.2.1.2.	Sables.....	65
3.2.1.2.1.	Analyse granulométrique.....	66
3.2.1.2.2.	Caractéristiques physiques.....	66
3.2.1.2.3.	Analyse chimique	67
3.2.1.3.	Granulats.....	68
3.2.1.3.1.	Essai de propreté des graviers.....	69
3.2.1.3.2.	Coefficient d'absorption des granulats	69
3.2.1.3.3.	Teneur en eau.....	69
3.2.1.3.4.	Masses volumiques apparente et absolue	69
3.2.1.3.5.	Essai Micro-Deval	69
3.2.1.3.6.	Essai Los-Angles	69
3.2.1.4.	Eau de gâchage	70
3.2.1.5.	Adjuvant	70
3.2.1.5.1.	Description.....	70
3.2.1.5.2.	Domaines d'application	70
3.2.1.5.3.	Propriété	71
3.2.1.5.4.	Caractéristiques.....	71

3.2.1.5.5.	Mode d'emploi.....	71
3.2.1.6.	La cure	71
3.2.1.6.1.	Description.....	71
3.2.1.6.2.	Domaines d'application	72
3.2.1.6.3.	Propriété	72
3.2.1.6.4.	Caractéristiques.....	72
3.2.1.6.5.	Mode d'emploi.....	72
3.3.	Formulation des bétons.....	72
3.3.1.	Méthode de calcul de la composition du béton selon Faury.....	72
3.3.1.1.	Courbe granulométrique	72
3.3.1.2.	Béton témoin et traité avec la cure	74
3.3.1.3.	Béton avec un superplastifiant.....	74
3.3.2.	Méthode de calcul de la composition du béton selon Dreux-Gorisse	74
3.3.2.1.	Bétons témoins.....	78
3.3.2.1.1.	La consistance très plastique (affaissement =12cm et E/C=0.55).....	78
3.3.2.1.2.	La consistance plastique (affaissement =8cm et E/C=0.51).....	78
3.3.2.2.	Bétons avec superplastifiant	79
3.3.2.2.1.	La consistance très plastique (affaissement =12cm et E/C=0.51).....	79
3.3.2.2.2.	La consistance plastique (affaissement =8cm et E/C=0.48).....	80
3.3.2.3.	Propriétés des bétons frais	80
3.3.2.3.1.	Confection des éprouvettes.....	81
3.3.2.3.1.1.	Types de moules	81
3.3.2.3.1.2.	Mise en place du béton	81
3.3.2.3.1.3.	Mode de conservation des éprouvettes	81
3.3.2.4.	Propriété du béton à l'état durci.....	82
3.4.	Méthode et procédure d'essai.....	82
3.4.1.	Méthode d'essai (ASTM C1579)	82
3.4.2.	Procédures d'essai à base de la méthode de formulation « Faury »	84
3.4.3.	Procédures d'essai à base de la méthode de formulation « Dreux-Gorisse »	85
3.5.	Conclusion	87
Chapitre 4 : Résultats expérimentaux et interprétations		
4.1.	Introduction.....	90
4.2.	Résultats selon la méthode de Faury	90
4.2.1.	Variations de la température	90
4.2.2.	Affaissement du béton	91
4.2.3.	Dallâtes et progression des fissures	92
4.3.	Résultats suivant la Méthode de Dreux-Gorisse.....	97
4.3.1.	Optimisation de la formulation.....	97
4.3.1.1.	Consistance des bétons	97
4.3.1.1.1.	Bétons témoins.....	97
4.3.1.1.1.1.	Consistance très plastique.....	97
4.3.1.1.1.2.	Consistance plastique.....	98
4.3.1.1.2.	Béton avec superplastifiant.....	99
4.3.1.1.2.1.	Consistance très plastique.....	99
4.3.1.1.2.2.	Consistance plastique.....	99
4.3.1.2.	Résistance des bétons	100
4.3.1.2.1.	Bétons témoins.....	100
4.3.1.2.1.1.	Consistance très plastique.....	100
4.3.1.2.1.2.	Consistance plastique.....	101
4.3.1.2.2.	Béton avec superplastifiant.....	102

4.3.1.2.2.1. Consistance très plastique.....	102
4.3.1.2.2.2. Consistance plastique.....	103
4.3.2. Variations des fissures dans les dallâtes	104
4.3.2.1. Bétons témoins.....	105
4.3.2.1.1. Bétons contenant 100% sable de dunes	105
4.3.2.1.1.1. Consistance très plastique.....	105
4.3.2.1.1.2. Consistance plastique.....	106
4.3.2.1.2. Bétons contenant 80% sable de dunes	107
4.3.2.1.2.1. Consistance très plastique.....	107
4.3.2.1.2.2. Consistance plastique.....	108
4.3.2.1.3. Bétons contenant 60% sable de dunes	109
4.3.2.1.3.1. Consistance très plastique.....	109
4.3.2.1.3.2. Consistance plastique.....	110
4.3.2.2. Bétons avec superplastifiant	112
4.3.2.2.1. Bétons contenant 100% de sable de dunes	112
4.3.2.2.1.1. Consistance très plastique.....	112
4.3.2.2.1.2. Consistance plastique.....	113
4.3.2.2.2. Bétons contenant 80% de sable de dunes	114
4.3.2.2.2.1. Consistance très plastique.....	114
4.3.2.2.2.2. Consistance plastique.....	115
4.3.2.2.3. Bétons contenant 60% de sable de dunes	115
4.3.2.2.3.1. Consistance très plastique.....	115
4.3.2.2.3.2. Consistance plastique.....	116
4.3.2.3. Bétons traités par la cure.....	118
4.3.2.3.1. Bétons contenant 100% de sable de dunes	118
4.3.2.3.1.1. Consistance très plastique.....	118
4.3.2.3.1.2. Consistance plastique.....	119
4.3.2.3.2. Bétons contenant 80% de sable de dunes	120
4.3.2.3.2.1. Consistance très plastique.....	120
4.3.2.3.2.2. Consistance plastique.....	121
4.3.2.3.3. Bétons contenant 60% sable de dunes	122
4.3.2.3.3.1. Consistance très plastique.....	122
4.3.2.3.3.2. Consistance plastique.....	123
4.4. Conclusion	124
Conclusion générale et perspectives.....	127
Références bibliographiques.....	130

Liste des figures

Chapitre 1 : État de l'art sur la fissuration dans les constructions

Figure 1.1 Types de fissures du béton et leurs causes.	12
Figure 1.2. Représentation schématique de la formation de fissures de tassement plastique ..	13
Figure 1.3. Les effets du volume des agrégats sur le retrait du béton	14
Figure 1.4. Les effets des contraintes thermiques sur la fissuration des structures en béton. ..	14
Figure 1.5. Emplacement des différents types de fissures	16
Figure 1.6. Fissures transversales d'âge précoce dans un béton récemment coulé	18
Figure 1.7. Fissure transversale de début d'âge dans une dalle de chaussée en béton.....	19
Figure 1.8. Fissure d'angle précoce dans une dalle de trottoir en béton	19
Figure 1.9. Fissures aléatoires précoces apparues dans une dalle de plancher en béton	19
Figure 1.10. Fissures cartographiques apparues dans une dalle de plancher en béton.....	19
Figure 1.11. Fissure de retrait retenue survenue dans une bordure en béton	20
Figure 1.12. Différents facteurs qui influencent la fissuration du béton durci.....	21
Figure 1.13. Schématisation de la fissuration à l'état frais en termes de retrait et capacité de déformation	25
Figure 1.14. Diagramme de fissuration par retrait plastique	26
Figure 1.15. Illustration des mécanismes régissant le retrait dans les matériaux cimentaires	27
Figure 1.16. Illustration des trois phases structurales du béton en fonction du retrait autogène et de l'évolution de la chaleur d'hydratation.	28
Figure 1.17. Capacité de déformation en traction du béton frais	28
Figure 1.18. Mécanisme d'accumulation de la pression capillaire et du retrait plastique	29
Figure 1.19. Images au MEB d'une suspension séchante de cendres volantes et d'eau[106]...30	30
Figure 1.20. Nomographe ACI pour l'estimation du taux d'évaporation de l'eau du béton.....	32
Figure 1.21. Taux d'évaporation de l'eau libre et de l'eau accumulée à la surface	32
Figure 1.22. Représentation d'un ménisque d'eau dans un pore axisymétrique perpendiculaire à la surface d'un matériau poreux solide.	33
Figure 1.23. Géométrie du moule ASTM C 1579	36
Figure 1.24. Configuration de la méthode d'essai en anneau (dimensions en mm).	36
Figure 1.25. Composants d'un capteur de pression CPSS.....	37

Chapitre 2 : Etat de fissuration des constructions en zone aride, cas de la région d'Adrar

Figure 2.1. Les zones arides dans le monde	41
Figure 2.2. Variations de la température annuelle (année 2021) dans la région d'Adrar.....	41
Figure 2.3. Variations de l'humidité annuelle (année 2021) dans la région d'Adrar	42

Chapitre 3 : Matériaux utilisés et méthodologie

Figure 3.1. Courbes granulométriques du sable de dunes et du sable concassé.....	66
Figure 3.2. L'équivalent de sable de dunes mesuré visuellement et au piston.....	67
Figure 3.3. Courbes granulométriques des graviers 3/8 et 8/15.	68
Figure 3.4. Essais mécaniques LA et MDE des granulats 3/8 et 8/15.....	70
Figure 3.5. Composition de béton selon Faury.....	73
Figure 3.6. Composition d'un béton témoin très plastique avec 100% SD.....	76
Figure 3.7. Organigramme des bétons étudiés témoins.....	77
Figure 3.8. Organigramme des bétons étudiés avec superplastifiant	77

Figure 3.9. Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams.	80
Figure 3.10. Éprouvette avant démoulage.	81
Figure 3.11. Éprouvette après démoulage.	82
Figure 3.12. Éprouvette après écrasement.	82
Figure 3.13. Moule de béton des dallâtes suivant la norme ASTM C1579.	83
Figure 3.14. Les types de bétons étudiés élaborés par la méthode de Faury.	84
Figure 3.15. Différents types des bétons élaborés selon la norme ASTM C1579.	85
Figure 3.16. Les différents types des bétons très plastiques étudiés.	85
Figure 3.17. Les différents types des bétons plastiques étudiés.	86
Figure 3.18. Mesure de la fissuration dans les dallâtes à l'aide des caméras.	87
Chapitre 4 : Résultats expérimentaux et interprétations	
Figure 4.1. Variation de température du béton frais des différents dallâtes.	91
Figure 4.2. Variation de l'affaissement des différents types de bétons.	92
Figure 4.3. Courbes d'évolution des longueurs des fissures des différentes dallâtes.	94
Figure 4.4. Histogrammes des valeurs de largeur des fissures sur les différentes dallâtes.	95
Figure 4.5. Variation de l'affaissement des bétons très plastiques en fonction du pourcentage de sable de dunes.	98
Figure 4.6. Variation de l'affaissement des bétons plastiques en fonction du pourcentage de sable de dunes.	98
Figure 4.7. Variation de l'affaissement des bétons très plastiques avec superplastifiant en fonction du pourcentage de sable de dunes.	99
Figure 4.8. Variation de l'affaissement des bétons plastiques avec superplastifiant en fonction du pourcentage de sable de dunes.	100
Figure 4.9. Résistance à la compression des bétons très plastiques en fonction du pourcentage de sable de dunes.	101
Figure 4.10. Résistance à la compression des bétons plastiques en fonction du pourcentage de sable de dunes.	101
Figure 4.11. Résistance à la compression des bétons très plastiques avec superplastifiant en fonction du pourcentage de sable de dunes.	102
Figure 4.12. Résistance à la compression des bétons plastiques avec superplastifiant en fonction du pourcentage de sable de dunes.	103
Figure 4.13. Variations des fissures des bétons très plastiques, témoins et avec 100%SD.	106
Figure 4.14. Variations des fissures des bétons plastiques, témoins et avec 100%SD.	107
Figure 4.15. Variations des fissures des bétons très plastiques, témoins et avec 80%SD.	108
Figure 4.16. Variations des fissures des bétons plastiques, témoins et avec 80%SD.	109
Figure 4.17. Variations des fissures des bétons très plastiques, témoins et avec 60%SD.	110
Figure 4.18. Variations des fissures des bétons plastiques, témoins et avec 60%SD.	111
Figure 4.19. Variations des fissures des bétons très plastiques, avec superplastifiant et 100%SD.	112
Figure 4.20. Variations des fissures des bétons plastiques, avec superplastifiant et avec 100%SD.	113
Figure 4.21. Variations des fissures des bétons très plastiques, superplastifiant et 80%SD.	114
Figure 4.22. Variations des fissures des bétons plastiques, superplastifiant et avec 80%SD.	115
Figure 4.23. Variations des fissures des bétons très plastiques, superplastifiant et 60%SD.	116

Figure 4.24. Variations des fissures des bétons plastiques, superplastifiant et avec 60%SD.	117
Figure 4.25. Variations des fissures des bétons très plastiques, traités par cure et 100%SD.	118
Figure 4.26. Variations des fissures des bétons plastiques, traités par cure et 100%SD.....	119
Figure 4.27. Variations des fissures des bétons très plastiques, traités par cure et 80%SD...	120
Figure 4.28. Variations des fissures des bétons plastiques, traités par cure et avec 80%SD.	121
Figure 4.29. Variations des fissures des bétons très plastiques, traités par cure et 60%SD...	122
Figure 4.30. Variations des fissures des bétons plastiques, traités par cure et avec 60%SD.	123

Liste des photos

Chapitre 2 : Etat de fissuration des constructions en zone aride, cas de la région d'Adrar

Photo 2.1. Fissures au niveau du palier d'escalier.....	43
Photo 2.2. Fissures au niveau du poteau.....	43
Photo 2.3. Béton sec aux coins.....	43
Photo 2.4. Fissures apparentes lézards.....	43
Photo 2.5. Ségrégation en du bas de poteau.....	44
Photo 2.6. Fissure sous longrine.....	44
Photo 2.7. Mauvaise jonction du coffrage.....	45
Photo 2.8. Fissure lézard au poteau.....	45
Photo 2.9. Fissure au-dessus de la dalle.....	45
Photo 2.10. Fissure diagonale dans la dalle.....	45
Photo 2.11. Socle en béton fissuré.....	46
Photo 2.12. Mur fissuré en horizontalement.....	46
Photo 2.13. Le tracé de joint de dilatation fissuré.....	46
Photo 2.14. Le tracé de joint de dilatation fissuré.....	46
Photo 2.15. Fissure dans le poteau (Bloc administratif).....	47
Photo 2.16. Fissure lézard horizontale.....	47
Photo 2.17. Fissure dans le hall de réception.....	47
Photo 2.18. Désordre sous fenêtres.....	47
Photo 2.19. Fissure se divise en deux.....	48
Photo 2.20. Désordre dépassant le linteau.....	48
Photo 2.21. Fissure lézard sous linteau.....	48
Photo 2.22. Fissure diagonale sur le mur.....	48
Photo 2.23. Désordres sous armatures.....	49
Photo 2.24. Faïençage au poteau.....	49
Photo 2.25. Manque nettoyage du coffrage.....	49
Photo 2.26. Coulage sur une couche de sable.....	49
Photo 2.27. Eclatement du bas de poteau.....	50
Photo 2.28. Eclatement à mi-hauteur.....	50
Photo 2.29. Fissure suivant le joint de dilatation.....	50
Photo 2.30. Retrait dans le béton du plancher.....	50
Photo 2.31. Coffrage mal exécuté.....	51
Photo 2.32. Retrait et reprise de bétonnage.....	51
Photo 2.33. Trous et granulats apparents.....	51

Photo 2.34. Manque des fines entraînant des bulles.....	51
Photo 2.35. Retrait apparent à la plateforme.	52
Photo 2.36. Absence de la cure source des fissures.....	52
Photo 2.37. Fissure dans le linteau.	52
Photo 2.38. Vides sous armatures du mur voile.	52
Photo 2.39. Fissure à l'interface mur-poteau.....	53
Photo 2.40. Fissure autour de fenêtre.	53
Photo 2.41. Fissure provenant du linteau.	54
Photo 2.42. Reprise de bétonnage.	54
Photo 2.43. Fissure au-dessus du linteau.....	54
Photo 2.44. Fissure au-dessus du linteau.....	54
Photo 2.45. Pores sur le mur voile.....	54
Photo 2.46. Mauvaise jonction de béton.	54
Photo 2.47. Fissures des enduits.....	55
Photo 2.48. Dislocation de la couche d'enduit.	55
Photo 2.49. Fissure entre palier-paillasse.	55
Photo 2.50. L'effet de reprise du bétonnage.....	55
Photo 2.51. Qualité du béton médiocre..	56
Photo 2.52. Ségrégation et faible enrobage.	56
Photo 2.53. Perte de liant entre poteau-poutre.....	57
Photo 2.54. Fissure dans la poutre principale.....	57
Photo 2.55. Multi-reprise de bétonnage.....	57
Photo 2.56. Mauvaise exécution du coffrage.	57
Photo 2.57. Fissures apparentes.....	58
Photo 2.58. Fissures aux semelles.	58
Photo 2.59. Fissuration à l'arcade.	58
Photo 2.60. Fissuration rectiligne intérieur de l'arcade.....	58
Photo 2.61. Fissuration autour du joint.....	59
Photo 2.62. Fissuration autour des éléments structuraux	59
Photo 2.63. Joint de dilatation non matérialisé.....	59
Photo 2.64. Fissures au-dessous de la poutre.	60
Photo 2.65. Eclatement des enduits.	60
Photo 2.66. Fissure entre appuis.....	60
Photo 2.67. Fissure diagonale entre appuis.	61
Chapitre 3 : Matériaux utilisés et méthodologie	
Photo 3.1. Sable de dunes de la région d'Adrar « Bouda, Elmansour ».....	65
Chapitre 4 : Résultats expérimentaux et interprétations	
Photo 4.1. Mesure de température du béton frais	91
Photo 4.2. Fissurations des différentes dallâtes exposées à l'extérieur et à l'intérieur du laboratoire.....	93

Liste des tableaux

Chapitre 1 : État de l'art sur la fissuration dans les constructions

Tableau 1.1. Mauvaises pratiques de construction	15
Tableau 1.2. Description des types de fissures	17
Tableau 1.3. Facteurs qui influencent les propriétés thermiques et mécaniques du béton durcissant	24

Chapitre 3 : Matériaux utilisés et méthodologie

Tableau 3.1. Composition chimique du ciment utilisé	65
Tableau 3.2. Composition minéralogique du ciment utilisé	65
Tableau 3.3. Propriétés physiques des sables	66
Tableau 3.4. Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs	67
Tableau 3.5. Propriétés physico-mécaniques des granulats	68
Tableau 3.6. Composition de l'eau de gâchage (mg/L).....	70
Tableau 3.7. Proportions des constituants des bétons ($C=350\text{kg/m}^3$)	74
Tableau 3.8. Proportions des constituants des bétons ($C=350\text{kg/m}^3$)	74
Tableau 3.9. Proportions des constituants des bétons très plastiques témoins en fonction des sables de dunes ($C=350\text{ kg/m}^3$)	78
Tableau 3.10. Proportions des constituants des bétons plastiques témoins en fonction des sables de dunes ($C=355\text{ kg/m}^3$)	78
Tableau 3.11. Proportions des constituants des bétons très plastiques avec superplastifiant en fonction des sables de dunes ($C=350\text{ kg/m}^3$)	79
Tableau 3.12. Proportions des constituants des bétons plastiques avec superplastifiant en fonction des sables de dunes ($C=350\text{ kg/m}^3$)	80

Chapitre 4 : Résultats expérimentaux et interprétations

Tableau 4.1. L'apparition des fissures et son développement à l'intérieur et à l'extérieur du laboratoire	96
Tableau 4.2. L'apparition des fissures et leur développement dans les bétons témoins.	111
Tableau 4.3. L'apparition des fissures et son développement dans les bétons avec superplastifiant (intérieur et extérieur du laboratoire).....	117
Tableau 4.4. L'apparition des fissures et leur développement dans les bétons traités par cure.	124

Résumé

L'objectif de cette thèse est d'étudier expérimentalement l'influence du climat aride sur la fissuration du béton dans la région d'Adrar au sud d'Algérie. Dans ce contexte, notre travail s'est basé sur des essais expérimentaux, dans les mêmes conditions climatiques de cette région et avec les matériaux locaux. L'étude de la fissuration des bétons a été réalisée en respectant la norme ASTM C1579. Ces bétons ont été formulés selon les deux méthodes de formulations connues, en l'occurrence de Faury et celle de Dreux-Gorisse.

Les bétons testés ont suivi trois variantes : béton avec superplastifiant, béton traité par la cure et béton témoin. Toutes nos éprouvettes de béton ont subi deux modes de conservation, à l'intérieur du laboratoire et à l'extérieur.

Les résultats ont montré que tous les bétons élaborés selon la méthode de Faury présentent des fissures. Cependant, avec l'introduction de superplastifiant, nous avons enregistré une diminution des fissures d'environ 50% en longueur et 66% en largeur. Cette diminution a été évaluée à environ 40% en longueur et 50% en largeur, après traitement par la cure.

En comparaison avec les bétons confectionnés par la formule Dreux-Gorisse, une diminution des fissures de 47% et de 100% a été enregistrée dans les modes extérieurs et intérieurs successifs des bétons témoins, et de 100% pour tous les types de bétons contenant le superplastifiant, et ceux traités par cure était inférieure de 33% dans le mode extérieur, et 100% dans le mode intérieur.

L'optimisation de la formulation à base de matériaux locaux suivant la méthode Dreux-Gorisse, a dégagé des mélanges de bétons satisfaisants, contenant 80%SD et 60%SD pour les deux consistances ; très plastique et plastique avec superplastifiant.

Mots clés : Fissuration, Climat aride, Température, Humidité Relative, Matériaux locaux, Béton.

المخلص

الهدف من هذه الرسالة هو الدراسة التجريبية لتأثير المناخ الجاف على تشققات الخرسانة في منطقة أدرار جنوب الجزائر. في هذا السياق، اعتمد عملنا على الاختبارات التجريبية، في نفس الظروف المناخية لهذه المنطقة وعلى المواد المحلية. تم إجراء دراسة تشققات الخرسانة من خلال احترام معيار ASTM C1579 تمت صياغة هذه الخرسانة وفقاً لطريقتين معروفتين للصبغة، في هذه الحالة Dreux-Gorisse و Faury.

اتبعت الخرسانة المختبرة ثلاثة أنواع: الخرسانة بالمضافات، الخرسانة الخاضعة للعلاج والخرسانة الشاهدة بدون إضافة خليط. خضعت جميع عينات الخرسانة لدينا إلى طريقتين للحفظ، داخل المختبر وخارجه.

أظهرت النتائج تشققات في جميع أنواع الخرسانة المصنوعة بطريقة Faury. ومع ذلك، مع إدخال المضاف، سجلنا انخفاضاً في الشقوق بحوالي 50% في الطول و 66% في العرض. تم تقييم هذا النقص بحوالي 40% في الطول و 50% في العرض، بعد خضوعها للعلاج.

مقارنةً بالخرسانة المصنوعة باستخدام صيغة Dreux-Gorisse، تم تسجيل انخفاض في الشقوق بنسبة 47% و 100% في الوضعين الخارجي والداخلي على التوالي للخرسانة بدون مضاف، و 100% لجميع أنواع الخرسانة التي تحتوي على المضاف، وكانت تلك الخاضعة للعلاج أقل بنسبة 33% في الوضع الخارجي، و 100% أقل في الوضع الداخلي.

أدى تحسين الصيغة على أساس المواد المحلية وفقاً لطريقة Dreux-Gorisse، من وجهة نظر الانسياب والميكانيكا وتطورات الشقوق، إلى إنتاج خلطات خرسانية مرضية، تحتوي على 80% و 60% من رمل العروق لكلا الانسيابين؛ بلاستيكي وبلاستيكي للغاية مع مادة مضافة.

الكلمات المفتاحية: التشققات، المناخ الجاف، درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، المواد المحلية، الخرسانة.

Abstract

The objective of this thesis is to study experimentally the influence of the arid climate on the cracking of concrete in the region of Adrar in the south of Algeria. In this context, our work was based on experimental tests, in the same climatic conditions of this region and with local materials. The study of the cracking of the concretes was carried out by respecting the ASTM C1579 standard. These concretes were formulated according to the two known methods of formulation, in this case Faury Dreux-Gorisse.

The tested concretes followed three variants: concrete with admixture, concrete treated by curing and control concrete without admixture. All our concrete specimens underwent two preservation modes, inside the laboratory and outside.

The results showed that all the concretes made with Faury's method showed cracks. However, with the introduction of the admixture, we recorded a decrease in cracks of about 50% in length and 66% in width. This reduction was evaluated at about 40% in length and 50% in width, after treatment by the cure.

Compared to the concretes made with the Dreux-Gorisse formula, a decrease in cracks of 47% and 100% was recorded in the successive exterior and interior modes of the concretes without admixture, and 100% for all types of concretes containing the admixture, and those treated by curing were 33% lower in the exterior mode, and 100% lower in the interior mode.

The optimization of the formulation based on local materials according to the Dreux-Gorisse method, resulted in satisfactory concrete mixtures, containing 80%SD and 60%SD for both consistencies; very plastic and plastic with admixture.

Keywords: Cracking, Arid climate, Temperature, Relative humidity, Local materials, Concrete.

Liste des notations

SD : Sable de dunes

SC : Sable concassé

G : Gravier

BP : Béton plastique

BTP : Béton très plastique

Int. Lab : mode de conservation intérieur de laboratoire

Ext. Lab : mode de conservation extérieur de laboratoire

MV : masse volumique

Mf : module de finesse

D.T.I : dallâtes témoins conservées à l'intérieur de laboratoire

D.T.E : dallâtes témoins conservées à l'extérieur de laboratoire

D.A.E : dallâtes avec superplastifiant conservées à l'extérieur de laboratoire

D.A.I : dallâtes avec superplastifiant conservées à l'intérieur de laboratoire

D.C.I : dallâtes traités par cure conservées à l'intérieur de laboratoire

D.C.E : dallâtes traités par cure conservées à l'extérieur de laboratoire

BTPA : Béton très plastique avec superplastifiant

BPA : Béton plastique avec superplastifiant

BTPC : Béton très plastique traité par cure

BPC : Béton plastique traité par cure

STG : Sidi Moussa Travaux Généraux

LTPS : Laboratoire des Travaux Publics de Sud

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

HR : Humidité Relative

T : Température

Introduction générale

Introduction générale :

1. Mise en contexte

La durabilité des bâtiments en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits [1]. Ces ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante, pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus [2]. Lorsqu'ils ne peuvent pas résister à ces agressions, des désordres apparaissent dans le béton de ces structures.

L'apparition de divers types de fissures dans un bâtiment pendant la construction, après son achèvement lorsqu'il est soumis à une charge superposée ou pendant sa durée de vie est un phénomène courant. Un élément de construction développe des fissures lorsque la contrainte dans les composants dépasse sa résistance. La contrainte dans l'élément de construction peut être causée par des forces appliquées de l'extérieur, telles que des charges permanentes, dynamiques, vents ou sismiques, le tassement des fondations etc. Elle peut être induite de l'intérieur par des mouvements thermiques, des changements d'humidité, une déformation élastique, une action chimique etc.

Le climat aride cause aussi des problèmes en construction par un temps chaud et une très faible humidité relative, des contraintes et déformations supplémentaires importantes peuvent se produire dans les éléments retenus en raison du retrait et de la variation de température. La présence de fissures peut ne pas être souhaitable du point de vue esthétique, mais de manière plus significative, et dans certaines situations, pourrait nuire à la durabilité des éléments en béton et par conséquent à leur intégrité structurelle.

La région d'Adrar dans le Sud d'Algérie, est une zone aride dont le système de construction en béton vient remplacer l'ancien système de construction en adobe à base d'argile pour améliorer la résistance mécanique, mais il a montré des désordres inquiétants tels que des fissures apparentes dans la plupart des constructions et même des constructions récentes.

La fissuration est l'un des premiers défauts des structures en béton et est capable de réduire la durabilité et la durée de vie d'une structure si elle n'est pas atténuée [3]. Ces problèmes s'aggravent encore lorsque la fissuration se produit avant que le béton ne commence à durcir [4].

Par ailleurs, le bétonnage par temps chaud cause plusieurs problèmes dus principalement à l'évaporation excessive de l'eau qui influe sur les différents paramètres d'évaluation de la durabilité du béton [5]. La température dans ces régions du Sud atteint des valeurs importantes et peut dépasser 50°C [6]. Puis la conception du mélange de béton influe sur la fissuration plastique à la fois sur le plan chimique et physique [7], [8], telles que la

composition chimique et la quantité de ciment, le rapport E/C, la quantité, la forme et la taille des fines, ainsi que la distribution des granulats [9], [10].

Ces conditions climatiques chaudes affectent aussi les propriétés du béton frais et durci. L'effet négatif le plus important du temps chaud sur le béton frais est la fissuration de retrait plastique [11]. C'est principalement un défi pour les éléments structuraux, par exemple les dalles de plancher à grande portée, exposés à des conditions environnementales qui ont tendance à favoriser des taux d'évaporation élevés [12].

2. Problématique

Adrar est située dans une zone aride, sèche avec une haute température atteignant 60 °C et un taux d'humidité ne dépassant pas 8% en été. Cette agressivité de climat sollicite les ingénieurs et les chercheurs à chercher des matériaux adéquats et bien adaptés. Les anciens habitants ont réussi à trouver des matériaux locaux, isolants, mais ne possédant pas une grande résistance aux charges ou et aux intempéries (pluie et vent).

Devant le développement actuel et la nécessité aux matériaux de répondre aux deux questions précédentes, on continue à utiliser des matériaux comme le ciment, le parpaing etc., sans étude spécifique de cette zone. Ce changement des choix engendre des fissures dans le bâtiment, et cela est dû à plusieurs paramètres parmi lesquels, le climat.

Plusieurs études ont été effectuées pour résoudre ce problème, en prenant à chaque fois l'un des facteurs qui paraît source du phénomène. Néanmoins, le facteur d'aridité reste parmi les importants facteurs à étudier pour trouver des solutions ou améliorer les matériaux utilisés pour qu'ils soient durables et adéquats avec cette région.

3. Objectif de la thèse

Cette thèse a pour objet, de faire le point sur la question de type et de maîtrise des fissures, et tout particulièrement en climat aride, sur le béton (cas d'Adrar).

D'abord, nous devons déterminer l'origine des fissures, puis leur apparition et les risques de leur évolution dans le temps, pour enfin pouvoir proposer éventuellement des solutions de réparation ou de formulation du béton utilisé.

4. Structure de la thèse

Pour réaliser ces objectifs, notre plan de travail est divisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons abordé l'état de l'art, c'est un résumé des recherches bibliographiques et des travaux scientifiques pertinents de cette problématique, nous présentons les fissures dans les constructions qui peuvent être provoquées par plusieurs facteurs, parmi lesquelles le climat aride. Nous essayerons de comprendre le phénomène et sa source dans les matériaux à base climatique, à travers les études et les expérimentations précédentes.

Le deuxième chapitre est consacré au diagnostic du problème, par une investigation sur terrain pour mieux cerner les défauts et leurs origines, et cela par des visites effectuées par nos soins de plusieurs projets et ouvrages pour pouvoir exploiter et connaître le point de départ ; nous sommes arrivés au fait que la majorité des fissures et dégradations se créent au jeune âge de béton. Cela nous a dirigé à faire une partie expérimentale de caractérisation et d'identification des matériaux locaux utilisés dans les chantiers de la région.

Dans un troisième chapitre, nous avons procédé à l'identification des matériaux et aux méthodes utilisées dans cette partie expérimentale. Les types des bétons élaborés sont basés sur des formulations de la méthode de Faury (utilisée localement). Nous améliorons aussi d'autres compositions de bétons vis-à-vis de la consistance et de la résistance. Pour cela, nous avons procédé aux corrections du mélange sable concassé + sable de dunes, en choisissant une autre méthode très connue, en l'occurrence celle de Dreux-Gorisse. Nous avons aussi utilisé dans ces circonstances sévères un superplastifiant réducteur d'eau ainsi qu'un produit de cure pour minimiser l'évaporation dangereuse de l'eau pour cause d'exposition de nos éprouvettes de bétons au climat aride. Nos essais ont été réalisés selon la norme américaine ASTM C 1579.

Le chapitre résultats et discussion numéroté quatre, a fait l'objet d'une présentation, d'abord de l'influence de climat aride sur des bétons fabriqués selon la méthode Faury. Il était question d'étudier les bétons témoins, ceux avec superplastifiant puis d'autres traités par la cure. Afin de bien justifier nos conclusions, nous avons arrêté deux modes de conservation de nos éprouvettes d'essai ; à l'intérieur du laboratoire et à l'extérieur.

Ensuite, nous étudierons l'effet du sable corrigé sur les propriétés du béton lors de l'introduction de sable concassé, et en ajoutant à ce béton un superplastifiant, tous ces types de béton sont basés sur la formulation de Dreux-Gorisse. Enfin, on étudiera les bétons qui auront les meilleurs résultats du point de vue rhéologique et mécanique vis-à-vis de la fissuration et l'exposition à un climat aride, afin de comparer les résultats que nous obtiendrons avec ceux de la méthode de Faury.

Chapitre 1 :

État de l'art sur la fissuration
dans les constructions

1.1. Introduction

Les fissures dans les constructions sont des phénomènes assez courants. Mais les fissures imprévues dans le béton, qui n'ont pas été prévues lors de la conception, affectent la durabilité et l'intégrité de la structure. Il en résulte une mauvaise performance de la structure pendant sa durée de vie.

Parce que les structures en béton ont aussi des inconvénients et que les bâtiments se détériorent avec le temps, la fissuration semble probable et toutes sortes de structures en témoignent comme par exemple les blocs de béton, les colonnes, les dalles et les murs en briques [13]. L'objet de la forme, du nombre, de la largeur et de la longueur des fissures sur la surface de la structure indique le premier degré de dégradation et la capacité des armatures en béton à tenir. Les fissures sont généralement divisées en deux types [14]. Il y a les fissures du béton et les fissures non structurelles [15], [16], [17]. Ces fissures non structurelles peuvent se produire en raison d'une pression interne, d'une mauvaise exécution etc. Les fissures peuvent varier considérablement en taille.

Les fissures généralisées ont une largeur (a) inférieure à 1 mm, (b) moyenne - de 1 mm à 2 mm, (c) large - supérieure à 2 mm [15], [16], [18]. Les fractures actives provoquent une grande gêne et nécessitent un traitement soigneux car elles sont structurellement dangereuses. De petites fissures d'apparence insignifiantes peuvent également se développer et peuvent éventuellement conduire à une défaillance structurelle grave [19].

La nature et le modèle des fissures varient en fonction de la cause profonde de la fissuration. Il est donc important de comprendre les principaux types de fissures qui peuvent se produire dans le béton. Les fissures sont principalement dues à l'exposition à l'environnement, à une méthodologie de construction inadéquate, à une conception inadéquate et à des détails incorrects.

Il est important d'identifier la principale préoccupation concernant toute fissure. La principale préoccupation est de savoir si les fissures affectent l'intégrité structurelle en raison d'une durabilité réduite.

1.2. Nature de fissuration

Les fissures dans les bâtiments peuvent être classées en fissures structurelles et non structurelles.

Les fissures structurelles sont causées par les charges appliquées, tandis que les fissures non structurelles sont principalement le résultat des propriétés du béton et de ses matériaux constitutifs, des pratiques de conception et des cas où les conditions en service provoquent une détérioration [20].

1.2.1. Fissures structurelles

Les fissures structurelles peuvent être dues à diverses raisons telles qu'une mauvaise conception structurelle, une surcharge des composants structurels, une surcharge du sol sur lequel le bâtiment est construit ou d'autres facteurs similaires.

Les fissures structurelles mettent en danger la stabilité du bâtiment et peuvent être difficiles à rectifier. Les fissures étendues des murs voiles, des poutres, des colonnes ou des dalles, etc. sont des exemples de fissures structurelles [21].

1.2.2. Fissures non structurelles

Les fissures non structurelles sont généralement dues aux forces internes développées dans les bâtiments en raison de la modification de la taille des éléments de construction, des variations d'humidité, des variations de température, de l'effet des gaz, des liquides et des solides sur les éléments de construction. Les fissures non structurelles peuvent être réparées à condition que les raisons de ces fissures soient identifiées et que des mesures correctives appropriées soient prises pour empêcher leur réapparition [22].

1.3. Différents types de fissuration

Le type de fissure fournit des informations utiles pour aider à comprendre les effets d'une fissure sur la stabilité structurelle. La figure 1.1 présente un résumé des différents types de fissures du béton et de leurs causes possibles. L'état d'une fissure est d'une importance capitale.

Les conditions environnementales d'une fissure influencent la mesure dans laquelle elle affecte l'intégrité de la structure. Une plus grande exposition à des conditions agressives augmente la possibilité d'instabilité structurelle. La taille des fissures va des microfissures qui exposent le béton à l'efflorescence aux fissures plus importantes causées par des conditions de charge externes. Le fait de noter la taille, la forme et l'emplacement des fissures peut aider à déterminer leurs causes initiales.

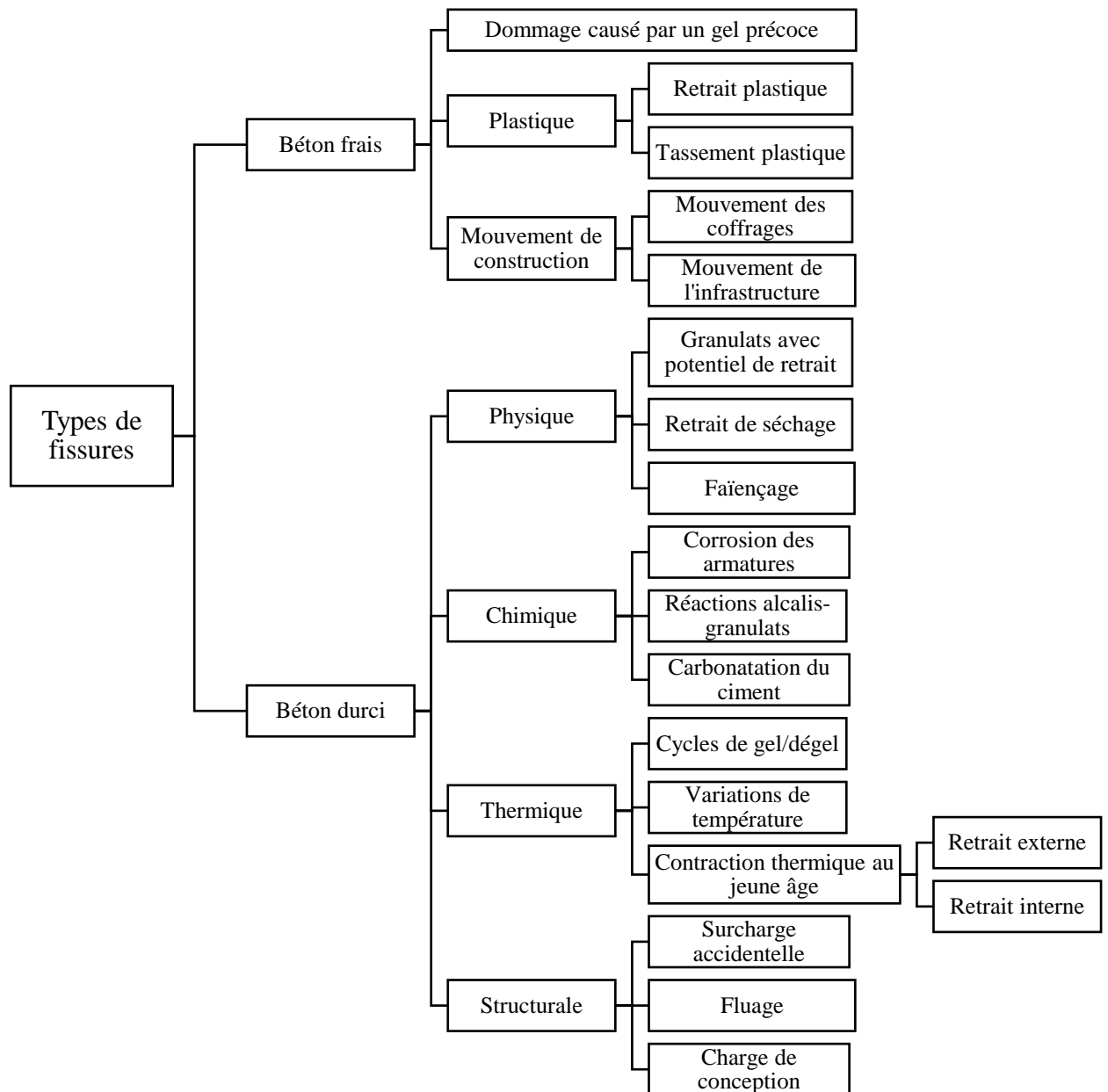


Figure 1.1 Types de fissures du béton et leurs causes [21].

1.3.1. Fissuration du béton plastique

Les fissures qui se forment dans le béton plastique peuvent être classées en deux catégories : les fissures de retrait plastique et les fissures de tassement plastique. Ces types résultent du processus de retrait et de ségrégation qui se produit lorsque le béton frais est mis en place. Ces fissures apparaissent généralement une à six heures après la mise en place du béton.

1.3.1.1. Fissures dues au retrait plastique

Lorsque les particules plus lourdes du béton se déposent sous l'effet de la gravité, elles poussent l'eau et les particules plus légères vers la surface. C'est ce qu'on appelle le ressuage. Les effets de la température ambiante et de la vitesse du vent sont proches les uns des autres [23] ; le taux d'évaporation de l'eau de surface peut dépasser le taux de ressuage, ce qui assèche

la couche superficielle du béton et la faisant rétrécir par déshydratation. Cependant, le béton situé sous la couche superficielle est encore bien hydraté et conserve son volume. Cela applique des forces de traction opposées à la partie inférieure du béton séchant en surface, provoquant un profil de béton fissuré.

1.3.1.2. Fissures de tassement plastique

Le processus de tassement est un facteur important de la résistance du béton à différents niveaux de sa formation. La fissuration par tassement plastique peut se produire à la suite de restrictions de la consolidation du béton frais, comme l'utilisation de barres d'armature en acier ou de coffrages.

La figure 1.2 illustre comment se forment les fissures de tassement plastique. Lorsque le béton saigne, l'eau remonte à la surface. La sédimentation se produit ensuite lorsque les granulats et le ciment se déplacent vers le bas sous l'effet de la gravité.

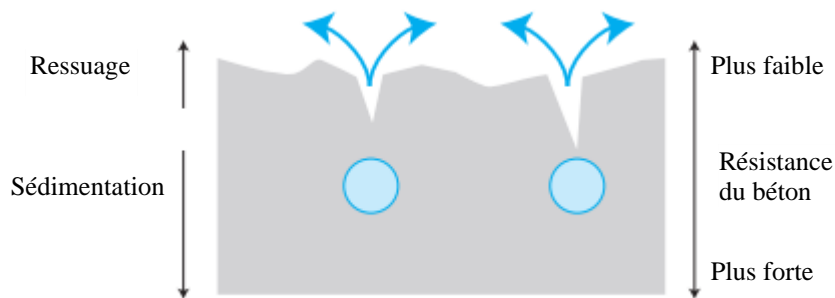


Figure 1.2. Représentation schématique de la formation de fissures de tassement plastique

Les fissures de tassement plastique peuvent également se produire dans des formes impliquant un changement soudain de la profondeur du béton, ce qui provoque des fissures au point de changement.

1.3.2. Fissuration du béton durci

La fissuration du béton durci peut avoir de nombreuses causes. Ces causes comprennent : (a) le retrait de séchage, (b) les contraintes thermiques, (c) les réactions chimiques, (d) la corrosion des armatures en acier, (e) les mauvaises pratiques de construction, (f) les surcharges de la construction et des structures, (g) les erreurs de conception et de détail, et (h) les charges appliquées de l'extérieur.

Guo et al. ont montré que l'adjuvant minéral pouvait améliorer le développement de la résistance initiale du béton et améliorer efficacement les performances de rupture [24].

1.3.2.1. Retrait de séchage

Cette fissuration se produit à proximité des éléments de retenue en raison des changements de volume du béton.

Un volume plus important de granulats rigides réduit le retrait du béton, car les granulats fournissent des contraintes. Cela réduit les contraintes de traction et minimise ainsi la fissuration du béton (voir Figure 1.3).

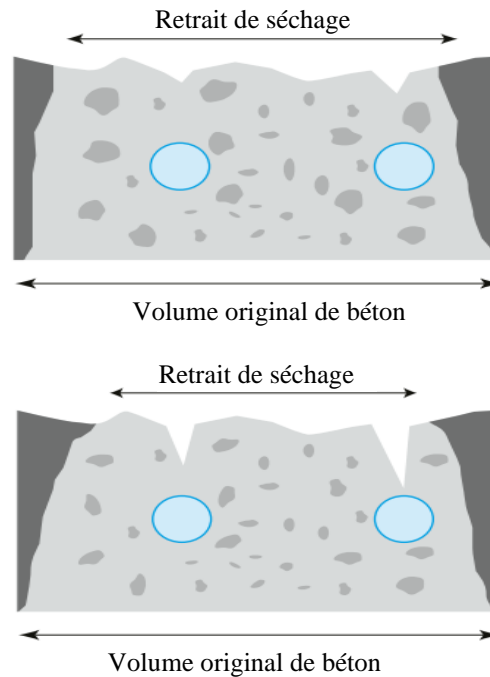


Figure 1.3. Les effets du volume des agrégats sur le retrait du béton

La réduction du volume des granulats augmente le mouvement dans le béton pendant le retrait, car les granulats offrent moins de retenue. Cela augmente le retrait de séchage et, par conséquent, les contraintes de traction qui provoquent la fissuration du béton.

1.3.2.2. Contraintes thermiques

Le béton se fissure lorsque les contraintes de traction imposées par une variation du différentiel de volume dépassent sa résistance à la traction. La chaleur d'hydratation entraîne une différence de température entre le centre et l'extérieur de la structure en béton, soit en raison d'un refroidissement extérieur plus important, soit en raison d'une hydratation thermique plus importante au centre (voir figure 1.4).

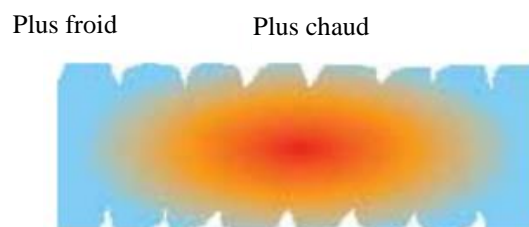


Figure 1.4. Les effets des contraintes thermiques sur la fissuration des structures en béton durci.

1.3.2.3. Réactions chimiques

Les réactions chimiques peuvent être dues aux matériaux utilisés pour le fabriquer ou aux matériaux qui ont pu entrer en contact avec lui après son durcissement. La cause de la fissuration est la réaction expansive entre le granulat et les alcalis de la pâte de ciment.

1.3.2.4. Corrosion des armatures

La corrosion de l'acier d'armature produit des oxydes et des hydroxydes de fer comme sous-produits. Lorsque ceux-ci se forment à la surface de l'acier, son volume augmente. Cette augmentation de volume accroît la pression sur le béton et provoque des fissures radiales lorsque le béton cède sous l'effet des contraintes de traction.

1.3.2.5. Mauvaises pratiques de construction

Des mauvaises pratiques peuvent provoquer des fissures, le tableau 1.1 présente ces erreurs possibles.

Tableau 1.1. Mauvaises pratiques de construction

Mauvaise pratique	Effets de la pratique	Facteurs causant la fissuration
Ajout d'eau au béton pour augmenter sa maniabilité	Réduit la résistance du béton Augmente le tassement.	Augmentation du retrait au séchage et des fissures de tassement plastique.
Augmentation de la teneur en ciment pour compenser une diminution de la résistance due à l'ajout d'eau.	Augmente le différentiel de température entre les sections intérieures et extérieures de la structure. Augmente le volume de la pâte de ciment.	Augmentation du rétrécissement à sec. Contraintes thermiques.
Durcissement inadéquat	Le manque d'hydratation du béton diminue la résistance.	Augmentation du retrait à un moment où le béton a une faible résistance.
Absence de coffrages de soutien, consolidation inadéquate et placement incorrect des joints de construction.	Augmente le tassement. Support insuffisant pour le béton en cours de prise. Les joints s'ouvrent aux endroits où les contraintes sont élevées.	Le béton se fissure sous l'effet de son poids avant d'avoir développé suffisamment de force pour se soutenir.

1.3.2.6. Surcharges de construction

Il est important de bien exécuter la manière dont vous chargez, transportez et déchargez le béton préfabriqué, et dont vous le fixez en place. À chacune de ces étapes, les modules en béton

préfabriqué peuvent être soumis à des contraintes qui surchargent leur structure. Si ces contraintes se produisent dans les premiers âges du béton, elles peuvent entraîner des fissures permanentes.

1.3.2.7. Erreurs de conception et de détail

Il est important de s'assurer que la conception et les détails sont spécifiques à la structure particulière et aux charges auxquelles elle sera exposée. Si l'on néglige ces points, des fissures peuvent apparaître, ce qui pose un problème majeur d'aptitude au service.

1.3.2.8. Charges appliquées de l'extérieur

La plupart des structures en béton sont sensibles aux charges externes qui induisent des contraintes de traction à travers leurs éléments en béton. Il est important de gérer ces charges de la manière la plus efficace possible. Les facteurs qui peuvent réduire la largeur des fissures sont une quantité accrue d'armature en acier et des sections de béton plus grandes pour mieux répartir les charges.

1.4. Emplacement et description des fissures

1.4.1. Emplacement des fissures

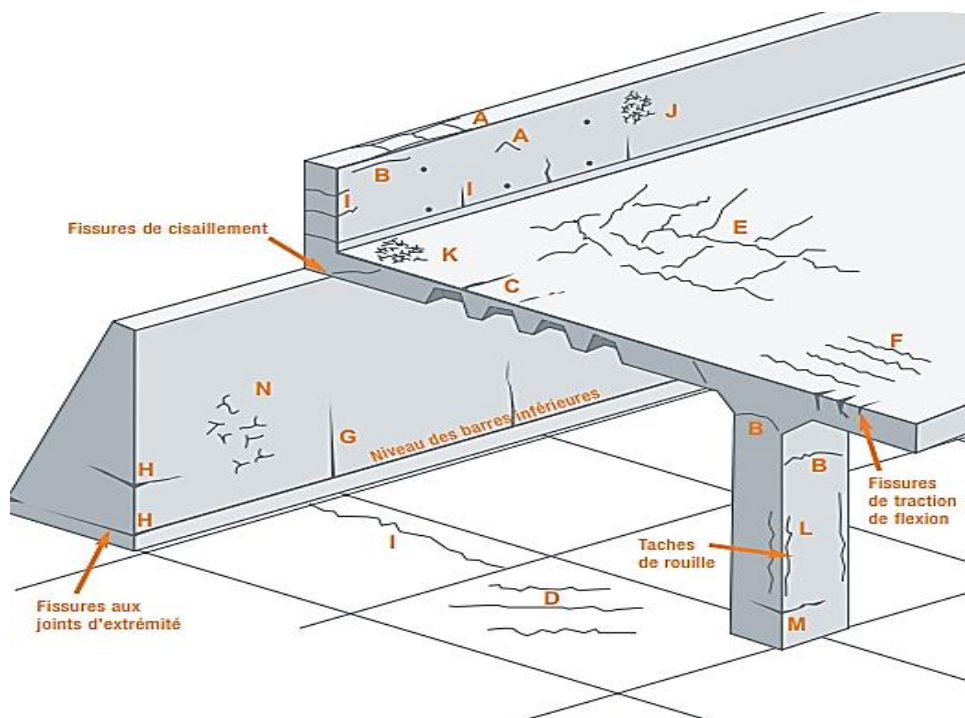


Figure 1.5. Emplacement des différents types de fissures[25].

La figure 1.5 illustre l'identification de l'emplacement de différents types de fissures sur un ouvrage en béton. Chaque lettre indiquée sur le schéma correspond à un type de fissure.

1.4.1. Description des fissures

Le tableau 1.2 donne une description sommaire des différents types de fissures incluant les causes primaires et secondaires de formation, le temps ainsi que le lieu de leurs apparitions et les précautions recommandées.

Tableau 1.2. Description des types de fissures [25]

Types de fissures	Identification	Emplacement	Causes primaires	Causes secondaires	Temps d'apparition	Prévention
Tassement plastique	A (Au-dessus de l'armature)	Sections profondes	Ressuage excessif	Séchage rapide au jeune âge	10 minutes à 3 heures	Réduire le ressuage (air entraîné et vibration supplémentaire)
	B (En voûtes)	Sommet des colonnes				
	C (Changement d'épaisseur)	Dalles ondulées ou gaufrées				
Retrait plastique	D (Diagonal)	Pavages et dalles	Séchage rapide à jeune âge	Faible taux de ressuage	30 minutes à 6 heures	Améliorer la cure initiale
	E (Aléatoire)	Dalles de béton armées				
	F (Excès d'armatures)	Dalles de béton armées	Séchage rapide à jeune âge et armature près de la surface			
Retrait thermique au jeune âge	G (Retraits externes)	Murs épais	D'hydratation élevée	Refroidissement rapide	1 à 2 jours ou 3 semaines	Réduire la température du béton ou isoler le coffrage
	H (Retraits internes)	Dalles épaisses	Gradients excessifs de température			
Retrait de séchage à long terme	I	Murs et dalles minces	Joints inefficaces	Retrait excessif ou cure insuffisante	Plusieurs semaines ou plusieurs mois	Réduire la teneur en eau et améliorer la cure
Faiénçage	J (Au contact des surfaces coffrées)	Surfaces très lisses	Coffrages imperméables	Cure insuffisante	1 à 7 jours, parfois beaucoup plus tard	Améliorer la cure ou la finition
	K (Surfaces finies)	Dalles	Talochage excessif			
Corrosion des armatures	L (Conditions environnementales normales)	Poutres et colonnes	Enrobage insuffisant	Béton de faible qualité	Plus de 2 ans	Éliminer les causes
	M (Infiltration de chlorure de calcium)	Béton armé	Excès de chlorure de calcium			

Réaction alcalis-granulats	N	Présence d'humidité	Un ciment à haute teneur en alcalis	Plus de 5 ans	Éliminer les causes
----------------------------	---	---------------------	-------------------------------------	---------------	---------------------

1.5. Fissurations précoces

1.5.1. Introduction

Les fissures de début d'âge sont définies comme des fissures qui se développent généralement dans les sept premiers jours après la mise en place du béton [26].

Bentz [27] a passé en revue les travaux sur l'influence de l'humidité, de la température et des caractéristiques physiques/micro structurelles sur la fissuration précoce du béton. Des recherches comprennent l'hydratation du ciment et le développement de la microstructure par Stark [28], et les caractéristiques du béton frais, telles que la floculation, la rhéologie, l'accumulation structurelle et la pression du coffrage, qui ont été examinées par Kim et al [29]. Kovler et Roussel [30] se sont concentrés sur les propriétés des bétons frais et durcis, tandis que Nehdi et Soliman [31] ont étudié les mécanismes qui affectent les propriétés du béton et ses performances au jeune âge. D'autre part, Reinhardt [32] a étudié les méthodes d'évaluation pour quantifier le comportement de raidissement et de durcissement du mortier et du béton. Mihashi et Leite [33], Ghourchian et al.[34] ont examiné les mécanismes à l'origine des phénomènes complexes de fissuration.

1.5.2. Les différents types de fissures précoces

Emborg et Bernander [35] ont distingué la fissuration du béton durci en fissures temporaires ou transitoires très précoces et en fissures traversantes permanentes. Klemczak et Knoppik-Wróbel [36] ont regroupé les types de fissures en fonction du type de structure.

De nombreux chercheurs [27], [31], [33][37]–[40] ont regroupé les fissures du béton en fonction des causes de la fissuration, telles que les fissures de retrait par séchage et les fissures de tassement, tandis que d'autres chercheurs [41], [42] ont regroupé en fonction des caractéristiques de la fissuration. Les figures 1.6 à 1.11 montrent certaines de ces fissures.



Figure 1.6. Fissures transversales d'âge précoce dans un béton récemment coulé [43]



Figure 1.7. Fissure transversale de début d'âge dans une dalle de chaussée en béton.

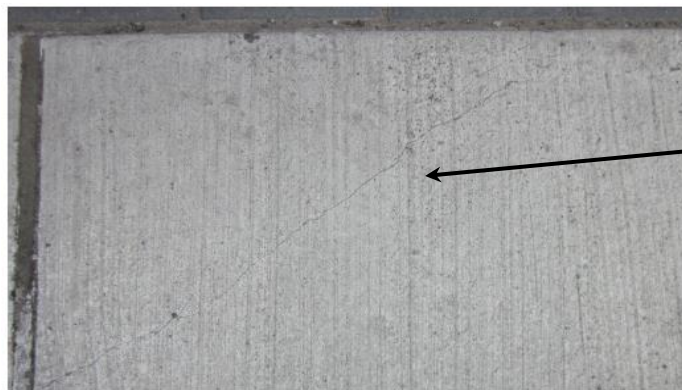


Figure 1.8. Fissure d'angle précoce dans une dalle de trottoir en béton

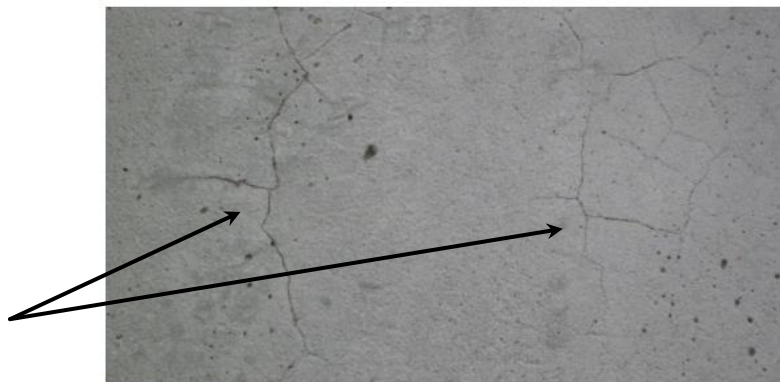


Figure 1.9. Fissures aléatoires précoces apparues dans une dalle de plancher en béton [43].



Figure 1.10. Fissures cartographiques apparues dans une dalle de plancher en béton



Figure 1.11. Fissure de retrait retenue survenue dans une bordure en béton [43]

1.5.3. Causes de la fissuration à un âge précoce

La fissuration au jeune âge se produit dans les structures en béton en raison des différences de température et du développement des contraintes pendant le durcissement du béton. La déformation en traction peut être provoquée par une contraction précoce causée par le retrait autogène. Klemczak et Knoppik-Wróbel [36] ont divisé le retrait de séchage en deux types : le retrait de séchage externe et le retrait de séchage interne, ce qui a été confirmé par Mihashi et Leite [33]. Holt et Leivo [39] ont divisé le retrait en trois types, à savoir le retrait de séchage, le retrait thermique et le retrait autogène.

Meagher et al. [44] ont étudié l'effet des accélérateurs à base de nitrate et de chlorure sur le risque de fissuration du béton au jeune âge. Les résultats des tests de Hoby et al. [45] indiquent que le mélange de béton ternaire (ciment, cendres volantes et la fumée de silice) donne une résistance maximale à la compression et à la traction et une corrosion minimale.

La perte d'eau par évaporation entraîne un retrait plastique et des contraintes internes subséquentes [28], ce qui conduit à des fissures d'étable à la surface du béton, comme le montre la figure 1.10. Branch et al. [46] ont déduit que la présence de micro silice et le séchage rapide de la surface du béton sont des raisons du retrait plastique en béton. Holt [47] a souligné que le retrait chimique et le retrait autogène contribuent à son risque de fissuration.

Lorsque la contrainte de tassement des particules solides dépasse la résistance du béton frais, la fissuration se produit à la source de la contrainte.

Les charges externes exercent une contrainte supplémentaire sur le béton, et la résistance à la traction du béton jeune est relativement faible bien qu'elle augmente avec l'âge [8].

En d'autres termes, la résistance à la traction du béton est très faible au stade initial, en particulier pendant les 3 premières heures, mais devient plusieurs fois plus importante dans les heures suivantes [48]. Lorsque la contrainte de traction due à une charge externe dépasse la résistance à la traction ultime du béton, des fissures apparaissent dans le béton.

Bazant et al. [49] ont divisé le fluage en trois types : le fluage de base, le fluage de séchage et le fluage thermique transitoire. Le fluage de base dépend fortement de l'âge à la mise en charge et de la teneur en eau [50].

Le fluage par séchage, également appelé effet Pickett [51],[52], se produit lorsque les éléments en béton subissent une déformation pendant et après le séchage.

1.5.4. Facteurs affectant la fissuration à un âge précoce

Les facteurs qui influent sur la fissuration au jeune âge du béton sont classés en cinq groupes, à savoir le processus de conception, les matériaux et les proportions du mélange, les procédures de construction, les conditions environnementales, et les conditions de charge externes, comme le montre la figure 1.12. Chaque groupe comprend 2 à 7 facteurs différents.

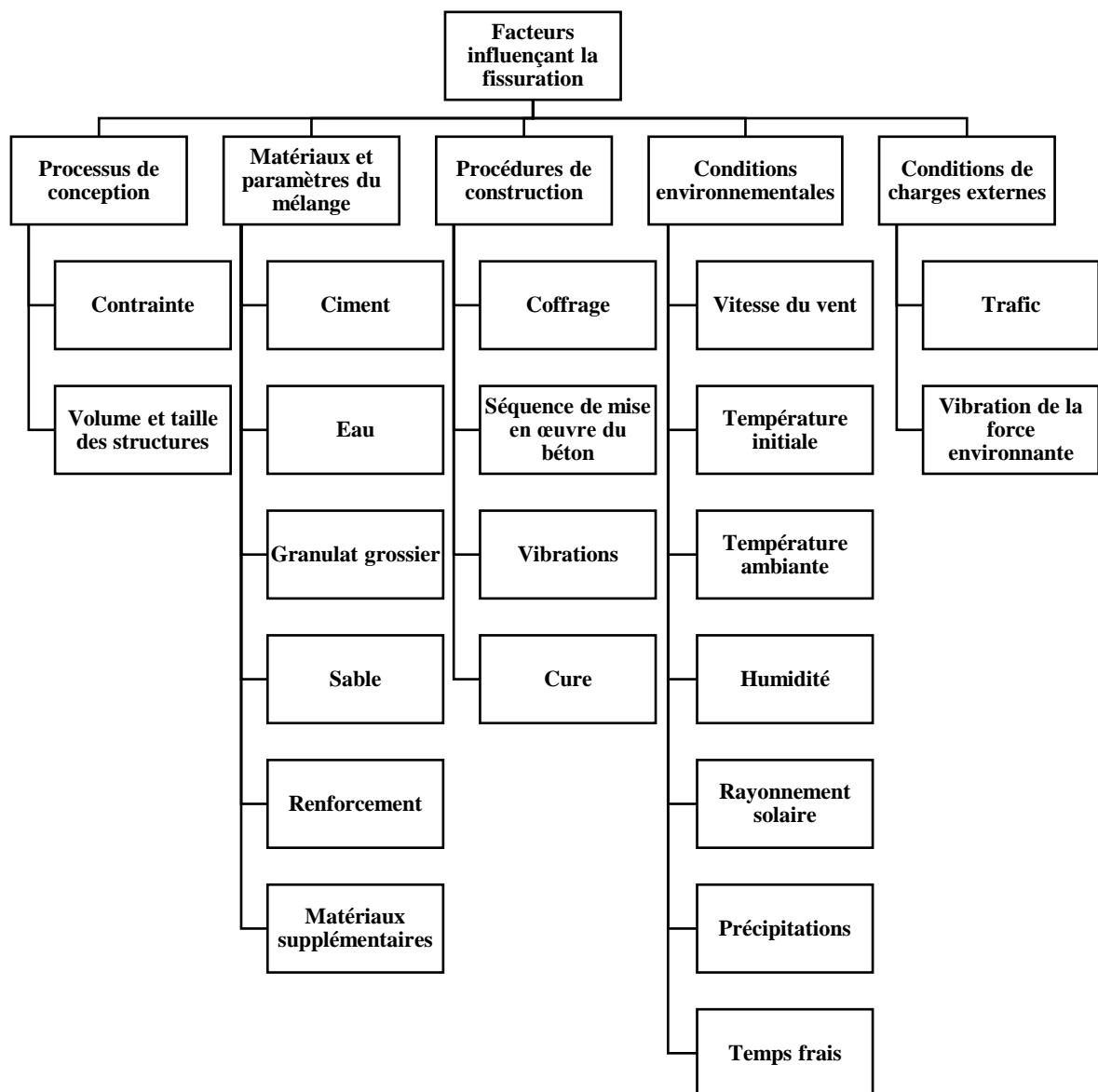


Figure 1.12. Différents facteurs qui influencent la fissuration du béton durci [43].

1.5.4.1. Processus de conception

Les contraintes dans le béton doivent être prises en compte lors du processus de conception. Les contraintes dues à la déformation thermiques et autogènes induisent des contraintes dans le béton [53]. La fissuration est induite lorsque le rapport de traction/résistance dépasse 60% [54]. Le mouvement restreint dépend de la conception de la structure et de la source du mouvement restreint, comme l'enrobage du béton [55], l'armature, la profondeur non uniforme du béton et la profondeur de la fissure [56].

Le volume ou la taille des éléments en béton est l'un des principaux facteurs de fissuration par dilatation thermique. La structure est considérée comme massive lorsque les dimensions structurelles de diffusion de la chaleur dépassent la longueur de diffusion de la chaleur d'hydratation [57]. En outre, la diminution de la profondeur de l'enrobage du béton pourrait augmenter la tendance à la fissuration [58], [59].

1.5.4.2. Matériaux et paramètres de mélange

Le mélange du ciment et de l'eau libère de la chaleur d'hydratation qui provoque une contrainte thermique, résultant des variations de température, qui peut dépasser la résistance du béton au premier âge et conduire à la fissuration.

Certains chercheurs ont déduit que la génération de la chaleur d'hydratation dépend substantiellement du type de ciment et de la teneur en ciment [35], [39], [60]–[62]. Les différents types de ciment présentent des caractéristiques de finesse et une efficacité en termes de dispersion uniques [39], [63]. La teneur en ciment la plus faible produit le retrait à sec le plus faible [64].

Des matériaux supplémentaires, tels que les adjuvants minéraux, les adjuvants réducteurs d'eau, le ciment compensateur de retrait, les adjuvants réducteurs de retrait, etc., ont été utilisés pour améliorer les performances du béton. Le durcissement du béton dans certaines régions arides peut être un défi en raison de la disponibilité limitée de l'eau appropriée pour la cure et/ou la perte rapide de l'eau de cure par évaporation [65].

De plus, l'augmentation de la taille des granulats grossiers diminue la cohésion, ce qui augmente l'affaissement du béton [66]. Un affaissement élevé du béton augmente non seulement la possibilité de fissuration mais peut également diminuer la force d'adhérence entre le béton et l'armature [42] en raison d'une plus grande quantité d'eau libre. Les granulats ont tendance à réduire le retrait autogène et le fluage [67].

L'armature est capable de réduire la déformation libre, mais l'effet est limité puisque les coefficients thermiques de l'armature et du béton sont similaires [39], [66], [68]. La taille de la barre a également une influence sur la fissuration du béton, une taille plus importante augmentant la tendance à la fissuration [58], [59].

Cortas et al. [69] ont étudié le risque de fissuration précoce du béton induit par le retrait en fonction du degré de saturation en eau des granulats. Ils ont rapporté que le béton avec des agrégats entièrement saturés est susceptible de présenter le plus grand risque de fissuration.

Le béton à haute performance souffre des niveaux élevés de retrait autogène, de fluage en traction et de fissuration au cours du premier âge en raison du volume élevé de matériaux cimentaires [70].

1.5.4.3. Procédures de construction

Le coffrage est l'un des composants importants qui influencent le comportement de fissuration du béton au stade précoce. Le choix du coffrage peut modifier le risque de fissuration précoce en modifiant la longueur d'échange thermique et le rapport surface/volume de la structure [57]. L'augmentation de la conductivité des matériaux de coffrage réduit le risque de fissuration au stade de la coulée, elle augmente après le démoulage [62].

Plusieurs études ont souligné que la revibration pouvait améliorer la résistance à la compression [71], [72], mais il a également été signalé que la vibration pendant l'âge critique du béton peut provoquer une contrainte externe dépassant la résistance du béton.

En outre, les vibrations provenant de l'environnement pendant la construction, comme le battage des pieux [73], n'affectent pas la résistance à la compression du béton, mais Ansell et Silfwerbrand [74] ont déclaré que l'âge du béton, la distance et le type de sol sont les principaux facteurs, en fonction desquels le battage des pieux pourrait poser problème.

Shen et al. [75] ont étudié l'effet de la température de cure, et du rapport eau/ciment sur le comportement de fissuration précoce du béton haute performance [76]. Ils ont conclu que le potentiel de fissuration au jeune âge du béton à haute performance augmente avec une diminution du rapport eau/ciment qui provoque une plus grande augmentation de la température.

Ainsi, le développement de la pression capillaire dans le béton induit un retrait autogène [77], [78]. La quantité d'eau devrait être optimisée pour maintenir l'ouvrabilité souhaitée. En outre, la température de cure est l'un des facteurs importants qui influencent les propriétés du béton au jeune âge, car elle modifie la cinétique de l'hydratation et le processus d'auto dessiccation [79]. Sule et van Breugel [68] ont découvert que le développement de la résistance à la compression du béton en condition isotherme est plus lent que celui en condition semi-adiabatique, mais la condition isotherme produit une résistance à la compression plus élevée après 28 jours.

1.5.4.4. Conditions environnementales

Des nombreux chercheurs [39], [46], [80] ont étudié cette question d'évaporation de l'eau et ont identifié la température initiale, la température ambiante, l'humidité, le vent et le rayonnement solaire comme les principaux facteurs d'évaporation de l'eau.

Briffaut et al. [81] ont étudié l'effet de l'environnement externe sur la sensibilité à la formation de fissures précoces par des déformations auto-contraintes et ont identifié que la température externe a un effet significatif pour atteindre la température maximale et que la vitesse du vent influence principalement la différence de température entre le cœur et la surface des éléments en béton.

Les précipitations augmentent l'humidité relative de l'environnement, qui pourrait réduire le retrait car elle fournit de l'eau en continu pour le processus d'hydratation [82], elle peut modifier le rapport eau/ciment, et augmenter la probabilité de fissuration précoce du béton.

1.5.4.5. Conditions de chargement externe

La circulation affecte le développement de la résistance du béton durcissant en réduisant l'adhérence finale du nouveau béton au béton existant et à l'armature [77], [83]. Cependant, il n'est pas toujours applicable à tous les emplacements des éléments en béton [42], [73], [84].

En résumé, Les différents facteurs discutés dans les cinq groupes susmentionnés sont plus ou moins couverts par la liste présentée dans le tableau 1.3 Nehdi et Soliman [6][31] ont identifié ces facteurs par le biais d'une revue exhaustive de la revue de la littérature.

Tableau 1.3. Facteurs qui influencent les propriétés thermiques et mécaniques du béton durcissant

Propriétés	Facteurs
Propriétés thermiques :	
Chaleur d'hydratation	Le type, la teneur totale et la composition chimique du ciment, la température ambiante et les adjuvants utilisés.
Capacité thermique spécifique	La composition du mélange, la teneur en eau et la température ambiante.
Conductivité thermique	La densité, la teneur en eau, la température et les caractéristiques minéralogiques des granulats.
Diffusivité thermique	Le type de granulat utilisé et la teneur en eau.
Coefficient de dilatation thermique	Le type et la teneur en ciment, le type de granulat et le rapport eau-ciment, l'âge, la température et l'humidité relative du béton.
Propriétés mécaniques :	
Résistance à la compression	Le rapport gel/espace du silicate de calcium hydraté (CSH), le rapport eau/ciment, le type de ciment, la présence d'additifs, et les conditions de cure.
Résistance à la traction	Le type, la densité et la granulométrie des granulats ; le type de cure et l'âge du béton.
Module d'élasticité	Température du béton, rapport eau/ciment, type de ciment, propriétés des agrégats et conditions de cure.

1.5.5. Conséquences de la fissuration précoce

La fissuration précoce est un phénomène courant dans les structures en béton. Cependant, les fissures de début d'âge ne provoquent pas la défaillance des structures en béton si le niveau de tolérance structurelle n'est pas dépassé [85].

Les fissures d'âge précoce, si elles ne sont pas contrôlées, peuvent entraîner des problèmes d'entretien à long terme. Si ces fissures sont permanentes et ne sont pas résolues immédiatement, elles peuvent également permettre l'entrée d'agents agressifs, peuvent réduire la durée de vie des structures en béton [86], [87].

Des structures telles que les réservoirs d'eau et les toits, en raison de la fissuration à un âge précoce peut provoquer des fuites dans ces structures [88]. Elle peut affecter la capacité portante de la structure et accélérer la rupture par fatigue [36], [89]. Les fuites d'humidité sont également nuisibles aux utilisateurs des bâtiments et à leurs biens [36][89].

La fissuration n'est pas autorisée sur certaines structures fonctionnelles spéciales, telles que les centrales nucléaires, les stockages de déchets chimiques et radioactifs, les cuves de confinement nucléaire, les réservoirs de gaz naturel liquéfié, et les structures d'élimination des déchets. Une fuite de produits chimiques à travers ces structures serait une catastrophe [90].

Ces agents qui fuient sont très agressifs et nocifs, où ils polluent non seulement l'environnement, mais sont également très dangereux pour les humains.

1.6. Lien entre fissuration et retrait plastique

Lorsque le retrait plastique ne peut pas se faire librement dans la structure, le béton est mis en traction et risque par conséquent de fissurer.

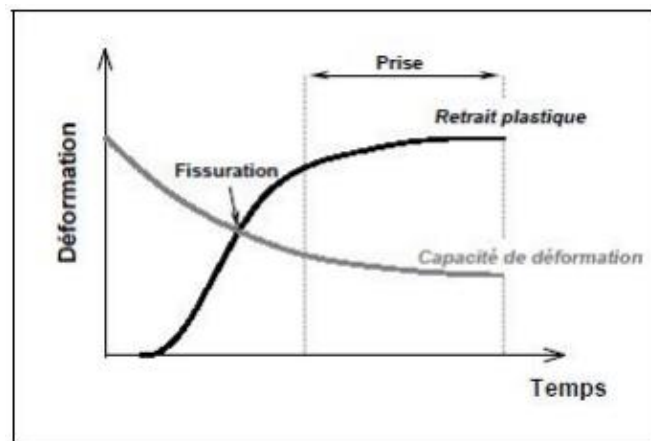


Figure 1.13. Schématisation de la fissuration à l'état frais en termes de retrait et capacité de déformation [91].

Les fissures dues au retrait plastique sont généralement distantes de 0,3 à 1 m et leur profondeur varie de 25 à 50 mm [91]. Le lien entre retrait et fissuration est illustré dans la littérature avec

la notion de capacité de déformation. La capacité de déformation est définie comme la quantité maximale de déformation que le béton frais peut supporter en traction. La fissuration à l'état frais est donc atteinte lorsque le retrait empêché dépasse cette limite en déformation. La figure 1.13 schématise ce principe.

Il faut souligner qu'il existe très peu d'études consacrées à la capacité de déformation du béton frais par rapport aux études de retrait plastique. Il existe plusieurs raisons.

Tout d'abord, toute modélisation est compliquée car les propriétés du béton changent beaucoup à un très jeune âge, surtout si l'eau s'évapore. Ensuite, d'un point de vue expérimental, les problèmes techniques sont nombreux [92] ; il est par exemple délicat d'exercer une traction sur des matériaux plastiques.

Le retrait plastique se produit en raison de l'évaporation rapide de l'eau, qui dépend de plusieurs facteurs, la température est plus importante et la vitesse directe du soleil font que le taux d'évaporation est supérieur à la flottabilité de l'eau sur la surface du béton.

Les fissures de retrait plastique sont généralement courtes et peu profondes c'est un spectacle contraire dans deux directions à la fois.

1.7. Principaux facteurs affectant la fissuration par retrait plastique

La figure 1.14 résume le processus de fissuration par retrait plastique et les facteurs qui peuvent affecter le phénomène.

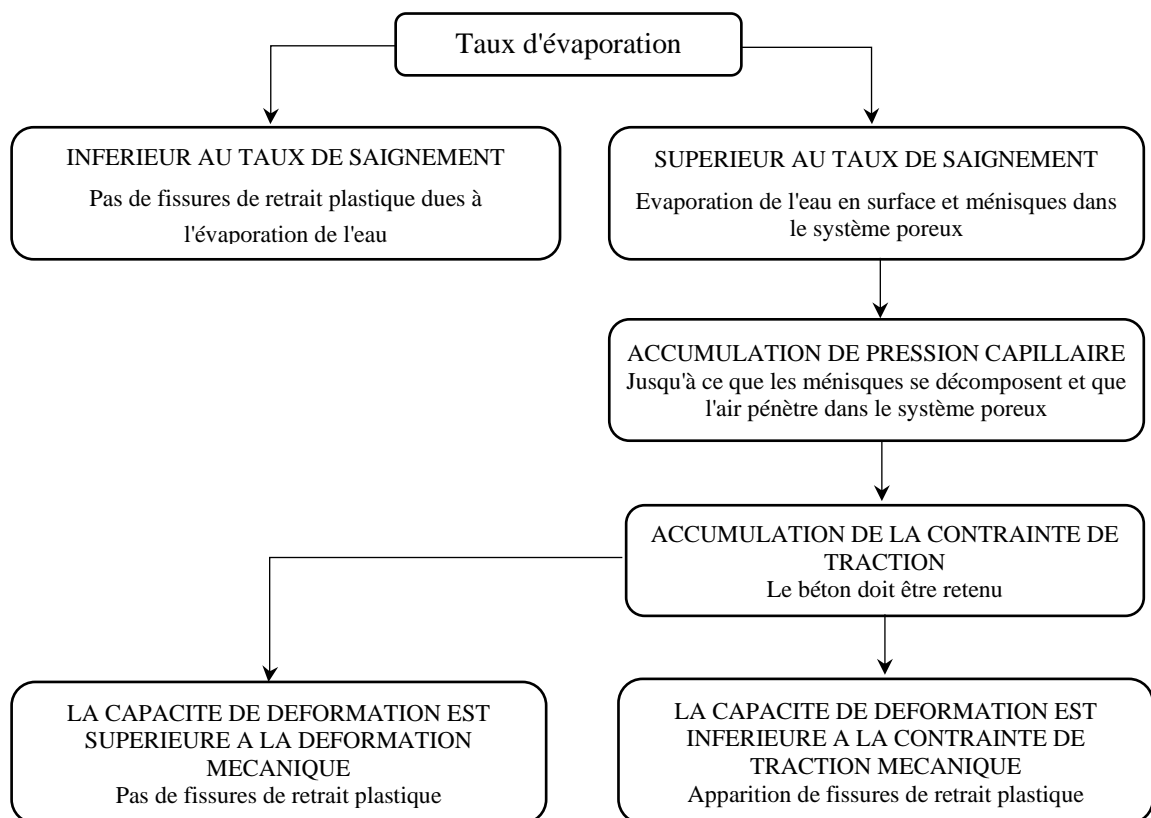


Figure 1.14. Organigramme de fissuration par retrait plastique

Une compréhension approfondie de la manière dont ses facteurs influencent l'ensemble du processus de fissuration peut conduire à l'invention de nouvelles méthodes de prévention des fissures. Certains de ces facteurs sont brièvement décrits dans ce qui suit.

1.8. Retrait plastique dans le matériau cimentaire

1.8.1. Introduction

Le retrait total que subit tout élément en béton pendant sa durée de vie, par des phénomènes tels que l'évaporation, l'hydratation et/ou la carbonatation peuvent participer au retrait total des matériaux cimentaires [93]. La figure 1.15 illustre les mécanismes qui régissent le retrait total dans les matériaux cimentaires et la manière dont ils influencent le retrait.

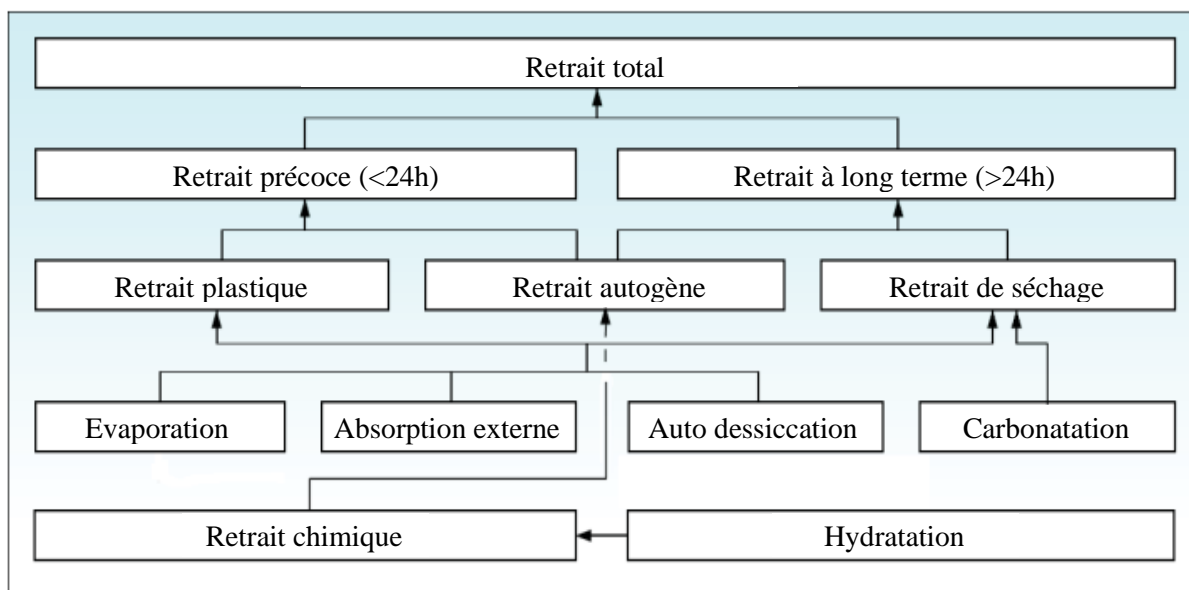


Figure 1.15. Illustration des mécanismes régissant le retrait total dans les matériaux cimentaires [93].

Dans la littérature Holt et Esping [70], [93], on conclut que le béton frais connaît trois phases (états) structurelles différentes dans les 24 heures suivant le mélange :

- 1- Plastique : à ce stade, le béton est encore liquide, plastique, viscoélastique et maniable.
- 2- Semi-plastique : commence après la prise initiale, où un squelette rigide commence à se former et le béton devient progressivement rigide.
- 3- Rigide : commence après le point de prise finale. À ce stade, la chaleur maximale d'hydratation est probablement atteinte et la résistance du béton augmente en raison de l'hydratation en cours.

La période de retrait plastique est définie à partir du mélange jusqu'à la prise finale [93]–[94].

Le terme "retrait plastique" est utilisé dans ce cas, uniquement pour décrire ce processus physique qui conduit à la fissuration en début de vie. En revanche, le retrait provenant de

réactions chimiques et se produisant principalement après la prise initiale est appelé retrait autogène.

La figure 1.16, illustre la relation entre le taux de développement de la chaleur d'hydratation, la déformation au jeune âge et les temps de prise (initial et final) du mélange de béton dans les 24 premières heures après le mélange dans les expériences réalisées Esping et Löfgren [97].

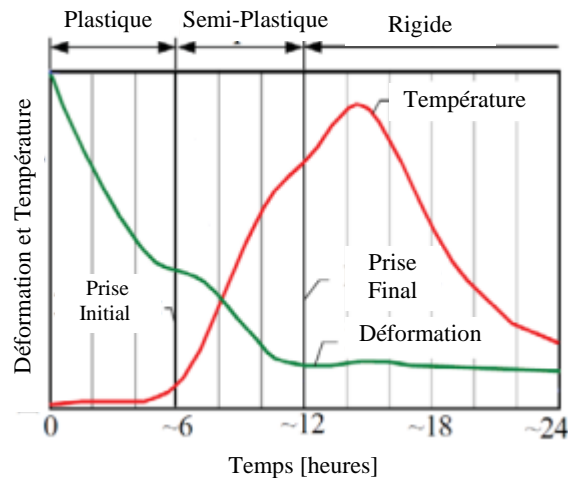


Figure 1.16. Illustration des trois phases structurales du béton en fonction du retrait autogène et de l'évolution de la chaleur d'hydratation [97].

Ce qu'il faut noter ici, c'est la période entre le malaxage et la prise initiale, qui est connue comme la période de dormance. Pendant cette période, le taux d'hydratation est très faible.

1.8.2. Mécanisme du retrait plastique

La perte rapide d'humidité, principalement due à l'évaporation, assèche la surface du béton et le fait se rétracter facilement, car sa rigidité est peu développée. Un autre paramètre crucial influençant le phénomène est la capacité de déformation du béton. Plusieurs expériences [39], [98]–[103] ont montré que la capacité de déformation atteint sa valeur la plus basse autour du temps de prise initiale, Figure 1.17.

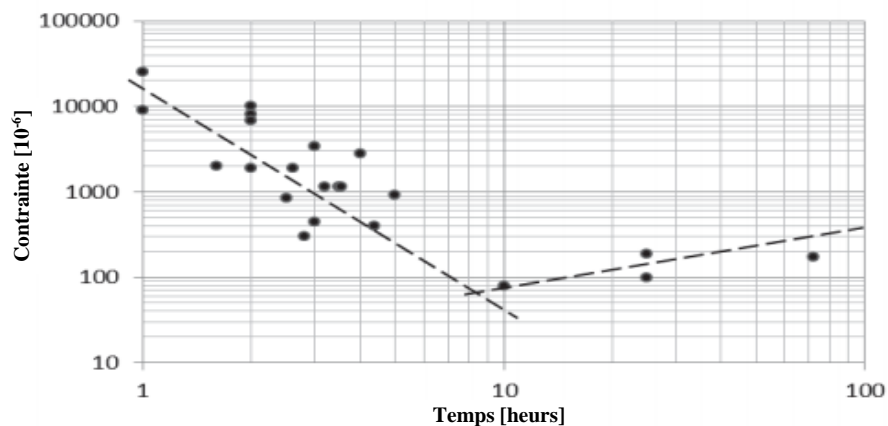


Figure 1.17. Capacité de déformation en traction du béton frais [104]

Si le béton est contraint de quelque manière (par exemple, par le moule, l'armature, la modification de la profondeur de section, la différence de retrait dans différentes parties du béton), des contraintes de traction apparaissent à la surface du béton, qui peuvent dépasser la faible capacité de déformation et provoquer des fissures.

La figure 1.18, illustre en détail le processus de fissuration par retrait plastique dans le béton frais. Pour le béton ordinaire, une fois placé dans le moule, ses particules solides se déposent sous l'influence des forces gravitationnelles, forçant l'eau contenue dans le système de pores à remonter à la surface (c'est-à-dire le ressuage) [105].

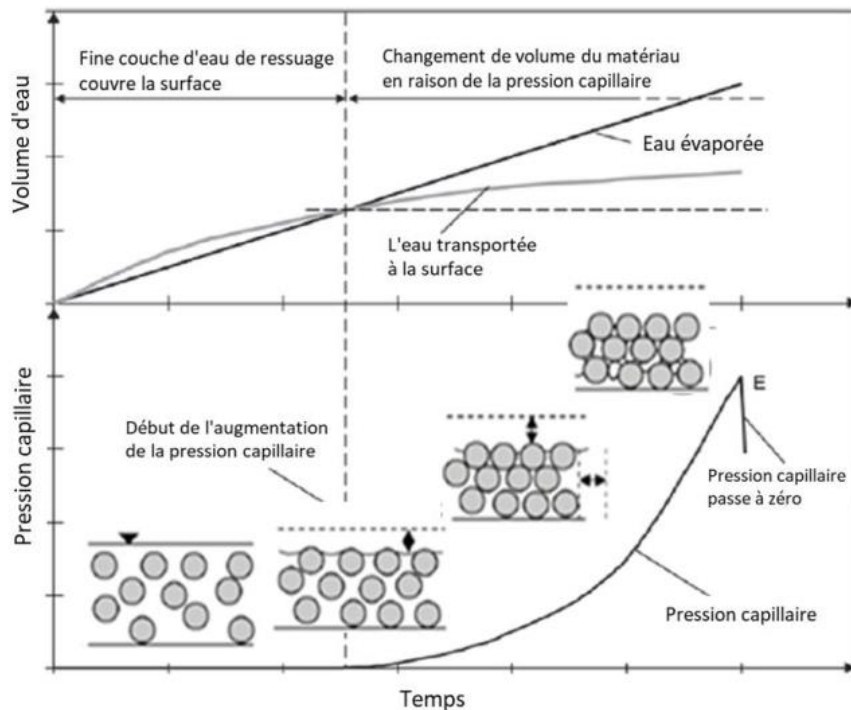


Figure 1.18. Mécanisme d'accumulation de la pression capillaire et du retrait plastique qui en résulte dans le béton [106].

L'évaporation diminue progressivement le rayon des ménisques, ce qui entraîne une augmentation de la pression capillaire négative. La pression capillaire provoque à son tour un tassement plus important en tirant les particules solides vers le bas et en forçant l'eau interstitielle à remonter à la surface [107]. La consolidation ainsi que la perte d'eau continuent due à la pression capillaire progressive réduisent la fluidité du béton avant que l'hydratation du ciment ne commence [108]. Finalement, la pression capillaire s'effondre soudainement et les pores ne sont plus complètement remplis d'eau [109].

Les pores vides forment des points faibles à la surface du béton qui sont à l'origine de la localisation des déformations. Si le retrait est entravé, il peut conduire à la fissuration, qui se forment initialement à la surface et se propagent vers le bas.

Ce phénomène est clairement visible sur la figure 1.19 (de gauche à droite), où une suspension composée de cendres volantes et d'eau est soumise à un séchage.

Dans la première image à gauche, les particules solides à la surface sont complètement recouvertes d'une fine couche d'eau. Cependant, on peut voir sur la deuxième image que cette couche commence à disparaître, en raison de l'évaporation. Les points sombres dans la troisième image sont les pores qui sont pénétrés par l'air après le point de rupture de la pression capillaire. Enfin, dans la quatrième image, ces pores vides sont connectés et ont formé une fissure [105].

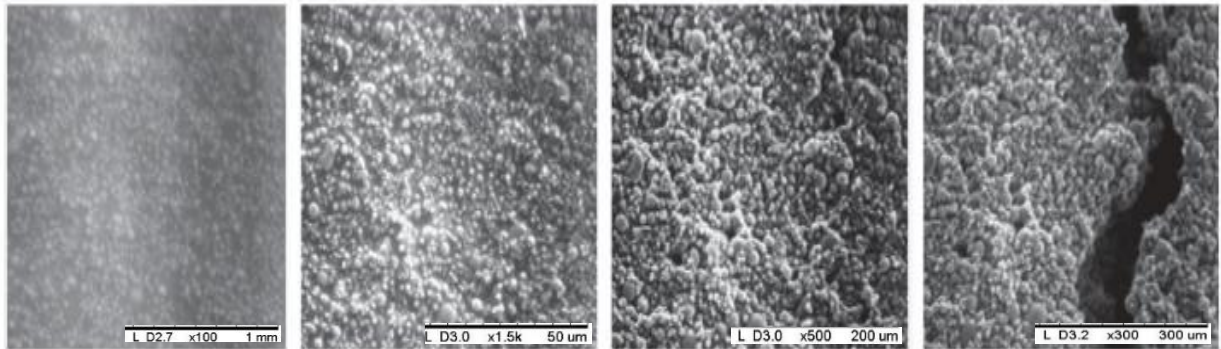


Figure 1.19. Images au MEB d'une suspension séchante de cendres volantes et d'eau[105].

Bien que la fissuration par retrait plastique soit principalement liée au taux d'évaporation du béton, le rôle de la pression capillaire dans le mécanisme directeur de la fissuration par retrait plastique est également souligné par plusieurs chercheurs [104], [106], [10], [110].

1.8.3. Évaporation

L'évaporation a été considérée comme un indicateur de probabilité de fissuration par retrait plastique dans le béton frais. Selon la norme ACI, des précautions doivent être prises lorsque le taux d'évaporation de l'eau est égal ou supérieur à $1,0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ [111].

Néanmoins, certains résultats expérimentaux montrent que des fissures de retrait plastique peuvent se produire à un taux d'évaporation de $0,2 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ dans des conditions de temps chaud [112].

Les facteurs environnementaux sont utilisés dans le nomogramme ACI pour estimer le taux d'évaporation de l'eau de surface dans le béton (voir figure 1.20). Le résultat de ce nomogramme est donc supposé donner une valeur pour le taux d'évaporation du béton, fournissant une indication de l'apparition possible du retrait plastique [113], [114]. Le nomogramme a été développé pour la première fois par Bloem [115] qui, à son tour, a utilisé les valeurs numériques présentées dans un tableau par Lerch [116]. Les valeurs du tableau ont été calculées à l'aide d'une formule présentée par Menzel [117], disponible uniquement dans le système d'unités impériales :

$$W = 0.44(e_0 - e_a)(0.253 + 0.096 V) \quad (1.1)$$

Où

W = poids (lb) de l'eau évaporée par pied carré de surface par heure (lb/ft²/hr),

e₀ = pression de la vapeur saturée à la température de la surface d'évaporation, (psi)

e_a = pression de vapeur de l'air ambiant, (psi)

V = vitesse moyenne du vent horizontal à 20 pouces (500 mm) au-dessus de la surface du béton, (mph).

La nouvelle formule n'utilise pas la pression de vapeur comme donnée d'entrée puisque la relation température-pression de vapeur a déjà été incorporée dans la formule. Le coefficient de corrélation de cette relation est de 0,99 pour la plage de température de 15 à 35° C (59 à 95 °F) [114]. La formule est exprimée sous la forme Eq.1.2 (unités impériales) et Eq.1.3 (unités métriques) :

$$E = (T_c^{2.5} - r \cdot T_a^{2.5})(1 + 0.4V) \times 10^{-6} \quad (1.2)$$

Où

E = taux d'évaporation de l'eau, (lb/ft²/hr)

T_c = température du béton (surface de l'eau), (°F)

T_a = température de l'air, (°F)

r = humidité relative, (%)

V = vitesse du vent, (mph).

$$E = 5([T_c + 18]^{2.5} - r \cdot [T_a + 18]^{2.5})(V + 4) \times 10^{-6} \quad (1.3)$$

Où

E = taux d'évaporation de l'eau, (kg/m²/h)

T_c = température du béton (surface de l'eau), (°C)

T_a = température de l'air, (°C)

r = humidité relative, (%)

V = vitesse du vent, (km/h).

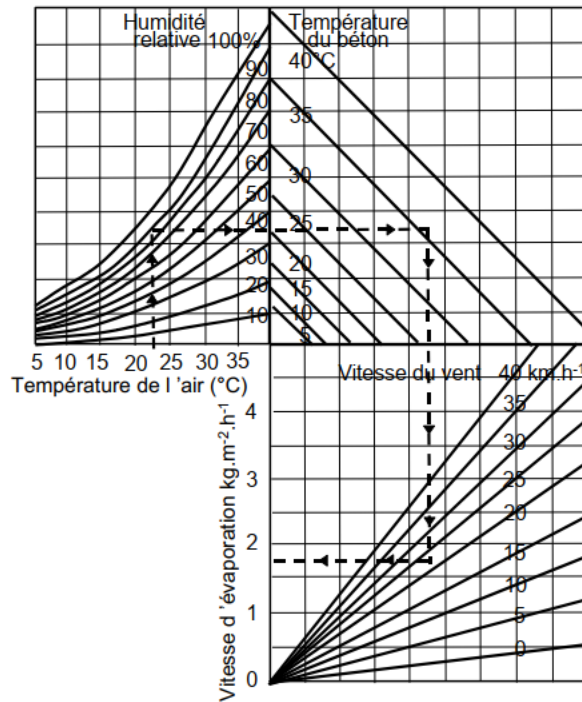


Figure 1.20. Nomogramme ACI pour l'estimation du taux d'évaporation de l'eau de surface du béton [111].

Même si le taux d'évaporation de l'eau est déterminé avec précision sur la base des méthodes ci-dessus, il n'y a aucune garantie qu'il puisse être un indicateur applicable et fiable du début de la fissuration. Comme mentionné précédemment, le taux d'évaporation doit dépasser le taux de ressuage du béton afin de provoquer un retrait plastique. En outre, selon les résultats, le taux d'évaporation d'une surface d'eau libre est presque constant, tandis que le taux d'évaporation de l'eau de ressuage d'une surface de béton diminue progressivement, en raison de la réduction de la quantité d'eau drainée vers la surface, voir la figure 1.21.

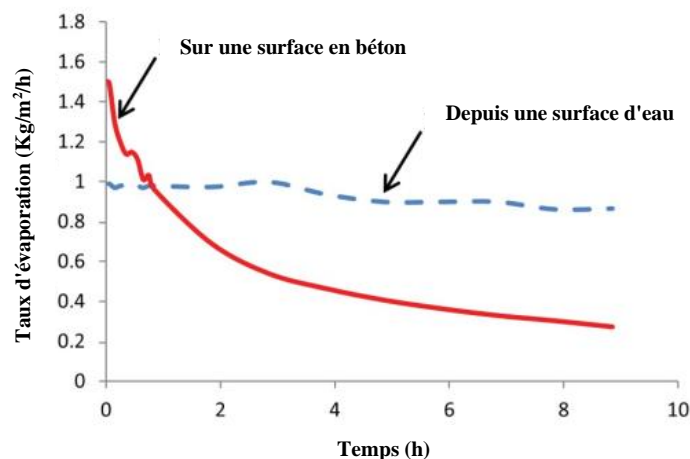


Figure 1.21. Taux d'évaporation de l'eau libre et de l'eau accumulée à la surface [118].

1.8.4. Pression capillaire

En raison de l'irrégularité de la disposition des particules dans la pâte à béton, l'entrée d'air ne se produit pas simultanément dans tous les pores [109]. En d'autres termes, l'entrée d'air est plutôt un événement local qu'un événement universel.

Selon la relation de Gauss-Laplace (Eq.1.4), la pression capillaire dans le système poreux est inversement proportionnelle au rayon de courbure du ménisque (voir Figure 22) [113] :

$$P_c = -\frac{2\gamma_w}{R} \cdot \cos \theta = -\frac{2\gamma_w}{R'} \quad (1.4)$$

Où

P_c = pression capillaire dans le liquide interstitiel (Pa)

R = rayon de courbure du ménisque en cas de mouillage complet ($\theta = 0$)

R' = rayon de courbure du ménisque pour un angle de mouillage arbitraire ($\theta > 0$).

γ_w = tension superficielle du liquide interstitiel (0,073 N/m pour l'eau)

θ = angle de mouillage, (degrés).

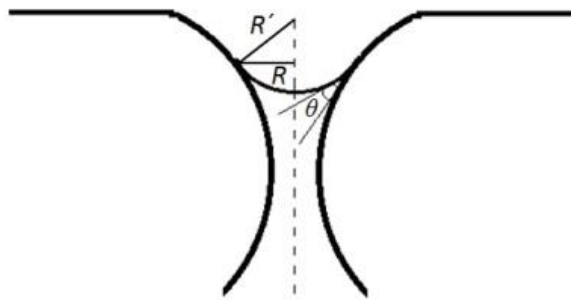


Figure 1.22. Représentation d'un ménisque d'eau dans un pore axisymétrique perpendiculaire à la surface d'un matériau poreux solide [118].

D'autre part, l'équation de Kelvin met en relation la pression de pore capillaire avec l'humidité relative (HR) :

$$\ln(\text{HR}) = -\frac{2 \cdot \gamma_w \cdot M_w}{\rho_w \cdot R \cdot T \cdot R'} = \frac{P_c \cdot M_w}{\rho_w \cdot R \cdot T} \quad (1.5)$$

Où

HR = humidité relative ambiante juste au-dessus du pore,

γ_w = tension superficielle du liquide du pore (0,073 J/m² pour l'eau)

M_w = masse molaire de l'eau (~0,018 kg/mol)

ρ_w = densité de l'eau, (kg/m³)

R = constante du gaz idéal, (8,314 J/mol K)

T = température absolue en Kelvin,

R' = rayon de courbure du ménisque pour un angle de mouillage arbitraire ($\theta > 0$)

P_c = pression de traction capillaire, (Pa)

La pression de pore capillaire peut être obtenue en combinant les équations 1.4 et 1.5 :

$$P_c = -\frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M_w} \cdot \ln(\text{HR}) \quad (1.6)$$

Où

P_c = pression de traction capillaire, (Pa)

ρ_w = densité de l'eau, (kg/m³)

R = constante du gaz idéal, (8,314 J/mol K)

T = température absolue en Kelvin,

M_w = masse molaire de l'eau (~0,018 kg/mol)

HR = humidité relative ambiante, (%).

Sur la base de Carman [119], une relation a été proposée par Powers pour déterminer la pression capillaire maximale dans le béton, qui a été modifiée par Cohen [120] :

$$P = 1 \times 10^{-3} \frac{\gamma \cdot S}{w/c} \quad (1.7)$$

Où

P = pression de traction capillaire, (MPa)

γ = tension superficielle du liquide interstitiel (0,073 N/m pour l'eau)

S = surface spécifique de masse du ciment, (m²/kg)

w/c = rapport eau/ciment en masse, (-)

La constante 10^{-3} a pour dimension la densité massique (kg/m³).

L'équation 1.7 montre que la pression capillaire maximale (P) est directement proportionnelle à γ et S , et inversement proportionnelle au rapport E/C . Cela signifie que, si la pression maximale est considérée comme le principal paramètre d'influence [121]. Ce point doit être étudié de manière plus approfondie, car selon certains essais [122], [123], avec un rapport eau/ciment élevé est significativement à la fissuration par retrait plastique.

Pihlajavaara [124] a suggéré que la pression capillaire maximale dans un béton contenant des granulats solides sphériques non poreux peut être déterminée par la formule suivante :

$$P = 2,6 \times 10^{-7} \cdot \gamma \cdot S \cdot \rho \quad (1.8)$$

Où

P = pression de traction capillaire, (MPa)

γ = surface tension du liquide interstitiel (0,073 N/m pour l'eau)

S = surface spécifique de masse du ciment, (m²/kg)

ρ = densité solide du ciment, (kg/m³)

Les équations de Cohen et Pihlajavaara peuvent, ainsi, interpréter l'influence des matériaux fins sur la tendance à la fissuration par retrait plastique du béton. Des expériences ont montré que le risque de fissuration par retrait plastique augmente avec l'augmentation de la quantité de matériaux fins dans le mélange de béton. Il faut noter que les équations 1.5 à 1.8 ne calculent que la pression capillaire maximale dans le système poreux. Il n'est pas possible de déterminer la pression à différents âges après la coulée et donc le taux de développement de la pression capillaire ne peut pas être spécifié. La seule équation qui peut offrir cette possibilité est l'équation 1.4.

1.9. Méthodes d'essai

1.9.1. ASTM C 1579

La norme ASTM C 1579, figure 23, est une méthode d'essai développée principalement pour comparer le comportement de fissuration par retrait plastique de différents mélanges de béton contenant des fibres de renforcement dans des conditions prescrites de restriction et de perte d'humidité suffisamment sévères pour produire une fissuration avant la prise finale du béton[125]. Cependant, son application n'est pas limitée au béton renforcé de fibres et peut être utilisée pour étudier d'autres paramètres.

La partie métallique encochée au milieu est l'élévateur de contraintes qui agit comme un point d'initiation de la fissure. Les deux autres parties métalliques plus petites sur les côtés servent de contraintes internes. La surface des parties métalliques et des côtés du moule a été enduite d'une fine couche d'huile, afin de réduire l'adhérence entre le béton et le moule.

Le moule doit être placé dans une chambre climatique afin de contrôler les conditions ambiantes. Étant donné que de nombreuses autres variables telles que la finesse du ciment, la granulométrie des agrégats, le volume des agrégats, les procédures de mélange, l'affaissement, la teneur en air, la température du béton et la finition de surface peuvent également influencer la fissuration potentielle, il convient de veiller à ce que ces variables soient aussi cohérentes que possible d'un mélange à l'autre[125].

Dans les expériences réalisées dans le cadre de ce projet particulier, l'évaporation de l'eau, la pression capillaire, la température interne, le tassement et la déformation horizontale, en plus des variables atmosphériques, ont été mesurés en permanence pendant l'essai. L'essai se poursuit jusqu'à ce que le moment de la prise finale soit atteint. 24 heures après le mélange, la largeur moyenne des fissures est déterminée. De plus, l'ASTM propose un ratio de réduction des fissures (CRR), qui définit le pourcentage de réduction de la largeur des fissures dans le béton renforcé de fibres, comme suit :

$$CRR = \left[1 - \frac{\text{Largeur moyenne des fissures du béton renforcé de fibres}}{\text{Largeur moyenne des fissures du mélange de béton témoin}} \right] \times 100\% \quad (1.9)$$

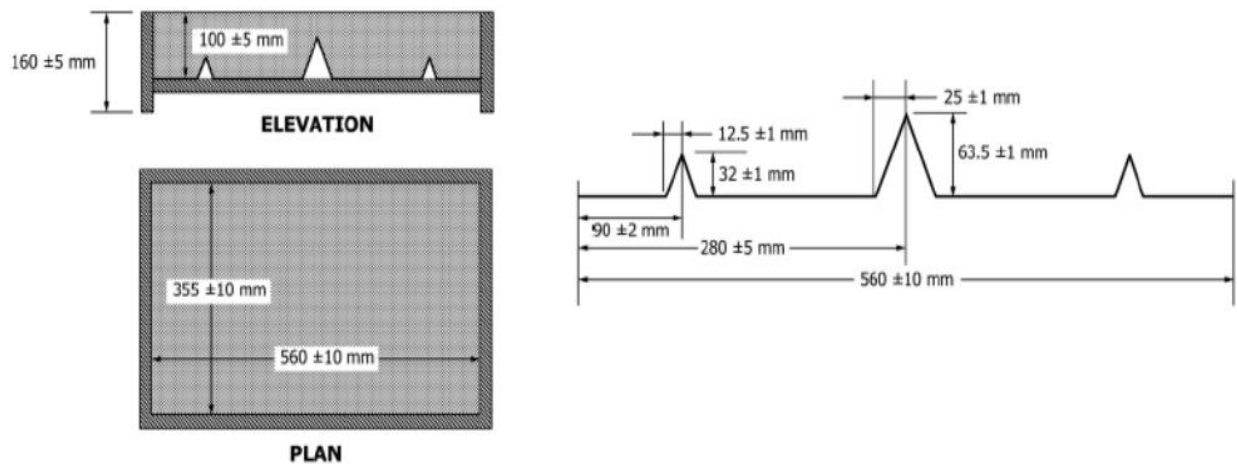


Figure 1.23. Géométrie du moule ASTM C 1579 [125].

1.9.2. Méthode d'essai à l'anneau (NT BUILD 433)

Cette méthode a été développée pour la première fois par Johansen et Dahl, est destinée à déterminer l'influence des constituants du mélange sur le potentiel de fissuration du béton frais à un niveau "macro". Esping et Löfgren [97] ont utilisé une méthode d'essai annulaire modifiée dans leurs expériences qui avaient différentes épaisseurs d'échantillon, conditions environnementales et méthode d'évaluation de la tendance à la fissuration.

Dans cette méthode, le moule est constitué de deux anneaux d'acier concentriques qui sont fixés à une plaque de base rigide en acier inoxydable (voir figure 1.24).

Après avoir placé le béton entre les deux anneaux, le moule est recouvert d'un entonnoir à air transparent fixé à un ventilateur aspirant, ce qui donne une vitesse de vent de 4,5 m/s sur la surface du béton. Toutes les mesures commencent 60 minutes après la mise en place du béton et se terminent 18 heures plus tard.

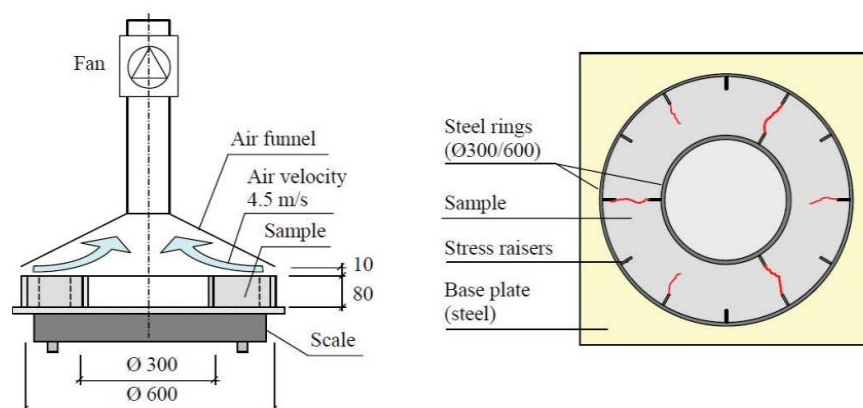


Figure 1.24. Configuration de la méthode d'essai en anneau (dimensions en mm) [123].

La surface du béton des trois éprouvettes est inspectée visuellement toutes les 30 minutes afin de déterminer le moment de l'initiation probable de la fissure. À la fin la largeur et la longueur

des fissures sont mesurées respectivement par un microscope numérique (avec une précision de 0,05 mm) et une roue de mesure numérique (avec une précision de ± 1 mm). La surface moyenne des fissures des trois moules est ensuite calculée, comme suggéré par Esping et Löfgren [97], comme suit :

$$\text{Surface moyenne de la fissure} = \frac{\sum \text{longueur de la fissure} \times \text{largeur de la fissure}}{3} \quad (1.10)$$

1.9.3. Méthode de mesure de pression capillaire

La pression capillaire a été mesurée à l'aide d'un système de capteur de pression capillaire appelé « CPSS », (voir figure 25). Le cône du capteur doit être rempli d'eau dégazée et doit pénétrer la surface du béton jusqu'à une distance d'environ 5 cm de la surface du béton. Le CPSS peut mesurer la pression capillaire jusqu'à -100 kPa. Chaque capteur, en plus de la pression capillaire, mesure la température de l'air, l'humidité relative ambiante et la luminosité (c'est-à-dire le rayonnement solaire). Le modèle doit être utilisé pour comparer la gravité de la fissuration d'un groupe de bétons coulés dans des conditions similaires, c'est-à-dire dans des moules identiques et avec des contraintes identiques [126].

Les capteurs sont connectés sans fil à une station de base qui, à son tour, est connectée à un ordinateur. La fréquence d'émission est de 2,4 GHz et la portée maximale de la transmission radio est d'environ 60 m. Les données mesurées peuvent être visualisées en temps réel grâce à une interface interactive sur un logiciel installé sur l'ordinateur.

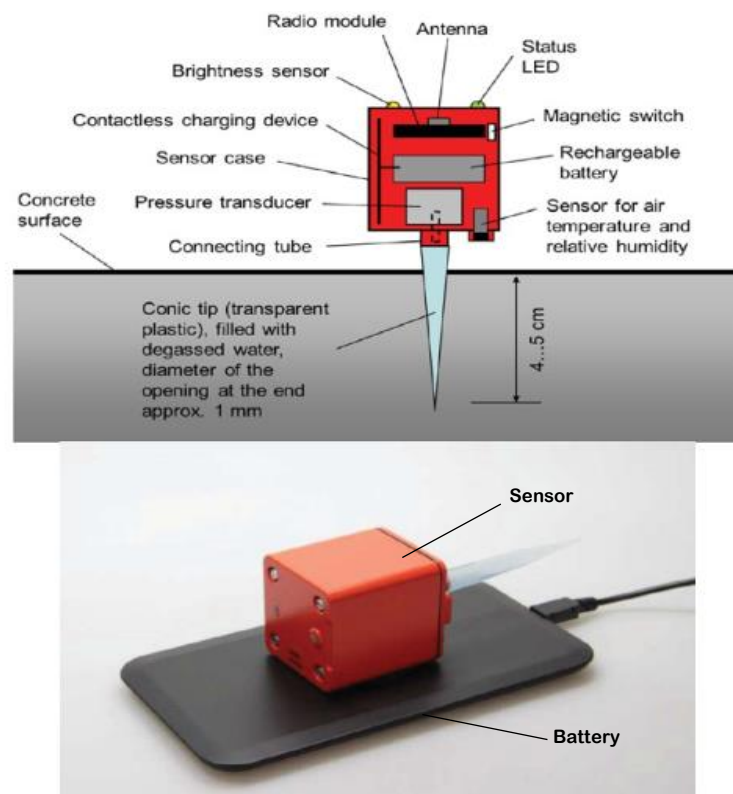


Figure 1.25. Composants d'un capteur de pression CPSS [106].

1.10. Conclusion

Après analyse des résultats de cette recherche bibliographique, tout le monde est convaincu de l'importance du phénomène de fissuration dans les constructions. Les chercheurs font toujours des efforts dans la prise en compte de chaque facteur influant et étudier l'ampleur de son impact sur les fissures dans les bâtiments pour réduire leur impact.

Cependant, dans les zones du Sud, le phénomène de fissures dans les bâtiments et dans les ouvrages d'art d'une manière très large concerne la fissuration du béton, la faible résistance du béton, le vieillissement des éléments du bâtiment, la fissuration des éléments structuraux juste après le coulage du béton et qui sont visibles à l'œil nu et souvent d'une manière effrayante.

Ce qui est devenu une préoccupation majeure pour les habitants, les techniciens et aussi les pouvoirs publics de la région.

Nous avons pris la région d'Adrar, comme exemple d'études, pour étudier ces types de fissures dans une tentative scientifique d'enrichir ce problème et de contribuer à trouver des solutions.

Puis dans une démarche nécessaire pour avoir plus d'information et exploiter des données dans cette région, il était impératif de faire des visites sur terrain, pour voir, investiguer et prendre des photos de plusieurs projets à travers la wilaya d'Adrar.

Chapitre 2 :

Etat de fissuration des
constructions en zone aride,
cas de la région d'Adrar

2.1. Introduction

Dans le premier chapitre nous avons montré que les fissures dans les constructions peuvent être provoquées par plusieurs facteurs, parmi lesquelles le climat chaud.

Et pour concrétiser ces axiomatiques dans notre thèse, il nous fallait présenter des exemples concrets. Cette phase est nécessaire pour justifier les différents types des fissures qui existent dans la région d'Adrar, et pour pouvoir faire le diagnostic de ces dernières, afin d'exploiter ces données dans notre programme de recherche expérimental présenté dans le chapitre 4.

Nous avons entamé, au début de notre recherche, des visites de projets ou ouvrages en cours de réalisation ou achevés non encore exploités. Ceci afin d'éviter la présence d'autres facteurs (humains ou dus à leur mauvaise utilisation), qui peuvent conduire à des causes qui se chevauchent de ces dégradations.

Puis sur des constats faits par l'organisme de contrôle technique de construction (CTC d'Adrar), dans une tentative de connaître les types de fissuration rencontrés ou réclamés auprès de cet organisme.

Dans ce cadre, et pour arriver à rassembler le maximum des données sur des constructions fissurés, une enquête été entamée, il nous a été nécessaire de se renseigner sur les projets ou ouvrages à travers les différents sites à travers la wilaya pour pouvoir montrer effectivement le phénomène de fissuration sur tout le territoire de la wilaya.

Il est à noter que tous les projets visités sont des ouvrages étatiques, pour donner une fiabilité des résultats trouvés étant donné que ces ouvrages sont réalisés après une étude approuvée, puis ils ont subi des suivis permanents par plusieurs organes, d'où la qualité du béton utilisée est contrôlée qui présente la majorité des mélanges exécutés.

2.2. Climat désertique (aride)

2.2.1. Zones arides

Le climat désertique dans la classification des climats de Köppen [127] parfois appelé climat aride est un climat caractérisé par une sécheresse et une aridité permanente qui dure toute l'année. L'analogie que l'on peut attribuer à l'ensemble des régions arides du globe est que les étés sont partout chauds ou très chauds, mis à part quelques rares exceptions, notamment en haute montagne.

Dans la plupart des régions sahariennes, les précipitations annuelles moyennes sont de quelques mm mais deviennent quasiment nulles dans les régions les plus centrales (16,4 mm/an à Adrar ; 6,6 mm/an à Mourzouk (Libye) ; 0,5 mm/an à Assouan (Égypte) et à Wadi Halfa (Soudan)[128].

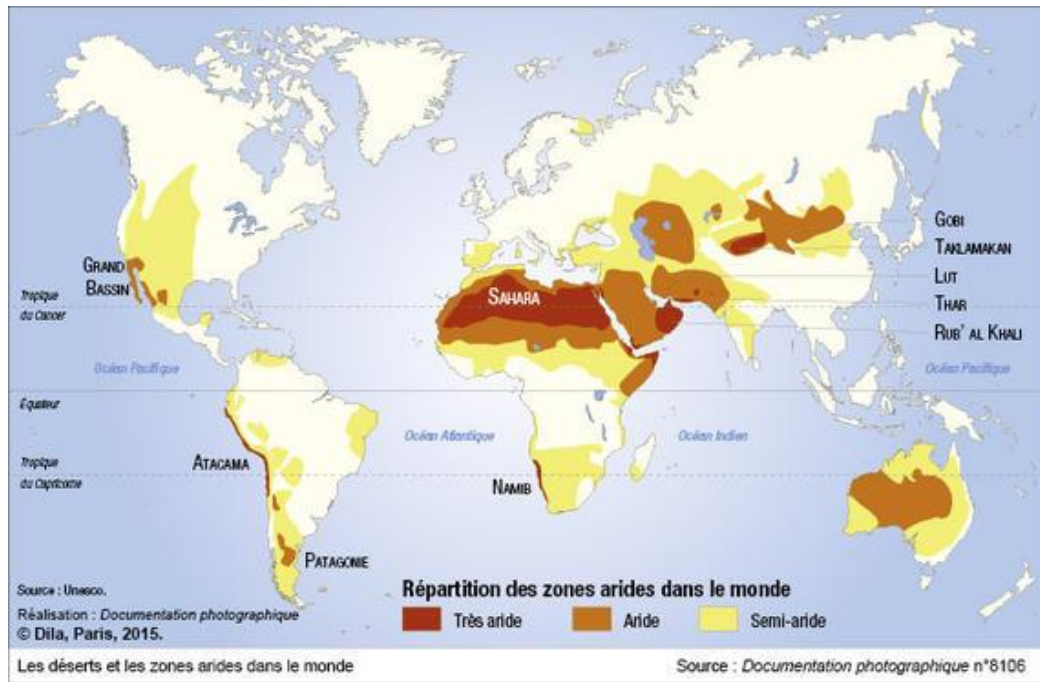


Figure 2.1. Les zones arides dans le monde [129].

2.2.2. Climat d'Adrar

La région d'Adrar est située au Sud-Ouest de l'Algérie, le climat de cette région est désertique chaud, selon la classification de Köppen BWh [130], connue par sa température élevée en été (étalée sur plus de 6 mois) et qui chute en hiver, et par sa sécheresse (quelques mm de précipitations annuelles) qui dure toute l'année et un taux d'humidité très faible en été [128].

Les températures moyennes maximales sont de 46 à 50 °C, Adrar est donc une des villes les plus chaudes du monde.

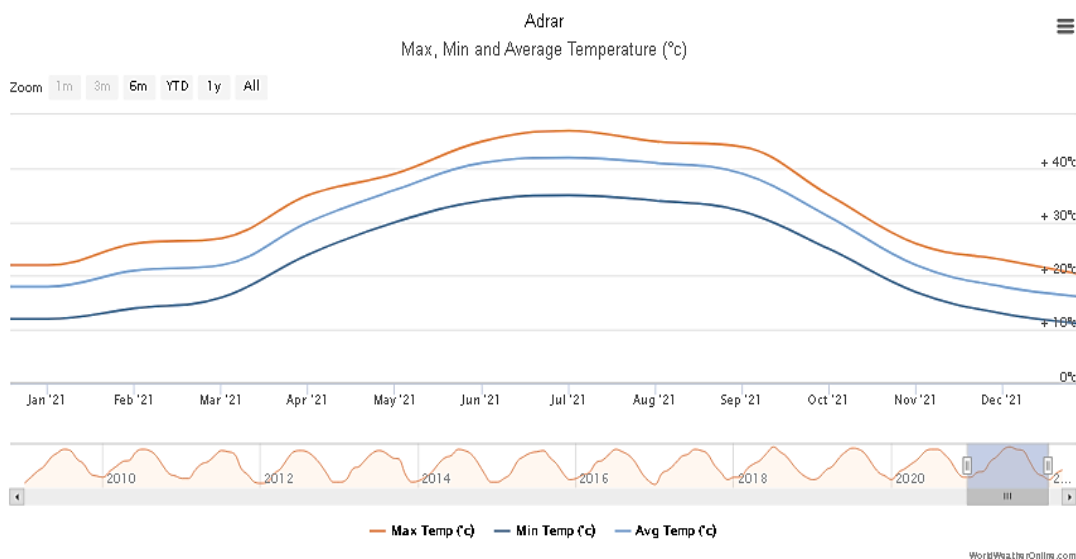


Figure 2.2. Variations de la température annuelle (année 2021) dans la région d'Adrar [131]

Selon le site spécialisé dans le domaine de climatologie « World Weather Online » [131], la variation de la température et de l'humidité relative de l'année 2021 sont montrées dans les figures 2.2 et 2.3, nous remarquons que les mois de juillet et août sont les plus chauds de l'année. C'est pour cette raison que nous avons effectué cette présente étude expérimentale durant cette période.

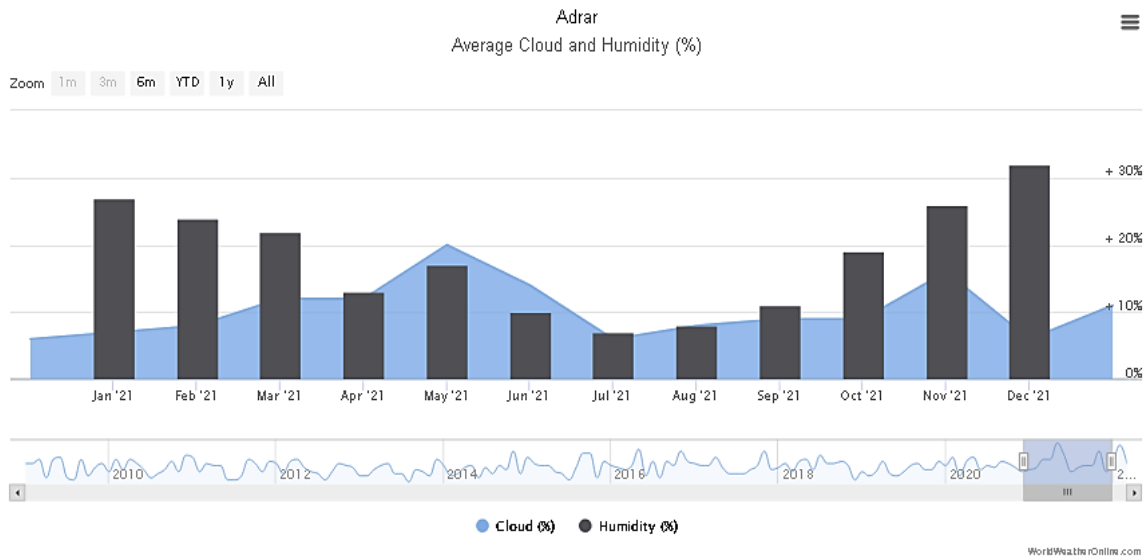


Figure 2.3. Variations de l'humidité annuelle (année 2021) dans la région d'Adrar [131]

2.3. Etat des fissurations des constructions à Adrar

Nous avons classé les projets d'études en deux catégories ; celle visitée et contrôlée par l'organisme de contrôle de construction et celle visitées et observée par nos soins.

2.3.1. État des projets investigués

Ce dont des projets qui présentent une importance vis-à-vis de leur utilisation, de la façon de construction, ou des mesures de sécurité à prendre.

2.3.1.1. 1^{er} projet : Hôpital 60 lits à Aougrouit

La commune d'Aougrouit se situe au Nord-Est de la willaya d'Adrar. La ville est située à environ 130 km d'Adrar. Il s'agit dans ce projet d'un établissement hospitalier de 60 lits. Son maître d'ouvrage est la DSP d'Adrar (direction de la santé et de la population). L'ouvrage est en cours de réalisation par une entreprise privée. L'étude et le suivi sont confiés à un bureau d'étude privé et le contrôle technique est assuré par le CTC d'Adrar.

Les travaux ont été en phase de gros œuvres, ce qui nous a permis de voir de près la qualité du béton ainsi que l'évolution du béton au jeune âge.



Photo 2.1. Fissures au niveau du palier d'escalier

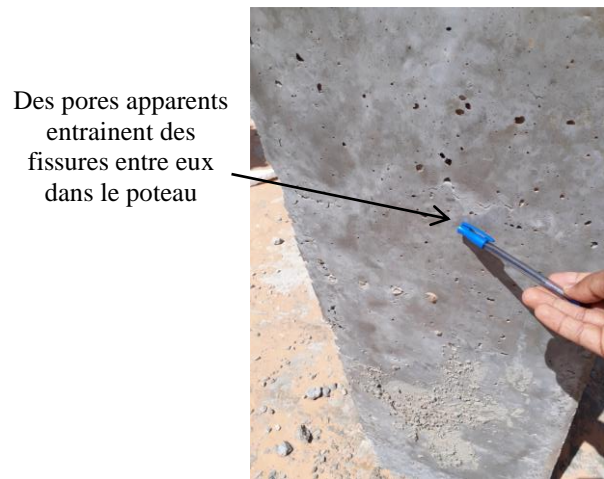


Photo 2.2. Fissures au niveau du poteau

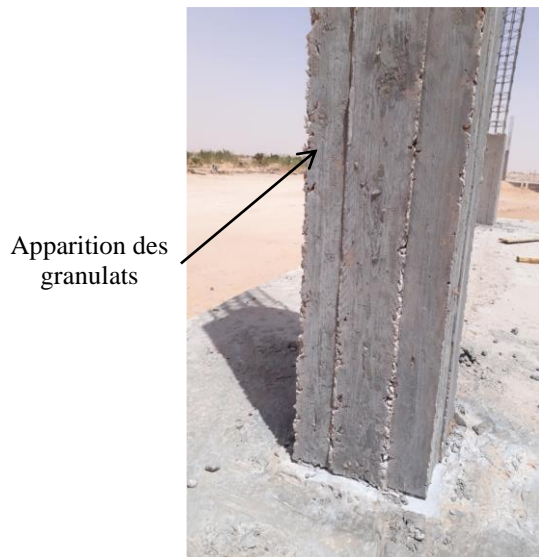


Photo 2.3. Béton sec aux coins.



Photo 2.4. Fissures apparentes lézards.

Nous avons constaté que, concernant la qualité du béton de ce projet, certains désordres sont apparus aux jeunes âges (photos ci-dessus). Même avec des températures ambiantes ne dépassant pas les 34°C, nous avons constaté des fissures au niveau du palier de repos d'un escalier comme indiqué sur la photo 2.1. Il s'agit vraisemblablement d'un ressuage, c'est-à-dire d'un excès d'eau de gâchage dans le béton.

D'après la photo 2.2, des pores se sont apparus juste après le décoffrage du poteau, entraînant par conséquent, cela est peut-être dû, probablement, à une insuffisance en fines dans le mélange béton ou à sa vibration excessive.

Dans certains poteaux, nous avons observé du béton sec dans les angles, au niveau des zones d'attache du bois de coffrage qui peut être mal attaché et ainsi provoquer une perte de liant cimentaire à ce niveau (photo 2.3). Ce phénomène a disparu après l'utilisation de coffrages

métalliques (photo 2.4), mais d'autres fissures sont apparues sous les armatures transversales à cause d'une discontinuité granulométrique en béton entre sable de dunes et les graviers.

2.3.1.2. Bureau de poste à Timimoun RDC + 3 étages

Ce projet est situé à l'entrée de la ville de Timimoun en provenance d'Adrar. Timimoun, aujourd'hui, est une wilaya à part entière, elle est située entre le grand erg occidental, au Nord, et le plateau du Tademaït, au Sud. Elle est la principale Oasis de la région du Gourara. Le territoire de la commune de Timimoun se situe au Nord-Est de la wilaya d'Adrar. Son chef-lieu est situé à 210 km environ par route.

La direction de l'unité postale de la wilaya d'Adrar est le maître d'ouvrage de ce projet. L'étude et le suivi ont été confiés à un bureau d'étude privé, le contrôle technique est assuré par le CTC d'Adrar. Nous avons effectué la visite de ce projet en avril 2021, où les travaux de la structure étaient en cours (béton encore au jeune âge).

Le projet était en cours de réalisation et malgré une température non encore inquiétante, des fissures remarquables ont été constatées. La ségrégation du béton a aussi été constatée au niveau des poteaux (photo 2.5). Nous pensons qu'un manque de fines dans le béton ou une insuffisance de vibration lors de son coulage ont pu causer des fissures dans l'ouvrage.

Sur la photo 2.6, le désordre apparaît entre l'amorce du poteau et le gros béton de rattrapage de niveau, la mauvaise exécution de bois de coffrage engendre des fissures. De même sur la photo 2.7, il est constaté une mauvaise jonction de coffrage et la perte de liant de ciment, lors de coulage, était la cause de l'apparition des granulats.



Ségrégation de béton à cause de mauvaise vibration du béton

Fissure entre le gros béton de rattrapage de niveau et l'amorce du poteau



Photo 2.5. Ségrégation en du bas de poteau

Photo 2.6. Fissure sous longrine

Des pores formant des fissures sous l'armature sont apparus en raison d'un enrobage insuffisant et d'une mauvaise conception du mélange qui n'a pas permis au béton de pénétrer sous l'armature transversale (photo 2.8.).



Granulats secs à mi-longrine, et une perte de liant sous longrine.

Fissure avec insuffisance de fines



Photo 2.7. Mauvaise jonction du coffrage.

Photo 2.8. Fissure lézard au poteau



Fissure apparente sur dalle fraîche

Fissure diagonale au palier d'arrivée (plancher 1^{er} niveau)



Photo 2.9. Fissure au-dessus de la dalle

Photo 2.10. Fissure diagonale dans la dalle

Sur les photos 2.9 et 2.10, les fissures sont apparues sur la dernière marche d'escalier, il s'agit de pièces exposées directement au soleil, et l'absence de la cure avec l'évaporation initiale de l'eau a engendré du retrait plastique.

2.3.1.3. Institut national spécialisé de formation professionnelle (INFSP) de Timimoun

L'opération de suivi, de réalisation et d'équipement de l'Institut National Spécialisé de Formation Professionnelle (INSFP) 300pf/120 lits à Timimoune, a été lancée par tranches et chaque tranche est composée de plusieurs lots avec diverses entreprises. Les lots de la première tranche sont déjà en exploitation, nous avons visité les lots qui ont été en cours de phase finale, il s'agit des blocs d'hébergements et d'un amphithéâtre.

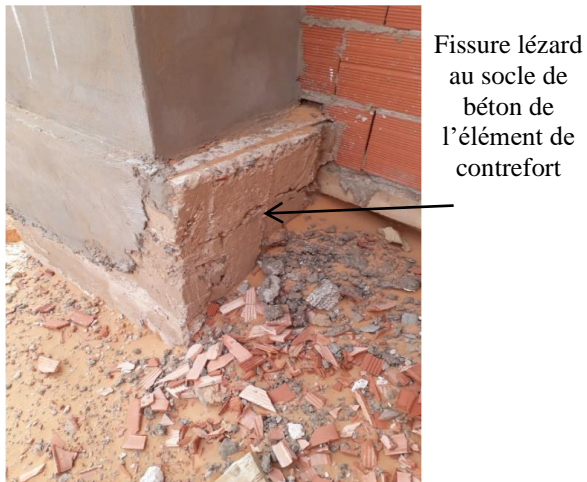


Photo 2.11. Socle en béton fissuré

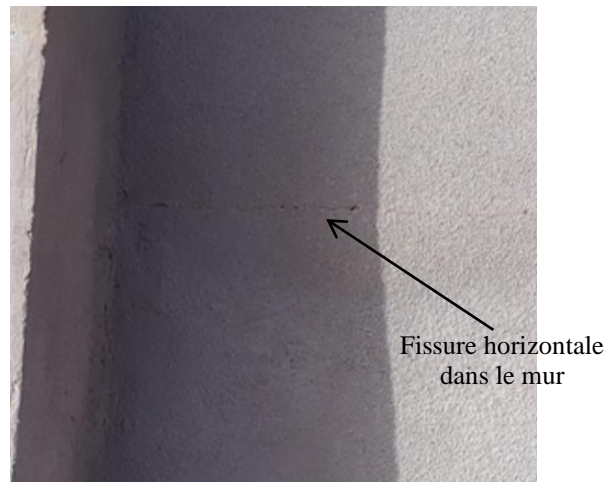


Photo 2.12. Mur fissuré en horizontalement

Commentaire :

Dans les blocs en cours de réalisation, nous avons remarqué que dans le socle en béton, la fissure a démarré de la plateforme et s'est propagée transversalement sur toute la pièce (photo 2.11.). Ceci est probablement dû à la forte surcharge provenant du contrefort situé au-dessus du socle.

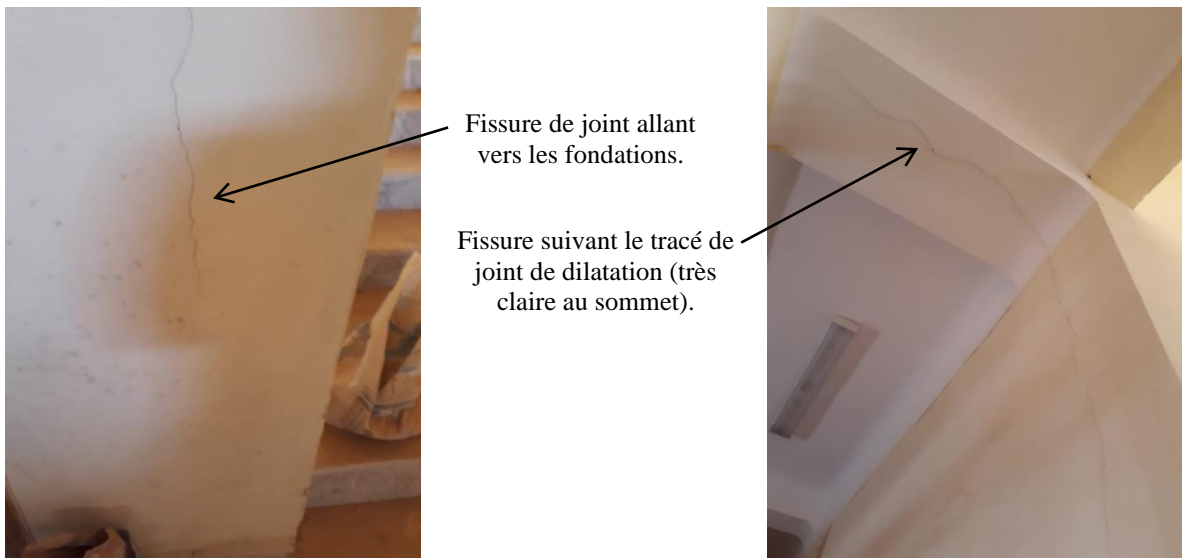


Photo 2.13., 2.14. Le tracé de joint de dilatation fissuré

La fissure horizontale est visible à l'extérieur du mur de l'amphi (photo 2.12), une plate-forme derrière ce mur (à l'intérieur de la piste) est au même niveau que cette fissure, a causé une poussée de cette dernière contre le mur qui a provoqué cette fissure.

Sur les photos 2.13 et 2.14, la fissure est apparente même après l'application des couches de peinture et d'une manière attirante, à défaut de non matérialisation du joint de dilatation.

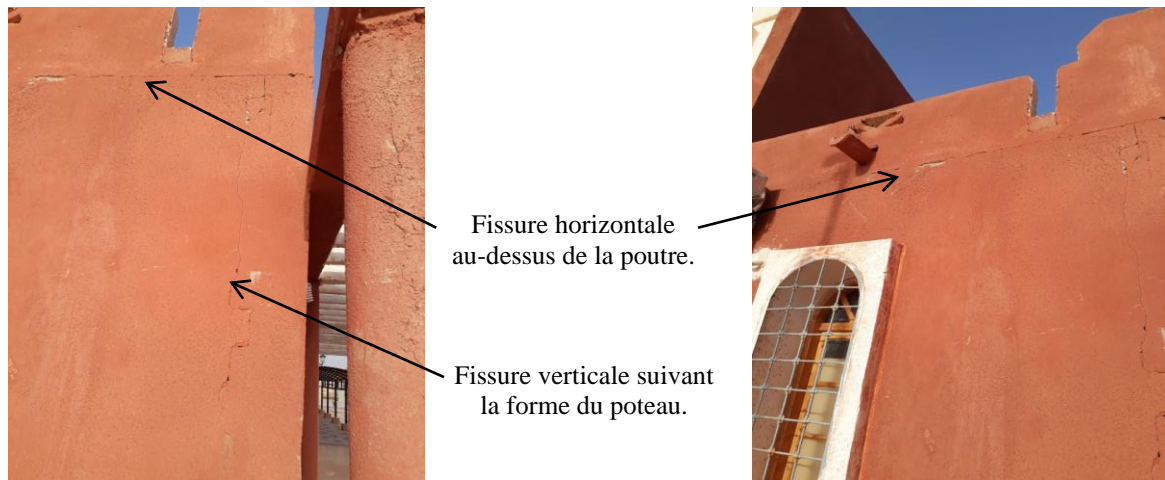


Photo 2.15. Fissure dans le poteau (Bloc administratif). Photo 2.16. Fissure lézard horizontale

Les figures 2.15 et 2.16 illustrent la fissuration des enduits au niveau du raccordement entre les structures en béton armé et de construction en maçonnerie.

En raison de la superposition des deux matériaux, dû au non-respect aux normes de construction, ce phénomène est observé après une petite sollicitation (charge mécanique ou thermique).

2.3.1.4. Nouveau siège de la Daïra de Timimoun

Ce siège de R+1 est en phase finition, et des désordres ont commencé à se manifester, soit dans les bureaux ou bien dans le grand hall de réception à l'entrée, entre poteau-maçonnerie comme indiqué sur la photo 2.17. Ce désordre touche aussi les appuis des ouvertures des linteaux (Photos 2.18, 2.19 et 2.20). Ces fissures ont des formes différentes, ceci est probablement dû aux forces importantes de tassements. Les photos 2.21 et 2.22, confirment ce que nous avons constaté.

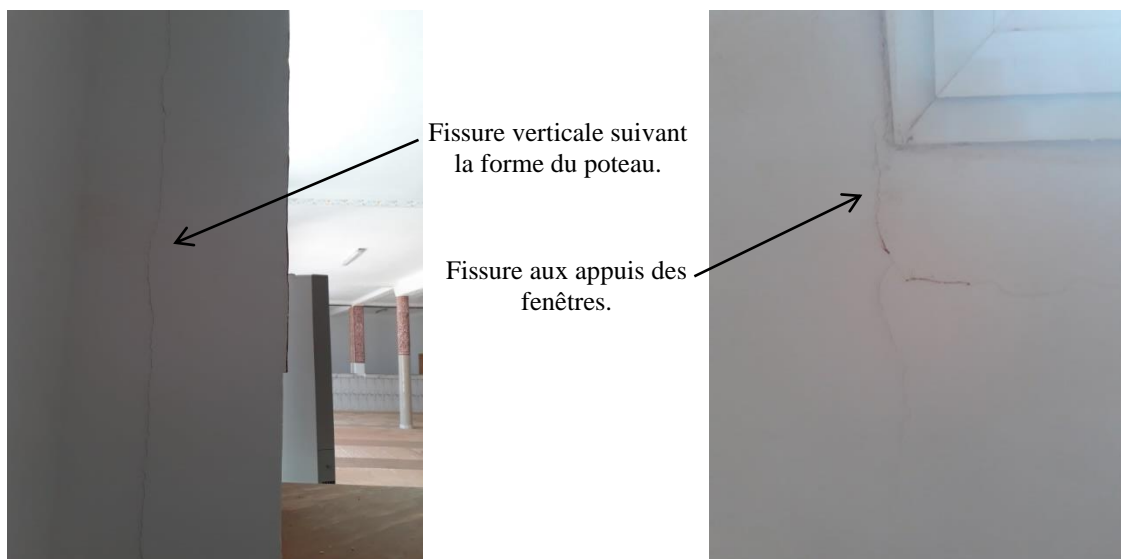


Photo 2.17. Fissure dans le hall de réception.

Photo 2.18. Désordre sous fenêtres.

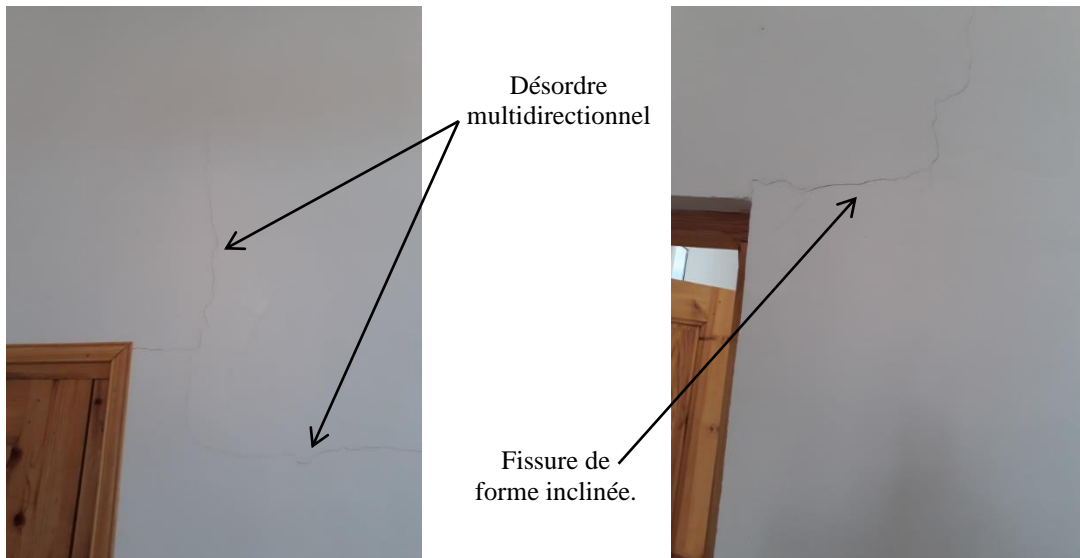


Photo 2.19. Fissure se divise en deux.

Photo 2.20. Désordre dépassant le linteau.

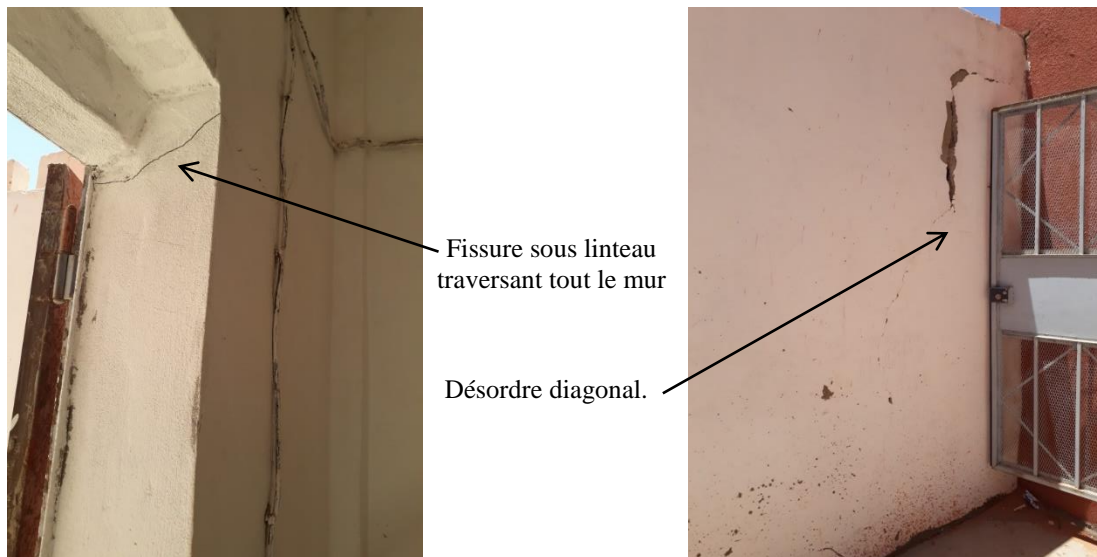


Photo 2.21. Fissure lézard sous linteau.

Photo 2.22. Fissure diagonale sur le mur.

2.3.1.5. Hôpital de 60 lits à Zaouiet Kounta

Zaouiet Kounta est une commune située au Sud de la wilaya. Son chef-lieu est situé à 77 km au Sud d'Adrar.

L'hôpital de Zaouiet Kounta est une structure sanitaire, sise dans la commune de Zaouiet Kounta, qui relève de la Direction de la Santé et de la Population (DSP) de la wilaya d'Adrar.

Nous avons soulevé dans ce projet plusieurs types de désordres, que ce soit par défaut d'exécution des tâches ou et par non-respect des normes exigées par la réglementation. Les défauts sont d'ordre général et concernent les éléments structuraux. Leur prise en charge est par conséquent primordiale dans nos analyses afin de mieux justifier les effets et les causes entrainant des fissures.

Sur la photo 2.23, les trous évidents sous l'armature transversale sont principalement dus au mauvais serrage du coffrage et à l'inadéquation de la qualité du béton (manque des granulats fines qui pourraient remplir les vides). En revanche, sur la photo 2.24, l'entreprise a essayé d'éviter le problème précédent, mais le phénomène est présent sous une autre forme en raison de la vibration excessive du béton fluide.

Lors de la mise en œuvre, il y a toujours des défauts mais la négligence est intolérable. Les figures 2.25 et 2.26 montrent que le coulage des éléments structuraux se fait sans nettoyage des coffrages, qui contiennent une grande quantité de sable sur lequel la dalle est coulée, ce qui peut absorber une quantité d'eau de gâchage et donc affecter la qualité et entraîner des fissures par la suite. De plus, la section de l'élément peut être réduite.



Serrage de coffrage, et manque de fines



Excès de vibration d'un béton fluide

Photo 2.23. Désordres sous armatures.

Photo 2.24. Faïençage au poteau.



Coffrage non conforme.



Couche de sable, pouvant absorber l'eau.

Photo 2.25. Manque nettoyage du coffrage.

Photo 2.26. Coulage sur une couche de sable.

Nous constatons d'après les photos 2.27 et 2.28 que, le phénomène d'éclatement de béton au jeune âge. Cela est fort probablement dû soit aux charges appliquées avant la fin de prise de béton, soit à une faible résistance du béton à la compression (ségrégation, béton non vibré).



Fissure puis l'éclatement qui atteint le bas du poteau

Eclatement du béton au milieu du poteau



Photo 2.27. Eclatement du bas de poteau

Photo 2.28. Eclatement à mi-hauteur



Fissure suivant l'emplacement du joint de dilatation.

Fissure due au retrait.



Photo 2.29. Fissure suivant le joint de dilatation. Photo 2.30. Retrait dans le béton du plancher

Pour les pièces horizontales dont la largeur est nettement supérieure à la hauteur, elles sont pratiquement concernées par le phénomène du retrait. Ce dernier est dû à l'absence de la cure, malgré que le climat de cette région soit reconnu très sec. C'est illustré sur les photos 2.29, 2.30, 2.32, 2.35 et 2.36. Notons aussi l'effet du vent de sable qui souffle souvent dans cette zone durant cette saison.



Photo 2.31. Coffrage mal exécuté.

Des fissures dues au retrait (évaporation rapide de l'eau)

Coffrage mal exécuté provoquant des lignes des fissures.

Reprise de bétonnage avec du béton très fluide

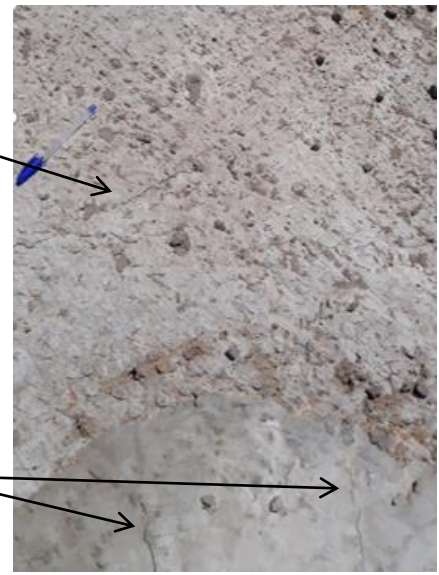
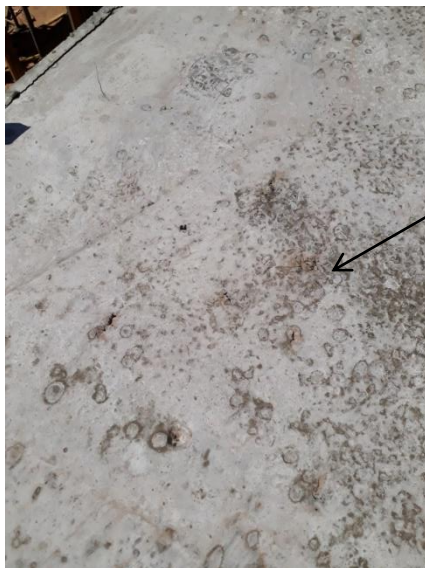


Photo 2.32. Retrait et reprise de bétonnage.

La mauvaise exécution du coffrage est la cause essentielle dans l'apparition des pores dans le béton et la perte du liant de ciment, le cas est présenté sur la photo 2.31.



Ségrégation du béton.

Des bulles blanches au-dessus des granulats, et présence des vides.



Photo 2.33. Trous et granulats apparents. Photo 2.34. Manque des fines entrainant des bulles

Une mauvaise formulation et vibration du béton rend le béton poreux et présente des vides non négligeables, ceci s'est manifesté sur les photos 2.33 et 2.34.

En conclusion, une maîtrise de formulation du béton est nécessaire pour remédier à ces désordres. L'utilisation de la cure est impérative pour protéger le béton contre le phénomène de séchage.



Photo 2.35. Retrait apparent à la plateforme. Photo 2.36. Absence de la cure source des fissures

Le respect des recommandations et le suivi permanent du béton sont nécessaires pour éviter une mauvaise formulation ou du mal exécution du coffrage.

2.3.1.6. Hôpital général de 240 lits à Adrar

Dans le pôle hospitalier de Tillilane, se trouve l'hôpital général (EPH 240 lits), cet ouvrage est on voie de finition, non encore réceptionné, il relève de la direction de la santé et de la population (DSP) de la wilaya d'Adrar ainsi que du ministère de la santé, de la population et de la réforme hospitalière. La réalisation a été confiée à une entreprise nationale, le suivi à un bureau d'étude national et le contrôle technique au CTC d'Adrar.

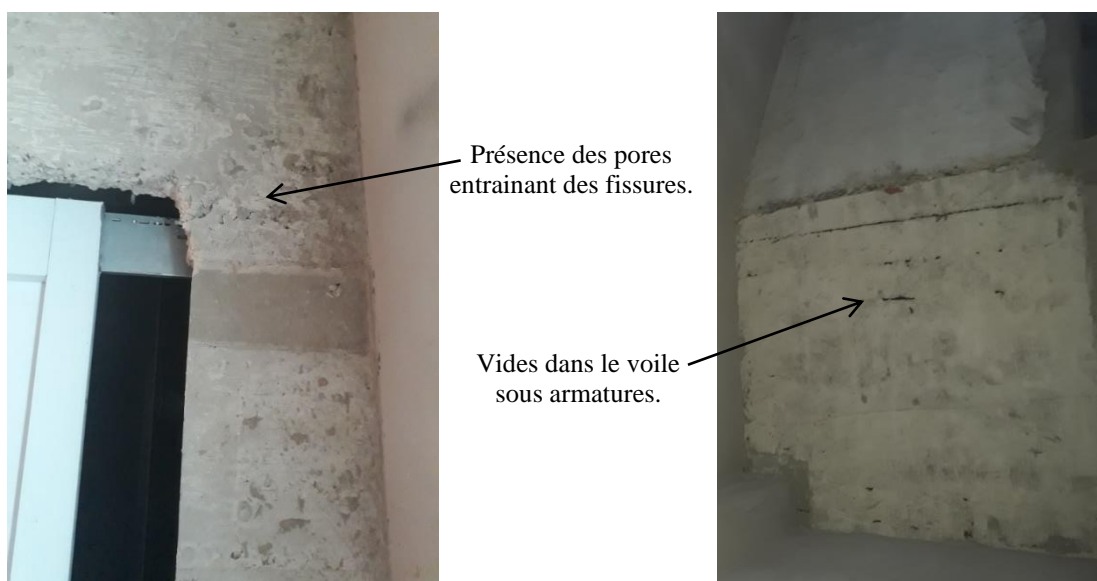


Photo 2.37. Fissure dans le linteau.

Photo 2.38. Vides sous armatures du mur voile.

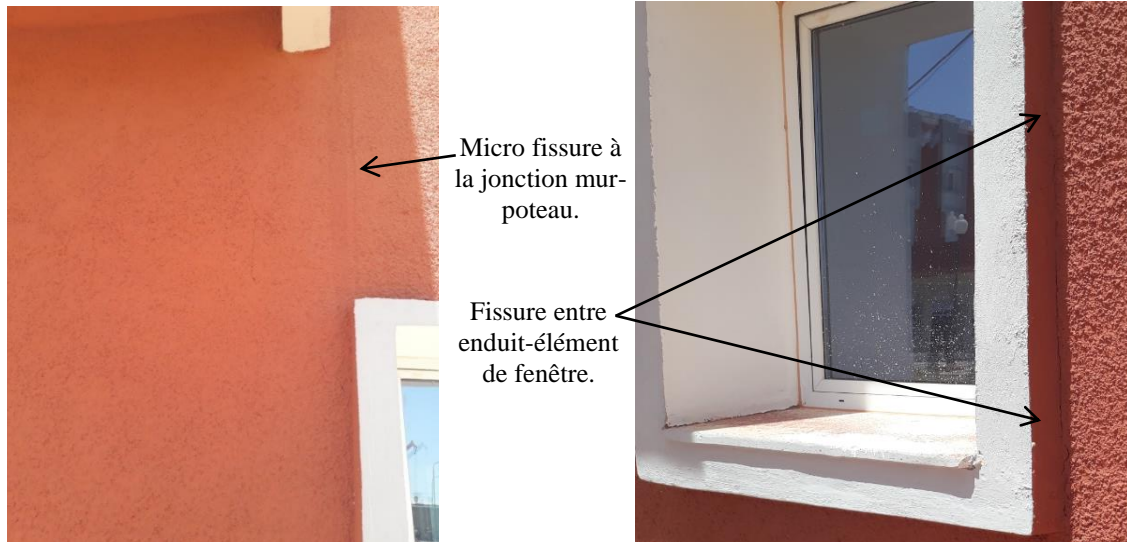


Photo 2.39. Fissure à l'interface mur-poteau.

Photo 2.40. Fissure autour de fenêtre.

Nous n'avons pas pu visualiser de près la qualité du béton de l'ouvrage et encore moins ses désordres éventuels. Néanmoins, nous avons sondé tout l'ouvrage et nous avons constaté les fissures illustrées sur les photos 2.37 à 2.40 ci-après.

Parmi les désordres que nous avons généralement observés, il y a les mauvais traitements infligés par les travailleurs (condition de caste), et parfois la négligence (Figs 2.37 et 2.38). Notons à titre d'exemple une fuite d'eau de longue durée de plus d'un mois observé près de l'endroit où les photos ont été prises 2.39 et 2.40.

2.3.1.7. Centre anti cancer "140 lits" à Adrar

Le projet de réalisation d'un centre anti cancer d'une capacité d'hospitalisation de 140 lits avec des chambres doubles et individuelles est situé dans le pôle hospitalier de Tillilane.

Cet ouvrage est pratiquement achevé, il ne reste que les équipements pour son inauguration. L'entreprise réalisatrice est étatique, c'est la même pour l'EPH 240 lits.

Encore une fois, nous n'avons pas pu visualiser de près la qualité du béton de l'ouvrage et encore moins ses désordres éventuels. Néanmoins, nous avons sondé tout l'ouvrage et nous avons constaté les fissures illustrées sur les photos ci-après.

Les désordres qui sont apparues dans cette structure ne sont pas nombreuses, car l'état de d'avancement est très avancé. Les fissures générales sont situées entre la jonction entre les parties en béton, comme le montrent les figures 2.42 et 2.46.

Et par défaut de reprise de la pièce, comme indiqué sur les photos 2.43 et 2.44, et après avoir trouvé que la réservation pour l'accès à l'ascenseur est insuffisante en hauteur, ils ont démoulé une partie du voile et ils ont repris le linteau. Cette opération crée logiquement des fissures au-dessus du nouveau linteau. Toujours l'excès de vibration engendre le débordement du liant et crée par la suite des pores en béton, photo 2.45.

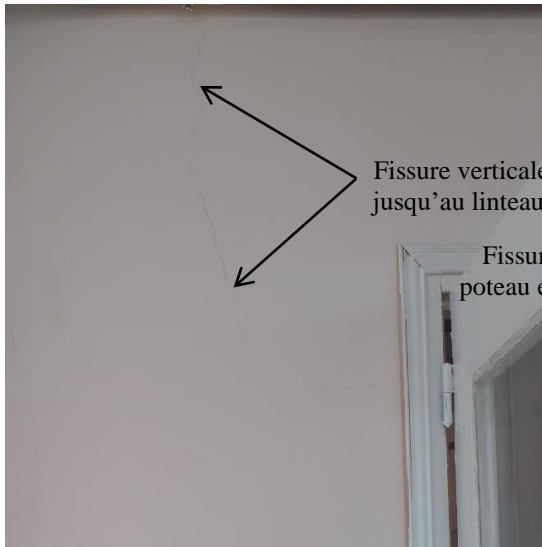


Photo 2.41. Fissure provenant du linteau.



Photo 2.42. Reprise de bétonnage.



Photo 2.43., et 2.44. Fissure au-dessus du linteau.



Photo 2.45. Pores sur le mur voile.



Photo 2.46. Mauvaise jonction de béton.

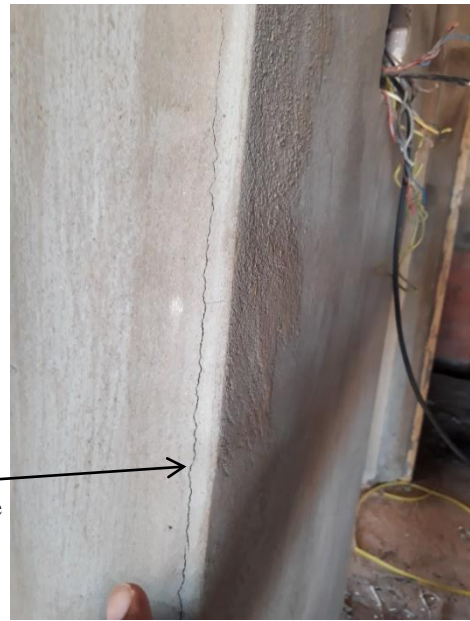
2.3.1.8. Lycée Berriche dans la commune de Sali

Berriche fait partie de la commune de Sali qui est situé au Sud d'Adrar et à 109 km, et 36 km de la ville de Reggane.

Le lycée Berriche était en phase de finition (enduit, carrelage et peinture), le bétonnage a été achevé en totalité.



Fissures
apparentes aux
enduits.



Mauvaise
adhérence entre
l'enduit et le
poteau.

Photo 2.47. Fissures des enduits.

Photo 2.48. Dislocation de la couche d'enduit.

L'enduit en plâtre est très sensible à la température, son application doit être rapide après sa préparation. La fissure se produit pour une contrainte très faible.



Fissure sous
l'effet de traction.

Fissure lézard à
la fin du palier
de repos



Fissure entre
la paillasse et
les marches

Photo 2.49. Fissure entre palier-paillasse.

Photo 2.50. L'effet de reprise du bétonnage.

Nous avons pu constater un excès dans le dosage en ciment, ceci se distingue clairement sur la photo 2.47, des fissures d'enduit sont apparues. De même, il y a manqué d'adhérence entre la surface lisse du poteau et l'enduit, ceci a entraîné la dislocation entre l'enduit et l'élément structural (photo 2.48).

Sur la photo 2.49 et 2.50., entre le palier et la paillasse de la deuxième volée, on voit que le béton n'est pas homogène (il y a reprise de bétonnage), et des fissures sont apparues. Aussi, nous constatons d'autres fissures à mi-palier (pouvant-être dû au décoffrage prématuré de la cage d'escalier).

2.3.1.9. APC de la commune de Tsabit

La commune de Tsabit se situe à l'Ouest de la wilaya d'Adrar. Son chef-lieu est situé au Nord d'Adrar à 67 km.

Le projet de construction du siège de l'APC a connu plusieurs défauts et anomalies. Malgré l'assistance du maître d'œuvre et du contrôle technique et les décisions prises pour rectifier, démolir ou reprendre les travaux, la mauvaise qualité du béton s'est toujours manifestée. Nous avons pu constater les réserves suivantes :

- Eclatement du béton dans un élément structural (photo 2.51.),
- Mauvaise formulation de béton,
- Non-respect des normes (dosage en eau et ciment, mauvaise granulométrie etc.), idem pour la photo 2.54,
- Manque de fines dans la formulation,
- Excès de vibration créent des trous suite à la perte du liant ciment (photo 2.53),
- Mauvaise exécution du coffrage (serrage important, mauvaise),
- Apparition des armatures (photos 2.52 et 2.56).



Photo 2.51. Qualité du béton médiocre.

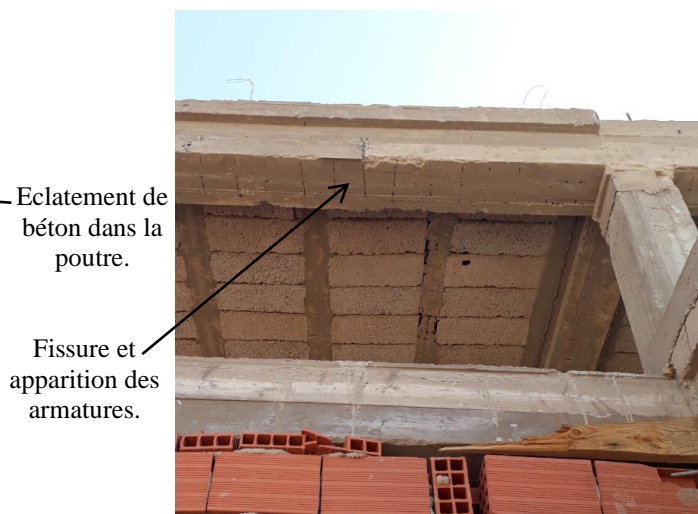


Photo 2.52. Ségrégation et faible enrobage.



Fissure sous chainage et dans la poutre.



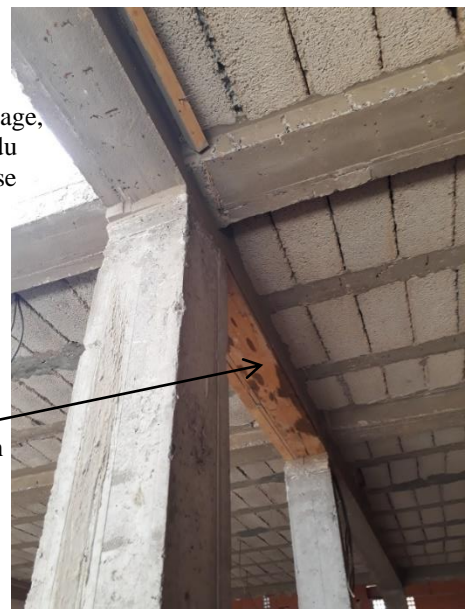
Fissure lézard dans la poutre.

Photo 2.53. Perte de liant entre poteau-poutre. Photo 2.54. Fissure dans la poutre principale.

Nous avons conclu aussi que la reprise de bétonnage répétée et le non suivi permanent du chantier sont considérés comme l'un des facteurs majeurs provoquant les fissures (photo 2.55).



Reprise de bétonnage, et non-respect du niveau de reprise



Bois de coffrage ancré dans le béton (après décoffrage).

Photo 2.55. Multi-reprise de bétonnage.

Photo 2.56. Mauvaise exécution du coffrage.

2.3.2. État des projets réclamés par l'organisme CTC d'Adrar

2.3.2.1. Projet « Adrar Touat Gaz » à Oued Zine, Adrar



Photo 2.57. Fissures apparentes.

Fissures apparentes.



Photo 2.58. Fissures aux semelles.

La cure mal faite.

Cette zone industrielle est située à 20 km au chef-lieu vers l'Est. Le projet « production de Gaz » revêt une importance capitale. L'éventuel développement de fissures dans de tels ouvrages peut être considéré comme majeur vis-à-vis de l'utilisation et de la sécurité d'un projet pareil (photo 2.57). La moindre erreur peut provoquer des dégâts très graves (pollution, explosion etc).

Nous avons visité ce chantier au mois d'Août, où la température atteint son extrême ($>50^{\circ}\text{C}$) ; une cure non encore retirée a montré que le coulage du béton est récent (photo 2.58). L'apparition de fissures est probablement due à une défaillance ou à une méthode d'application du traitement, d'où le phénomène de retrait fortement présent en cette saison, ou encore à une mauvaise formulation du béton.

2.3.2.2. Nouveau Lycée Tamentit « Sidi Ahmed DIDI »



Photo 2.59. Fissuration à l'arcade.

Fissures apparentes diagonales « Lézards » au sommet d'arcade.



Photo 2.60. Fissuration rectiligne intérieur de l'arcade

Les photos ci-dessous et ci-dessus présentent des fissures lézard le long d'un élément, elles suivent le joint de dilatation (photo 2.61), soit par défaut de non matérialisation de cette dernière (photo 2.62). Fissures locales en raison d'une mauvaise adhérence entre l'élément porteur et les enduits (cas d'arcade, photo 2.59 et 2.60) ; ou en raison du sol travaillé par la présence d'eau (zone de plantation adjacente).

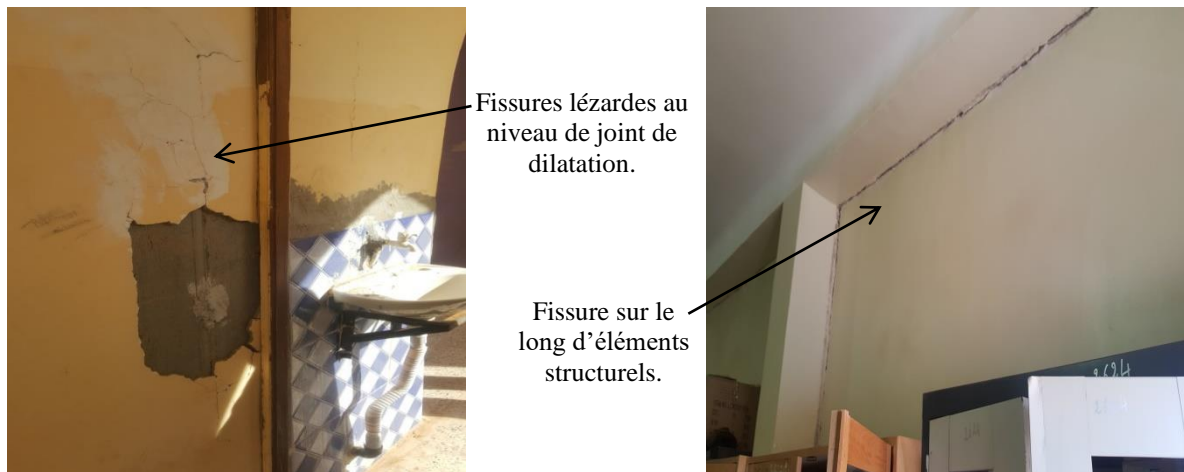


Photo 2.61. Fissuration autour du joint. Photo 2.62. Fissuration autour des éléments structurels

On peut conclure que ces fissures ne présentent pas de risque de danger sur l'être humain, mais néanmoins il faut les traiter d'une façon adéquate.

2.3.2.3. Centre Culturel Islamique (CCI), Adrar :

Les dégradations apparues au niveau du Centre Culturel Islamique (CCI) sont comme suit :

Des fissures remarquables sur la façade latérale de ce centre, de formes assez importantes, verticales au joint de dilatation (photo 2.63), et transversales au niveau du plancher (photo 2.64).



Photo 2.63. Joint de dilatation non matérialisé.



Photo 2.64. Fissures au-dessous de la poutre.

Il y a encore des espaces verts et quelques arbres près des salles d'eau, et il y a aussi une trappe d'entrée près de cet endroit, d'où nous concluons qu'il y a soit une fuite d'eau dans le réseau AEP (présence de tuyaux d'eau), soit une inondation dans le regard, ce qui rend le sol toujours humide.

Cela peut provoquer des tassements des socles et par conséquent des fissures au niveau du joint de dilatation (qu'il soit naturel), et sous-poutre horizontale dont la structure est détachée de la maçonnerie dans la partie droite de la semelle, et à cause du débordement de réservoir d'eau placé à la terrasse.

La raison évidente de ces dégradations pourrait donc être due à la présence permanente d'eau près et au-dessus de la structure.

2.3.2.4. Subdivision d'hydraulique de Bordj Badji Mokhtar

Ce projet a subi des dégradations de différents ordres, nous avons observé des microfissures ou faïençage et autres lézard (photo 2.65) dont l'orientation est diagonale (photos 2.66 et 2.67), et d'importantes ouvertures entre lèvres de fissures.



Photo 2.65. Eclatement des enduits.

Fissures mur-plancher, le long du mur.

Fissures lézard diagonales.



Photo 2.66. Fissure entre appuis.

La région de Bordj Badji Mokhtar est connue par son argilite (argile gonflant) et par la présence permanente ou périodique de l'eau causant des tassements de toutes sortes (Rapports de sol). Ceci nous conduit à confirmer ce phénomène de tassement dangereux.



Photo 2.67. Fissure diagonale entre appuis.

2.4. Conclusion

Après analyse des données et suite aux différents constats effectués par nos soins, nous pouvons justifier les points essentiels de notre conclusion comme suit :

- Le phénomène de fissuration est très présent dans la région d'Adrar, sous plusieurs formes (oblique, diagonale, transversale), natures (superficielles, cicatrice, profond).
- La mauvaise formulation du béton, le retrait, le ressuage etc. sont considérés comme étant les principales causes du développement de la fissuration.
- Le facteur aridité était présent dans plusieurs cas (taux d'humidité très faible), malgré que la période de certaines de nos visites ne fût pas très chaude. Par conséquent, nous sommes sûrs que durant la période estivale, cela pourrait s'aggraver.
- Dans les zones arides du Sud de notre pays, et particulièrement dans la région d'Adrar, caractérisée par son été le plus long et le plus chaud au monde [128], le phénomène de fissures dans les bâtiments et les ouvrages d'art, ce manifeste d'une manière très répandue.
- Le facteur d'aridité est donc la cause principale qui a engendré la fissuration du béton et des enduits. D'autres paramètres ont aussi contribué à l'aggravement de ce phénomène comme par exemple ; la faible résistance du béton, le vieillissement des éléments du bâtiment.
- La fissuration des éléments structuraux juste après le coulage du béton était visible à l'œil nu (photo 2.57).

Les conclusions de ce chapitre nous ont conduit à justifier notre programme de recherche expérimental (voir chapitre 04.) pour arriver à bien connaître l'ampleur et la façon d'influencer par divers facteurs régissant ce phénomène de fissuration. L'établissement d'une banque de données relatives au climat aride caractérisant notre région d'Adrar.

Dans les chapitres suivants, nous allons caractériser les matériaux locaux pour optimiser une formation du béton adéquate avec ce climat aride et expérimenter sur des dallâtes de béton l'étude de phénomène de fissuration afin d'y remédier.

Chapitre 3 :

Matériaux utilisés et méthodologie

3.1. Introduction

Pour étudier le phénomène de fissuration, il est recommandé de suivre une méthodologie scientifique pour aboutir à des résultats fiables.

Dans le deuxième chapitre, nous avons effectué des visites de projets et ouvrages en cours de réalisation ou achevés et non encore exploités pour qu'il n'y ait pas d'autres intervenants (humain, ou à cause d'une mauvaise exploitation), qui ont causé ces dégradations. Cela nous a indiqué plusieurs types de fissures de différentes formes et à des stades variés (et avant leur exploitation), parmi lesquelles celles dues au climat.

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie expérimentale qui débute par l'identification des matériaux utilisés qui est une phase obligatoire et nécessaire pour connaître la nature des composants et pour maintenir ou apporter d'éventuelles corrections aux mélanges étudiés.

Nous avons ensuite élaboré des mélanges des bétons en laboratoire afin de les exposer au climat aride afin d'étudier l'influence de ce climat sur leurs comportements. Pour cela, nous avons choisis d'abord la méthode de formulation majoritairement utilisée dans les divers chantiers de notre région d'Adrar, c'est la méthode de Faury. Nous avons donc exposé, au climat d'été, les éprouvettes de bétons confectionnées avec superplastifiant, témoins et traité par la cure, selon la norme américaine ASTM C 1579.

En deuxième étape et dans le but d'améliorer la formulation du béton à base de matériaux locaux, nous avons choisi la méthode de Dreux-Gorisse. L'optimisation de cette méthode de formulation s'appuie sur plusieurs paramètres qui sont : la consistance et la résistance. L'analyse des bétons aux états frais et durci permet de justifier la sélection des meilleurs bétons.

Dans ce contexte, nous avons confectionné des mélanges à base de différentes formulations pour les étudier dans les conditions climatiques sévères de cette région aride. Nous avons contrôlé leur influence sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton obtenu. Cette étape a été menée dans le but d'optimiser des formulations du béton les plus adéquates possibles en utilisant différents matériaux locaux de la région d'Adrar.

Plusieurs bétons ont été donc confectionnés : bétons témoins, bétons corrigés en variant le pourcentage du sable de dunes avec du sable concassé, et en ajoutant du superplastifiant à différents taux.

Comme dernière étape, nous avons retenu pour la suite de notre programme expérimental les meilleurs bétons des points de vue consistance et résistance dans un climat aride (selon la norme ASTM C 1579). Les éprouvettes ont été conservées selon deux modes ; à l'intérieur de laboratoire et à l'extérieur, en retenant à chaque fois trois dallâtes pour chaque mode de conservation.

3.2. Identification des matériaux

Tous les constituants de nos bétons proviennent de matériaux locaux, qui sont utilisés pratiquement dans la majorité des chantiers de la région d'Adrar.

3.2.1. Caractérisation des matériaux

3.2.1.1. Ciment

Nous avons utilisé un ciment Portland provenant de la cimenterie d'Aoulef située à 250 km du Sud du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, c'est un ciment CPJ-CEM II/A 42.5N [132], son nom commercial est STG. Sa composition est donnée par le tableau 1 suivant la norme (NA 5042)[133].

Tableau 3.1. Composition chimique du ciment utilisé [134]

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	CaO libre
Teneur en %	21.30	4.83	3.31	64.53	2.28	1.43	0.61

Tableau 3.2. Composition minéralogique du ciment utilisé [134]

Elément	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur en %	46.56	25.93	7.20	10.07

3.2.1.2. Sables

Les sables de dunes généralement utilisés proviennent des dunes de la commune de Bouda, à 20 km à l'Ouest d'Adrar (photo 3.1), et pour le sable concassé, la carrière se trouve à 8 km environ près du petit village qui s'appelle Koussane au Sud-Ouest du chef-lieu.



Photo 3.1. Sable de dunes de la région d'Adrar « Bouda, Elmansour »

3.2.1.2.1. Analyse granulométrique

Nous avons effectué ces analyses granulométriques au Laboratoire de Travaux Publics de Sud (LTPS d'Adrar). Le plus gros diamètre de ce sable est de l'ordre de 1,25 mm, celui des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,08 mm. Une forte proportion des grains a le même diamètre. Les résultats de l'analyse granulométrique des sables selon la norme NF P 18-560 [135], sont présentés sur les courbes de la figure 3.1.

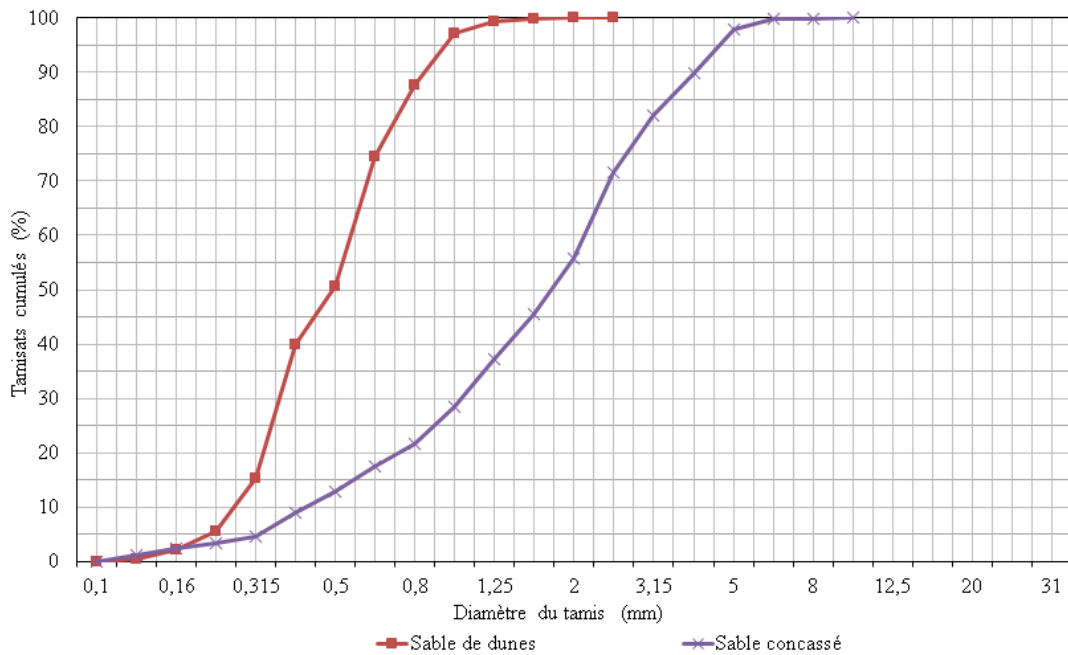


Figure 3.1. Courbes granulométriques du sable de dunes et du sable concassé.

3.2.1.2.2. Caractéristiques physiques

Une série d'essais a été effectuée (selon la norme AFNOR) afin de déterminer les caractéristiques physiques des sables, et qui sont représentés au tableau 3.3 :

Tableau 3.3. Propriétés physiques des sables

	Sable de dunes	Sable concassé	Normes
MV absolue (g/cm^3)	2.57	2.68	NF EN 10976
Equivalent de sable	80.1	59.26	NF EN 933-8+A1
Module de finesse	1.67	3.00	NF EN 12620
MV apparente (g/cm^3)	1.59	1.34	NF EN 10976
Dmax (mm)	1.25	5	NF EN 9331

L'équivalent de sable est un indicateur caractérisant la propreté d'un sable. Il indique la teneur en fines de diamètre inférieur à 0,5mm. D'après les valeurs illustrées au tableau 3.3, et les essais effectués suivant la norme NE 933-8 [21], ce sable de dunes utilisé est très propre, tandis que pour le sable concassé, l'équivalent de sable est inférieur à 60% et il est de nature limoneuse (figure 3.2).

Selon la norme NF P 18 304 [136], le module de finesse d'un sable est égal au centième de la somme des refus exprimés en pourcentage pondéral sur les différents tamis de la série sauf le tamis (0,08), la valeur montre que le sable de dunes de Bouda est fin, tandis que c'est à gros grain pour le sable concassé. La teneur en eau du sable de dunes est de 1,6%, et de 0,46% du sable concassé.

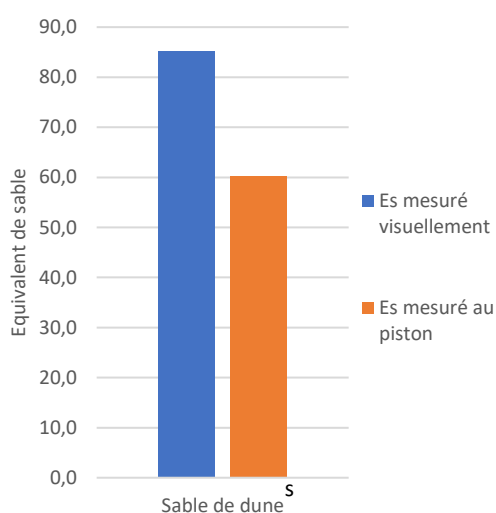


Figure 3.2. L'équivalent de sable de dunes mesuré visuellement et au piston

3.2.1.2.3. Analyse chimique

La composition chimique du sable de dunes (SD) comprend plus de 90% de silice, et de 3% de calcaire et des traces de différents oxydes [137]. Le sable concassé (SC) est classé comme un sable silico-calcaire, grâce aux quantités importantes des (SiO_2 et CaO) que contient ce dernier. La répartition en oxydes dans les sables étudiés est donnée par le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs [134].

%	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	P_2O_5	TiO_2	Mn_2O_3	Cr_2O_3
SD	90.29	2.95	0.35	3.15	2.12	0.22	0.10	0.38	0.034	0.06	0.31	0.11
SC	49.80	5.74	7.60	23.99	7.18	0.74	1.02	2.71	0.051	0.65	0.102	0.39

3.2.1.3. Granulats

Nous avons commencé par caractériser physiquement et mécaniquement les matériaux utilisés, les carrières de gravier sont concentrées à Koussane, une zone située dans la commune de Ouled Ahmed Timmi, à environ 8 km au Sud-Ouest du chef-lieu de la wilaya d'Adrar. La granulométrie des graviers est illustrée dans la figure 3.3, et leurs propriétés physico-mécaniques présentées dans le tableau 3.5 ci-après :

Tableau 3.5. Propriétés physico-mécaniques des granulats

	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Norme
Propreté superficielle (%)	1.92	0.92	[138]
Absorption d'eau (%)	2.15	1.92	[139]
Teneur en eau (%)	0.46	0.38	[140]
Los Angeles (%)	19.66	18.28	[141]
Micro-Deval (%)	32.40	24.00	[142]
Masse Volumique apparente (g/cm ³)	1.17	1.26	[143]
Masse Volumique absolue de graine (g/cm ³)	2.64	2.63	[143]

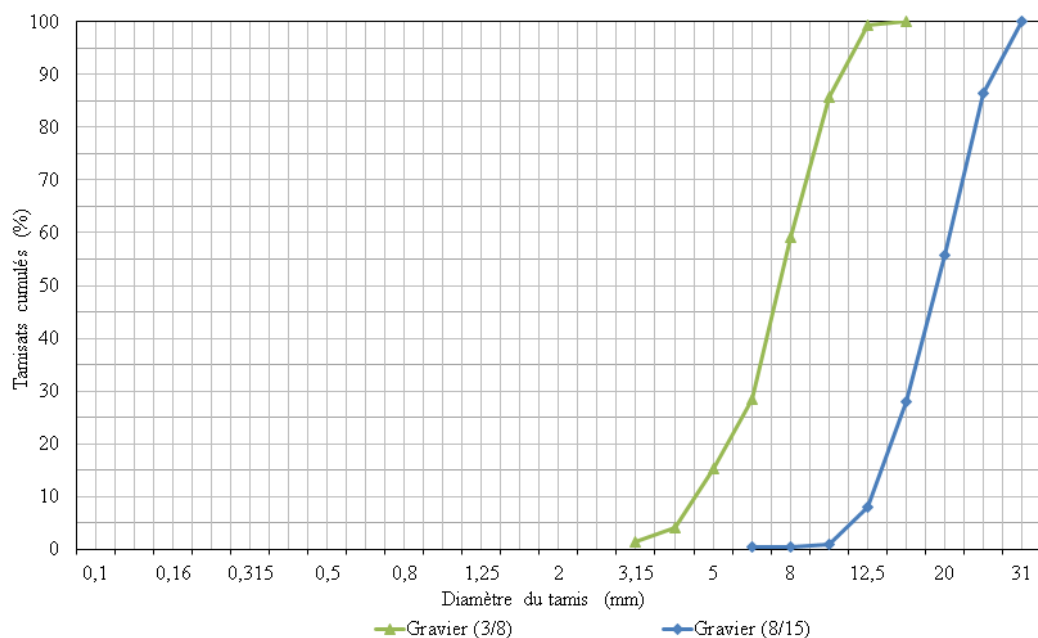


Figure 3.3. Courbes granulométriques des graviers 3/8 et 8/15.

3.2.1.3.1. Essai de propreté des graviers

Les graviers présentent une propreté satisfaisante puisque, selon les spécifications exigées par la norme P 18-541, le pourcentage d'éléments inférieurs à 0.5 mm doit être inférieur à 3 % dans le cas des granulats concassés, comme indiqué dans le tableau 3.5 [144].

3.2.1.3.2. Coefficient d'absorption des granulats

L'absorption de l'eau par les granulats a été déterminée conformément à la norme NA 255, les granulats ont donné des coefficients d'absorption qui répondent aux exigences de la norme P18-541 ($\leq 5\%$), comme indiqué dans le tableau 3.5.

3.2.1.3.3. Teneur en eau

Deux fractions de graviers (3/8 et 8/15 mm) ont été utilisées, d'après les valeurs obtenues, nous remarquons que la teneur en eau des granulats est très faible pour les deux graviers, comme indiqué dans le tableau 3.5.

3.2.1.3.4. Masses volumiques apparente et absolue

Conformément à la norme NF EN 12620 [144], nous avons déterminé les masses volumiques apparentes et absolues des graviers. Pour la détermination de la masse volumique absolue des graviers, nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, qui est une méthode simple et rapide.

Les masses volumiques absolues sont d'environ 2,64 g/cm³ et 2,63 g/cm³ pour les granulats 3/8 et 8/15. Tandis que les masses volumiques apparentes sont comme suit : 1,17 g/cm³ pour le granulats 3/8 et 1,26 g/cm³ pour le granulats 8/15. Ces masses volumiques, apparentes et absolues, répondent donc aux spécifications de la norme (tableau 3.5).

3.2.1.3.5. Essai Micro-Deval

La dureté et l'abrasion des graves sont évaluées à l'aide des essais Los-Angles (LA) et Micro-Deval (MDE), les résultats sont reportés sur la figure 3.4.

Nous pouvons conclure que les graviers présentent une bonne résistance à l'usure, sachant que, en fonction des usages, la norme XP P 18-545 exige des valeurs maximales tolérées inférieures à 35 %.

3.2.1.3.6. Essai Los-Angles

Le calcul du coefficient Los Angeles a été effectué conformément à la norme NA 458, donc nos graviers répondent aux exigences de la norme XP P 18-541 qui exige des valeurs maximales tolérées inférieures à 40%.

Toutes les propriétés ont été déterminées suivant les normes en vigueur à savoir : NF P18-553-554-555, NF P18-560, NF P18-573, NF P18-597-598.

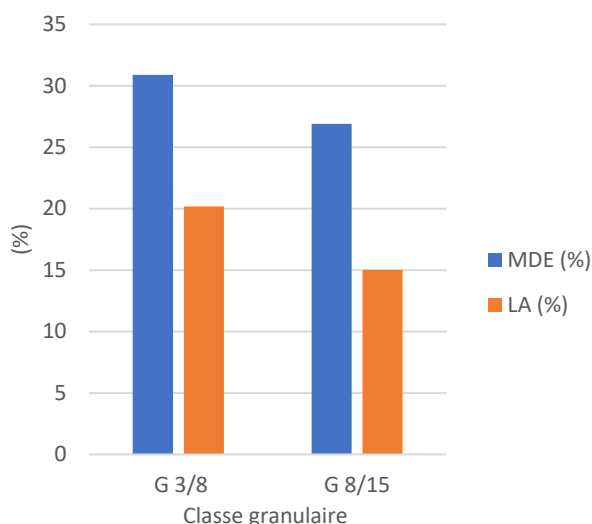


Figure 3.4. Essais mécaniques LA et MDE des granulats 3/8 et 8/15

3.2.1.4. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée provient du robinet du laboratoire de l'université d'Adrar, pompée de la nappe Oued-Ezzine (Adrar). Les résultats de l'analyse chimique de cette eau, effectuée à l'agence national des ressources hydrauliques d'Adrar « ANRH », sont présentés dans le tableau 3.6. Ces résultats répondent aux prescriptions de la norme XP P 18-303 et NF EN 1008.

Tableau 3.6. Composition de l'eau de gâchage (mg/L)

Éléments	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃	pH
(mg /L)	80	33	160	7	214	228	162	22,78	7,5

3.2.1.5. Adjuvant

3.2.1.5.1. Description

Le MEDAFLOW 3041 R est un adjuvant haut réducteur d'eau et retardateur de prise (fonction secondaire), conformément à la norme EN 934-2 [145], formulé à base de polymères de synthèse et combinés.

3.2.1.5.2. Domaines d'application

- Bétons et bétons à hautes performances,
- Bétons architecturaux,
- Bétons précontraints,
- Béton transporté sur de longues distances > 1 h 30.

3.2.1.5.3. Propriété

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 3041 R permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas,
- Amélioration de la fluidité,
- Avoir un long maintien d'ouvrabilité,
- Éviter la ségrégation,
- Faciliter la mise en œuvre du béton.

Sur béton durci :

- Diminuer la porosité,
- Augmenter la durabilité,
- Diminuer le retrait.

3.2.1.5.4. Caractéristiques

➤ Aspect.....	Liquide
➤ Couleur.....	Brun clair
➤ pH.....	6 – 6,5
➤ Densité.....	1,08 ± 0,01
➤ Teneur en chlore.....	< 0,1 g/L
➤ Extrait sec.....	30% ± 1

3.2.1.5.5. Mode d'emploi

Le MEDAFLOW 3041R ne doit pas être ajouté directement dans l'eau de gâchage, mais après le malaxage et après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été ajoutée.

Le MEDAFLOW 3041R peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), et après introduction de la dose convenable, le malaxeur devra tourner à grande vitesse pendant 2 à 3 minutes après l'introduction du superplastifiant. Il est conseillé d'ajouter le MEDAFLOW 3041R à un béton qui ne soit pas trop ferme.

N.B : nous allons nommer cet adjuvant réducteur d'eau « superplastifiant ».

3.2.1.6. La cure

Conformément à la norme NF P 18-370 [146] et pour protéger nos bétons contre la dessiccation, nous avons utilisé un produit de cure nommé MEDACURE.

3.2.1.6.1. Description

C'est un produit qui se présente sous la forme d'un liquide blanchâtre, destiné à recouvrir les bétons et mortiers frais.

3.2.1.6.2. Domaines d'application

- Protection de tous les bétons avec une grande surface exposée au soleil.
- Protection des chapes en mortier.
- Protection des bétons dans les climats chauds.
- Routes et pistes d'aérodrome en béton.
- Dallages et dalles en béton.
- Enduit au mortier de ciment.
- Réservoirs, terrasses.

3.2.1.6.3. Propriété

MEDACURE est un produit de cure qui adhère parfaitement sur les bétons et mortiers et qui possède un bon pouvoir couvrant.

Après pulvérisation sur béton frais, il se polymérise au contact de l'air et forme une fine pellicule qui le protège contre une dessiccation prématurée, empêche l'évaporation rapide de l'eau de gâchage, réduisant ainsi le risque de fissuration.

MEDACURE remplace les anciens procédés de protection tels que :

- Sable humide, toile de jute.
- L'arrosage pendant plusieurs jours avec les risques faïençage du support.

3.2.1.6.4. Caractéristiques

- Aspect Liquide
- Couleur Blanche
- Densité 1,00 ± 0,01
- Temps de séchage à 20°C 1h30mn
- Teneur en chlorures < 0,1g/L

3.2.1.6.5. Mode d'emploi

MEDACURE est pulvérisé dès que la surface du béton devient mâtée en séchant, c'est-à-dire, dès la disparition du brillant de l'eau de ressuage. Il s'applique tel quel, sans aucune dilution, au pulvérisateur ou au balai souple.

3.3. Formulation des bétons

3.3.1. Méthode de calcul de la composition du béton selon Faury

3.3.1.1. Courbe granulométrique

Nous avons choisi en premier lieu, comme méthode de composition du béton, celle de Faury. Cette méthode est la plus utilisée dans la confection des bétons dans notre région d'Adrar.

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu. Cette méthode qui consiste à déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs, et de chercher à s'en rapprocher le plus possible, elle est aussi applicable à tous les granulats, quelle que soit la masse volumique.

La particularité de cette méthode est qu'elle est :

- Applicable à tous les granulats, qu'elle que soit la masse volumique. Faury a distingué les grains fins et moyens des gros et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux courbes, il adopta aussi une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$.
- L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée par la formule :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Où :

A : constante, traduisant la maniabilité du béton.

B : constante traduisant l'importance du serrage du béton.

D : plus grande dimension de tamis.

R : rayon de la maille de tamis.

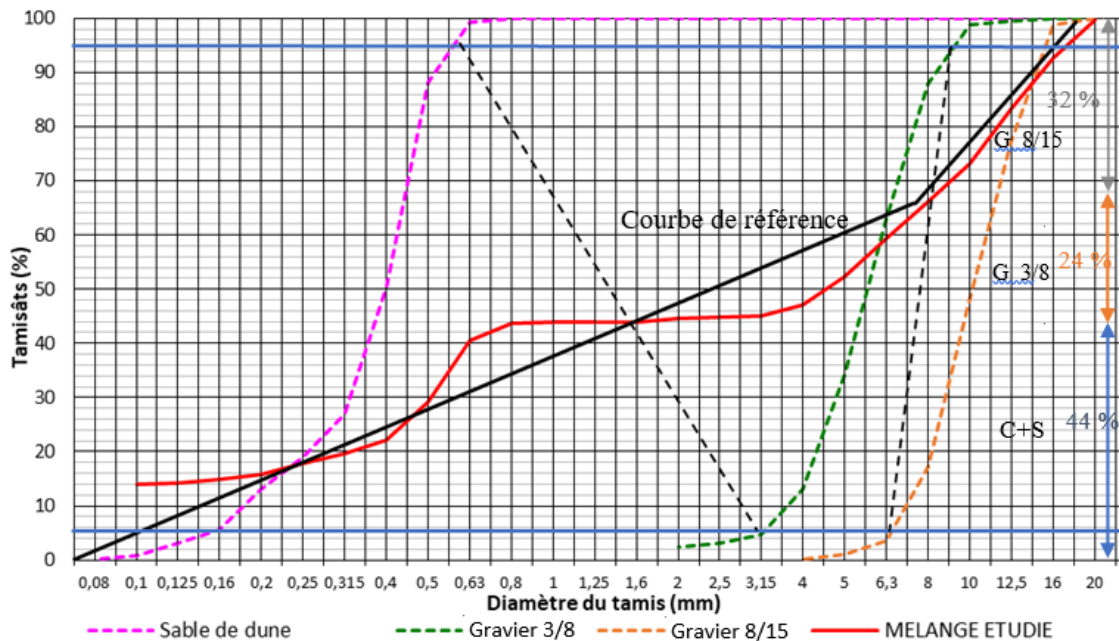


Figure 3.5. Composition de béton selon Faury.

On déduit, d'après les courbes granulométriques de la figure 3.5, les pourcentages pour chaque constituant pour le (sable + ciment), le gravier 3/8 et le gravier 8/15.

Les différents bétons élaborés sont :

- Béton témoin.
- Béton avec superplastifiant.
- Béton traité par la cure.

Les proportions des différents constituants pour 1m^3 de béton sont reportées dans le tableau 3.7.

3.3.1.2. Béton témoin et traité avec la cure

Tableau 3.7. Proportions des constituants des bétons ($C=350\text{kg/m}^3$)

Types	Proportions			
	C	SD	G 3/8	G 8/15
Bétons témoins	1	1.66	1.34	1.79
Bétons traités par la cure	1	1.66	1.34	1.79

3.3.1.3. Béton avec superplastifiant

Tableau 3.8. Proportions des constituants des bétons ($C=350\text{kg/m}^3$)

Types	Proportions			
	C	SD	G 3/8	G 8/15
Bétons avec superplastifiant	1	1.72	1.42	1.88

3.3.2. Méthode de calcul de la composition du béton selon Dreux-Gorisse

Comme deuxième méthode, nous avons utilisé celle de Dreux-Gorisse qui a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier, et ayant données satisfaction.

Elle est d'autre part plus rapide et très simple d'utilisation ; puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés. Elle consiste à déterminer le rapport E/C qui varie selon la résistance désirée et l'ouvrabilité souhaitée.

I- Données de base de cette méthode :

A) Nature de l'ouvrage

Il est nécessaire de connaître la nature de l'ouvrage, pour savoir l'épaisseur minimale puis la disposition des armatures et distance minimale aux zones les plus ferrillées et par rapport au coffrage.

B) Résistance souhaité

Une résistance moyenne à 28 jours est ciblée, elle est donnée comme suit :

$$\sigma'_{28} = f_{c28} + 15\% * f_{c28}$$

C) Ouvrabilité désirée

La nature de l'ouvrage et la façon du bétonnage sont des paramètres qui aident à déterminer la consistance désirée donnée par l'affaissement au cône d'Abrams. On a ciblé deux types de bétons qui conviennent au climat aride de notre région ; plastique et très plastique.

II Dimension maximale des granulats

Le Dmax est sélectionné suivant la nature de l'ouvrage à construire. Nous avons travaillé avec un moule de la norme ASTM C1579 ayant une épaisseur de 9 cm, d'où le Dmax utilisé de 15mm.

III Dosage en ciment

En fonction de la résistance désirée f'_{c28j} , on évalue le rapport C/E :

$$\sigma'_{28} = G' \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Avec :

σ'_{28} : Résistance moyenne en compression désirée à 28 jours, en MPa.

σ'_c : Classe vraie du ciment à 28 jours, en MPa.

C : Dosage en ciment, en kg/m³.

E : Dosage en eau, en L/m³.

G' : Coefficient granulaire en fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

IV Analyses granulométriques

Sur la courbe granulométrique, on trace la droite OAB qui est définie comme suit :

- Point O à l'origine : T = % du tamisât du sable au tamis de 0,08mm.
- Point B à l'extrémité : T = 100% au tamis de dimension D.
- Point A de brisure défini comme suit :
 - Abscisse : si $D < 20 \text{ mm} \rightarrow x = D/2$
si $D \geq 20 \text{ mm} \rightarrow x = \text{milieu du segment limité par le tamis de } 5 \text{ mm et le tamis correspondant à } D.$
 - Ordonnée : $y = 50 - (D_{\max})^{1/2} + K'$, ou $K' = K + K_s + K_p.$

Avec K' : un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de type de vibration et de la forme des granulats (roulés ou concassés).

V Coefficient de compacité (γ) :

C'est le rapport du volume absolu des matériaux solides réellement contenus dans la même quantité de béton frais. Il dépend de la consistance, du type de serrage et du diamètre maximal des granulats.

La composition granulométrique optimale est représentée par une ligne brisée OAB, cette courbe nous permet la détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux entrants dans la composition du béton.

D'après les courbes granulométriques de la figure 3.6, nous déduisons les pourcentages obtenus pour chaque constituant. Les proportions des différents constituants de béton sont reportées dans le tableau 3.9.

A cause des conditions climatiques défavorables généralement rencontrées surtout en période estivale, lors de la mise en place d'un béton exposé, et qui est utilisé dans la construction des ouvrages courants, et ouvrages d'art.

Exemple d'un béton témoin très plastique avec 100% SD :

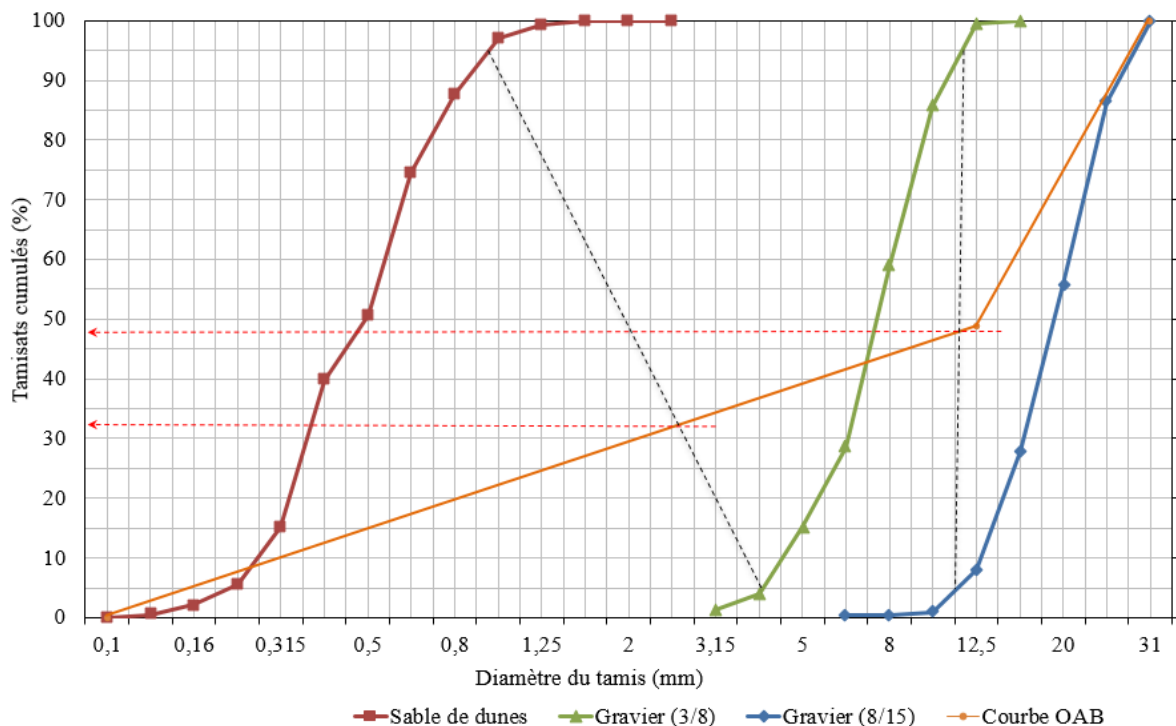


Figure 3.6. Composition d'un béton témoin très plastique avec 100% SD

Nous avons adopté deux types de consistances du béton : très plastique et plastique, chacune est reproduite avec quatre pourcentages de sable de dunes, à savoir ; 100%, 80%, 60% et 40%.

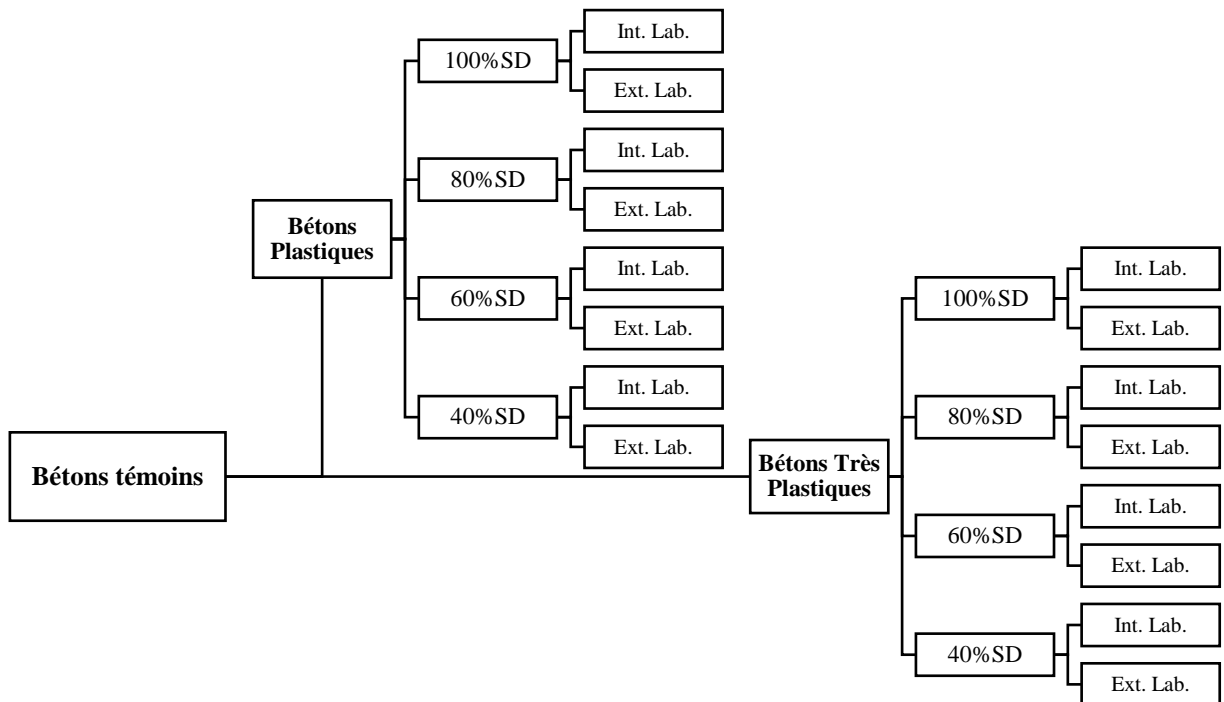


Figure 3.7. Organigramme des bétons étudiés témoins

L'ensemble des bétons étudiés sont reproduits avec l'introduction d'un superplastifiant avec un dosage de 0,5% (figure 3.7 et 3.8).

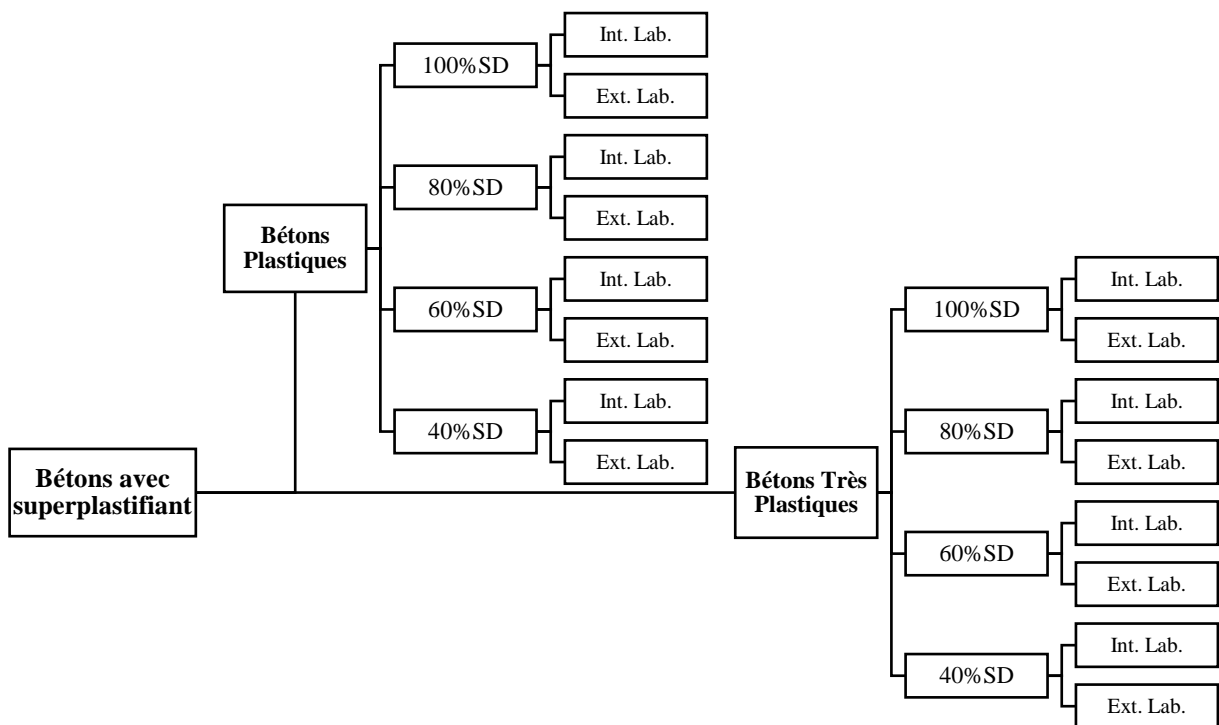


Figure 3.8. Organigramme des bétons étudiés avec superplastifiant

3.3.2.1. Bétons témoins

Les différents bétons élaborés sont indiqués aux tableaux ci-dessous (3.9 et 3.10). Des abréviations de ces bétons ont été prises juste pour pouvoir présenter leurs formulations. Puis la composition de chaque type de béton est indiquée au tableau 3.10 pour les bétons très plastiques, et au tableau 3.11 pour les bétons plastiques.

3.3.2.1.1. La consistance très plastique (affaissement =12cm et E/C=0.55)

Les proportions des constituants (ciment, sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/15) pour les mélanges du béton en fonction de correction de sable et pour un dosage de ciment ($C=350 \text{ kg/m}^3$) déterminée en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams., sont présentées dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9. Proportions des constituants des bétons très plastiques témoins en fonction des sables de dunes ($C=350 \text{ kg/m}^3$)

Bétons	Proportions des constituants				
	C	SD	SC	G 3/8	G 8/15
BTP-0.55-100%	1	1.66	0.00	0.74	2.58
BTP-0.55-80%	1	1.53	0.38	0.64	2.43
BTP-0.55-60%	1	1.18	0.79	0.64	2.38
BTP-0.55-40%	1	0.84	1.26	0.62	2.11

Nous avons constaté d'après les résultats obtenus que :

- Les proportions des sables corrigés ($SDC=SD+SC$) et (G8/15) sont toujours supérieures à celle de ciment.
- Les proportions des granulats (G3/8) n'ont pas subi de changements considérables, et elles sont inférieures à 1.
- L'augmentation de quantité de sable concassé augmente considérablement les proportions des sables corrigés par rapport au ciment.
- Cette augmentation a diminué la proportion des granulats (G8/15).

3.3.2.1.2. La consistance plastique (affaissement =8cm et E/C=0.51)

Les proportions des granulats (ciment, sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/15) pour les mélanges du béton en fonction de la correction de sable et pour un dosage de ciment ($C=355 \text{ kg/m}^3$), sont présentées dans le tableau 3.10.

Tableau 3.10. Proportions des constituants des bétons plastiques témoins en fonction des sables de dunes ($C=355 \text{ kg/m}^3$)

Bétons	Proportions des constituants				
	C	SD	SC	G 3/8	G 8/15
BP-0.51-100%	1	1.57	0.00	0.74	2.69
BP-0.51-80%	1	1.50	0.37	0.60	2.54
BP-0.51-60%	1	1.15	0.77	0.59	2.49
BP-0.51-40%	1	0.82	1.24	0.58	2.23

D'après ces proportions des mélanges nous remarquons que :

- Le granulat (3/8) n'a pas beaucoup changé en proportion.
- Sa proportion est toujours inférieure à celle de ciment.
- Les proportions de SDC (SD+SC) et de granulats (8/15) toujours supérieures à celle de ciment.
- Le granulat (8/15) présente toujours la plus grande proportion par rapport aux autres constituants.

3.3.2.2. Bétons avec superplastifiant

Dans certains chantiers, on utilise des adjuvants et même des produits de cure pour protéger le béton. En effet, plusieurs études se sont intéressées à l'incorporation des adjuvants dans le béton [19, 20, 21, 22, 23].

Tous les bétons élaborés avec les mêmes paramètres donnés auparavant ont été confectionnés en introduisant un superplastifiant à un pourcentage de (0,5%), sont indiqués dans le tableau ci-dessous et qui a présenté un E/C plus bas pour cause d'introduction de superplastifiant. La composition de chaque type de béton est indiquée au tableau 3.11 pour les bétons très plastiques, et au tableau 3.12 pour les bétons plastiques.

3.3.2.2.1. La consistance très plastique (affaissement =12cm et E/C=0.51)

Les proportions des granulats (ciment, sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/15) pour les mélanges du béton en fonction de la correction de sable et pour un dosage de ciment ($C=350 \text{ kg/m}^3$), sont présentées dans le tableau 3.11.

Tableau 3.11. Proportions des constituants des bétons très plastiques avec superplastifiant en fonction des sables de dunes ($C=350 \text{ kg/m}^3$)

Bétons	Proportions des constituants				
	C	SD	SC	G 3/8	G 8/15
BTPA-0.51-100%	1	1.61	0.00	0.79	2.58
BTPA-0.51-80%	1	1.53	0.38	0.64	2.43
BTPA-0.51-60%	1	1.18	0.78	0.64	2.38
BTPA-0.51-40%	1	0.86	1.30	0.64	2.18

Les valeurs montrées au tableau ci-dessus, montrent que :

- Les proportions des sables corrigés sont supérieures à celle de ciment.
- Le granulat (3/8) présente des proportions identiques après l'ajout de 20% du sable concassé.
- Le granulat (8/15) sont toujours nettement supérieures à celle de ciment, malgré l'introduction du sable concassé.

3.3.2.2. La consistance plastique (affaissement =8cm et E/C=0.48)

Les proportions des constituants (ciment, sable corrigé, gravier 3/8 et gravier 8/15) pour les mélanges du béton en fonction de la correction de sable et pour un dosage de ciment ($C=350 \text{ kg/m}^3$), sont présentées dans le tableau 3.12.

Tableau 3.12. Proportions des constituants des bétons plastiques avec superplastifiant en fonction des sables de dunes ($C=350 \text{ kg/m}^3$)

Bétons	Proportions des constituants				
	C	SD	SC	G 3/8	G 8/15
BPA-0.48-100%	1	1.60	0.00	0.76	2.74
BPA-0.48-80%	1	1.53	0.38	0.61	2.59
BPA-0.48-60%	1	1.17	0.78	0.61	2.54
BPA-0.48-40%	1	0.84	1.26	0.64	2.33

Dans le tableau 3.12, nous avons remarqué ce qui suit :

- L'introduction en croissance de sable concassé a augmenté considérablement la proportion du sable corrigé.
- Inversement proportionnel, l'introduction de sable concassé dans le sable corrigé a fait décroître la proportion de granulats (8/15).
- Le granulats (3/8) n'a pas changé beaucoup en proportion.
- Le granulats (3/8) est la seul qui reste toujours inférieure à celle de ciment.

3.3.2.3. Propriétés des bétons frais

Il est important de connaître les propriétés du béton à l'état frais avant son durcissement. Parmi ces propriétés, la consistance qui peut se définir comme étant la facilité de mise en œuvre des bétons. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams, selon la norme algérienne NA 5102 [150], est actuellement en usage dans le monde entier ; il fournit des mesures fiables (figure 3.9).



Figure 3.9. Mesure de l'affaissement du béton au cône d'Abrams.

3.3.2.3.1. Confection des éprouvettes

Dans cette partie, nous présentons la méthodologie suivie, après la détermination des quantités de chaque mélange de chaque type de béton.

3.3.2.3.1.1. Types de moules

Les éprouvettes ont été confectionnées conformément aux normes en vigueur [151], elles sont de forme cubique ($15 \times 15 \times 15$) cm³, remplies en béton après malaxage et mesure de la consistance du béton frais.

3.3.2.3.1.2. Mise en place du béton

Les moules ont été remplis en béton après malaxage à sec et après introduction de l'eau de gâchage par quantités successives, et après mesure de la consistance du béton frais suivant la norme [152].

3.3.2.3.1.3. Mode de conservation des éprouvettes

Conservation avant démoulage :

Les éprouvettes ont été conservées dans le laboratoire à une température de $25 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ [153] pour une période de 24 heures, sans être déplacées, et cela pour les protéger contre tout accident imprévu. Nous les avons identifiées par type de béton et en inscrivant la date de mise en place du béton (figure 3.10).



Figure 3.10. Éprouvette avant démoulage.

Conservation après démoulage :

En tenant compte de la forme cubique des moules, la méthode la plus adéquate pour démoulage s'effectue à l'aide d'une forte pression de l'air introduit dans un trou inférieur, des moules, réservé à cette opération de démoulage. Puis nous identifions les éprouvettes par type de béton, date de coulage et par mode de conservation qu'elles vont subir (figure 3.11).

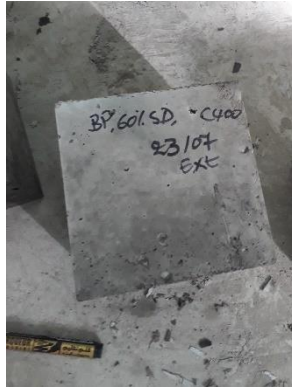


Figure 3.11. Éprouvette après démoulage.

Chaque type de béton est mis en place dans six éprouvettes, pour avoir deux modes de conservation, l'un à l'air libre à l'intérieur du laboratoire et l'autre à l'extérieur exposé au climat aride.

3.3.2.4. Propriété du béton à l'état durci

La résistance à la compression est considérée comme la plus importante propriété du béton durci. L'ensemble des éprouvettes sont conservées dans leur milieu correspondant pour une durée de 28 jours avant les essais d'écrasement.



Figure 3.12. Éprouvette après écrasement.

Les bétons ont été soumis à des essais d'écrasement conforme à la norme NA 427 [154] (figure 3.12), pour la détermination des résistances à la compression à 28 jours, chaque série comprend trois échantillons. Cette résistance reflète une idée sur la qualité du béton durci.

3.4. Méthode et procédure d'essai

3.4.1. Méthode d'essai (ASTM C1579)

Afin d'étudier le potentiel de fissuration par retrait plastique dans les bétons, nous avons élaboré plusieurs séries d'essais sur des dallâtes des différents types des bétons et modes de conservations pour pouvoir l'examiner. Chaque série de trois dallâtes est soumise à deux modes de conservations l'un à l'intérieur du laboratoire et l'autre à l'extérieur.

La fissuration, selon la norme ASTM C 1579 [155], se produit généralement au milieu des éprouvettes ou se trouve la grand forme triangulaire métallique [118] (figure 3.13). Parmi les méthodes d'atténuation des fissures qui ont été étudiées par certains chercheurs, nous avons constaté celle relative à l'introduction des adjuvants dans les bétons, qui ont amélioré beaucoup leurs propriétés [156].

Ces types adjuvants réduisent la tension superficielle de l'eau dans le béton, ce qui réduit, par conséquent, l'évaporation de l'eau, le tassement du béton frais et les pressions capillaires. Ce sont les effets principaux de réduction du retrait plastique [16-17]. Par ailleurs, les produits de cure utilisés dans les chantiers peuvent aussi être efficaces en empêchant la perte rapide d'eau du béton. Nous avons donc choisi d'étudier les bétons contenant des adjuvants similaires à ceux utilisés dans les chantiers de la région, pour pouvoir comparer les résultats obtenus.

Après avoir déterminé les différents pourcentages et quantités des constituants de nos bétons, nous procédons aux coulages de petites dalles « dallâtes » confectionnées selon la norme ASTM 1579 [155].

Etant donné que de nombreux paramètres tels que la granulométrie, les procédures de formulation du béton, l'affaissement, la température du béton, peuvent également influencer la fissuration potentielle, nous avons veillé à ce que ces paramètres soient les plus identiques possible.

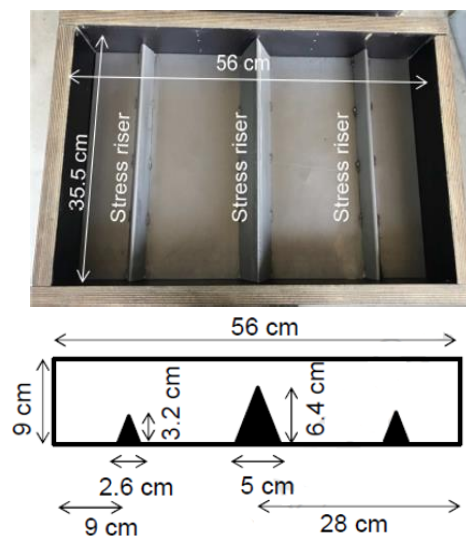


Figure 3.13. Moule de béton des dallâtes suivant la norme ASTM C1579 [155]

L'indicateur de température a mesuré des valeurs de $25\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ à l'intérieur du laboratoire. Ces conditions climatiques généralement rencontrées en période estivale, lors de la mise en place d'un béton exposé, contribuent à sa perte rapide d'eau, ce qui engendre l'apparition de faïençage et de fissuration, et particulièrement dans les périodes de prise et de début de durcissement du béton.

Nous avons introduit les superplastifiants pendant le malaxage du béton à raison de 0,5% de la masse de ciment du béton suivant la norme EN 934-2/A2 [158].

Aussi, nous avons appliqué, par pulvérisation à la surface du béton frais, le produit de cure conformément à la norme NF P 18-370 [146]. Dans certains cas, ce produit de cure est obligatoire (norme NF EN 13670) [159].

3.4.2. Procédures d'essai à base de la méthode de formulation « Faury »

Pour tous les mélanges préparés indiqués aux tableaux 3.7 et 3.8, nous avons adopté trois séries d'éprouvettes (figure 3.13), chaque série contient six dallâtes, trois conservées à l'air libre, à l'extérieur du laboratoire et trois autres conservées à l'intérieur. Les différents bétons élaborés étudiés sont illustrés dans la figure 3.14 :

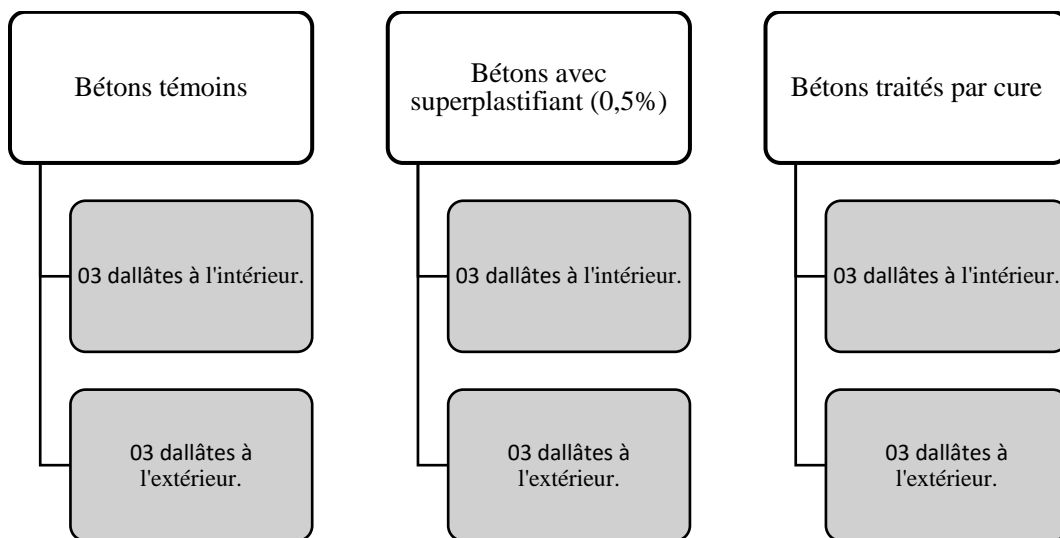


Figure 3.14. Les types de bétons étudiés élaborés par la méthode de Faury.

Nous avons confectionné des moules selon la norme ASTM C1579 (figure 3.15), puis nous avons préparé nos bétons selon la méthode de Faury [160].



(a) Béton témoin



(b) Béton avec superplastifiant



(c) Béton traité par cure

Figure 3.15. Différents types des bétons élaborés selon la norme ASTM C1579.

A l'état frais, nous avons contrôlé la consistance du béton, en mesurant l'affaissement au cône d'Abrams. A l'état durci, nous avons surveillé le début et le développement des fissures des éprouvettes de bétons à l'intérieur de laboratoire comme à l'extérieur.

3.4.3. Procédures d'essai à base de la méthode de formulation « Dreux-Gorisse »

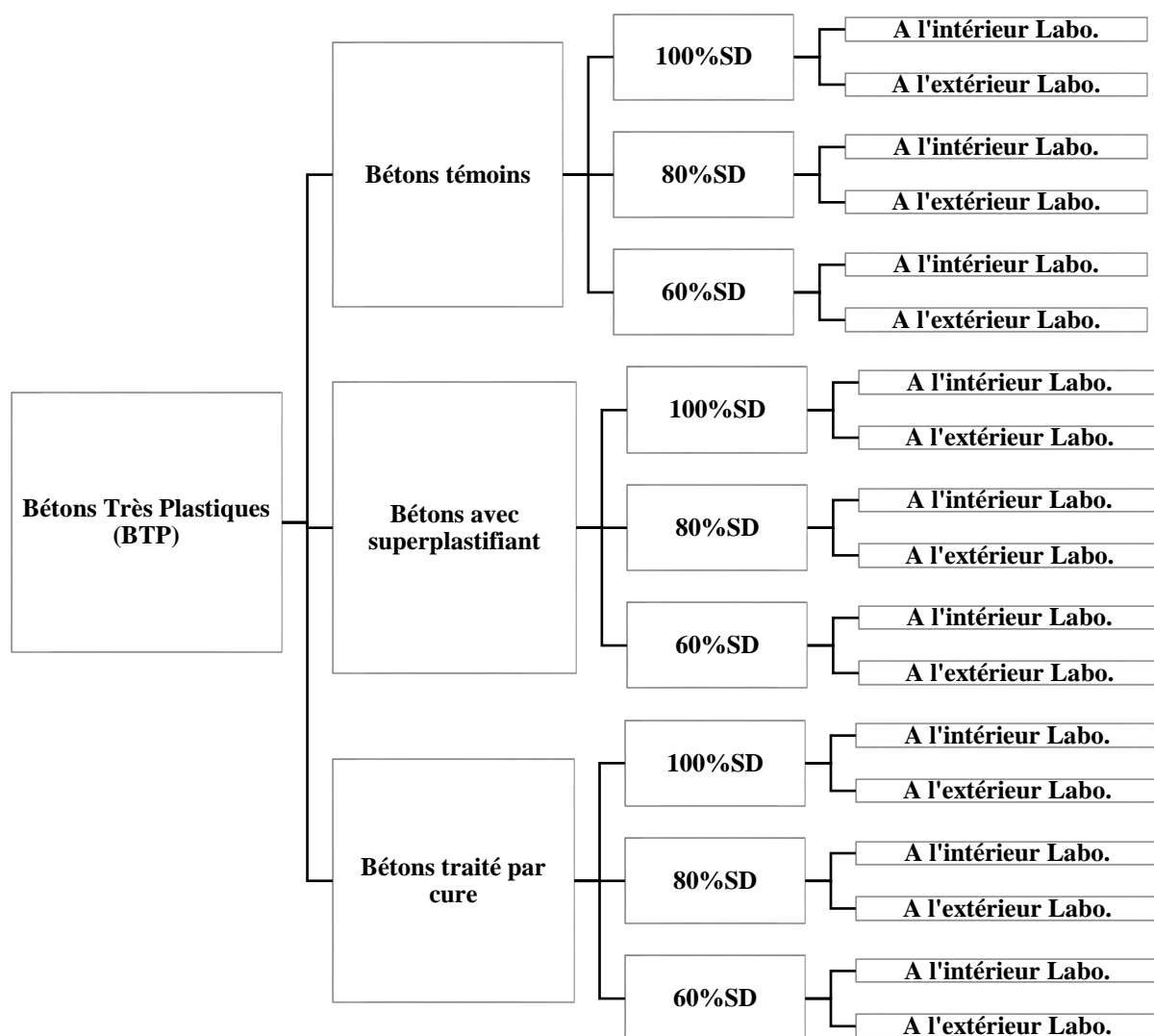


Figure 3.16. Les différents types des bétons très plastiques étudiés.

Les bétons à étudier vis-à-vis de la fissuration et de son développement par cette méthode sont ceux qui donnent les bons résultats dans l'alinéa 4.3.1. « Optimisation de la formulation » par la méthode Dreux-Gorisse (résultats présentés au chapitre 04).

Pour étudier l'influence du climat aride, nous sommes obligés de mettre les dallâtes exposés directement au climat de la région, c'est-à-dire à l'extérieur de laboratoire. Nous avons aussi et à titre de comparaison conservé l'équivalent de dallâtes à l'intérieur de laboratoire.

Pour les bétons très plastiques, l'organigramme (figure 3.16) montre les différents bétons étudiés avec ce type de consistance.

Et pour les bétons élaborés à consistance plastique, l'organigramme (figure 3.17) ci-après indique les différents bétons étudiés en fonction des deux modes de conservations.

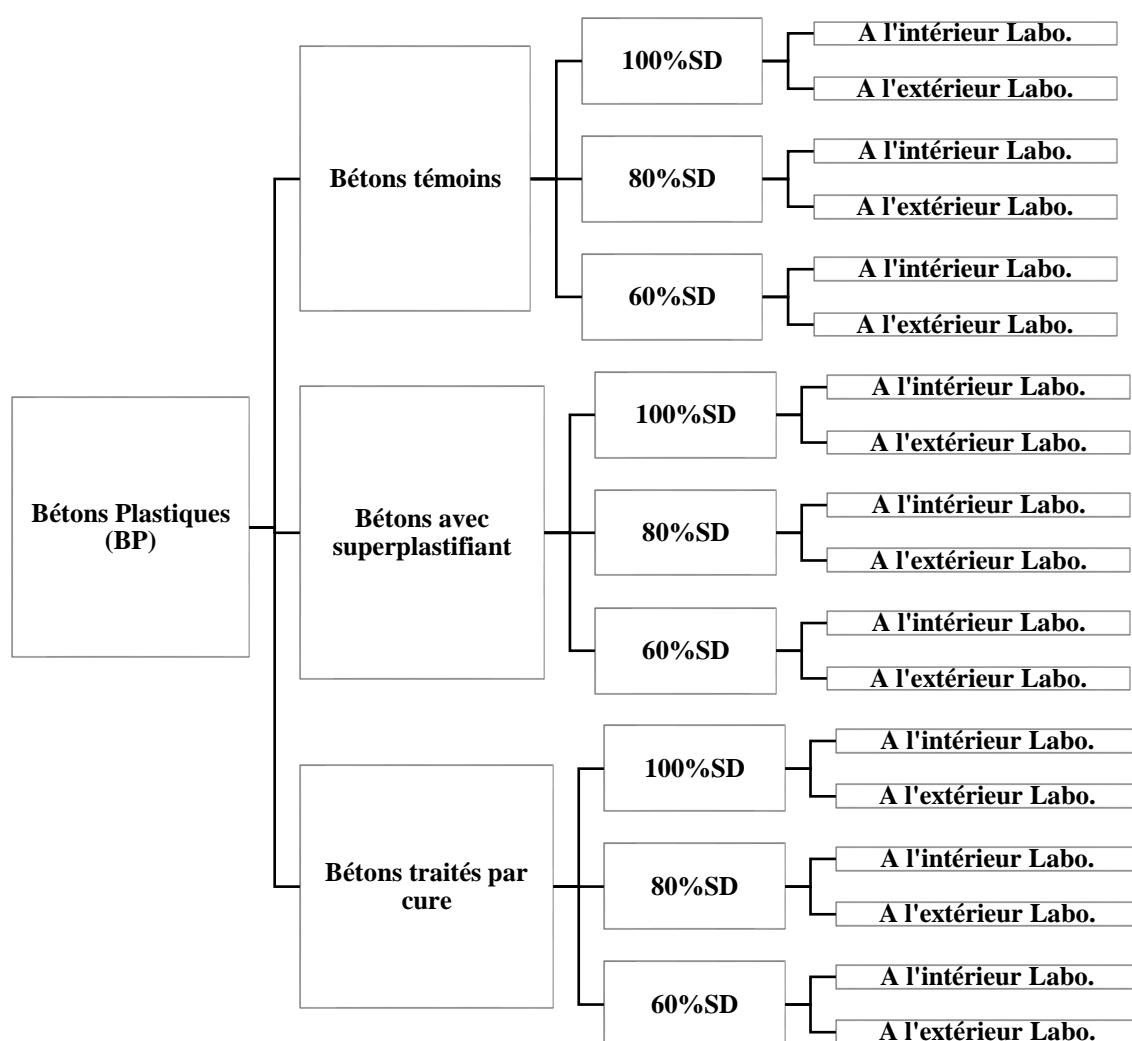


Figure 3.17. Les différents types des bétons plastiques étudiés.

Afin de mieux suivre l'état des bétons dès leur coulage instant par instant, nous avons opté par l'installation des caméras et nous avons surveillé le début et le développement des fissures à l'intérieur de laboratoire comme à l'extérieur.



Figure 3.18. Mesure de la fissuration dans les dallâtes à l'aide des caméras.

Des caméras de surveillance perpendiculaires distinctes, pour les six dallâtes (trois à l'intérieur et trois à l'extérieur) pour le même type de béton (figure 3.18), pour justifier une meilleure lecture des résultats.

3.5. Conclusion

Nous avons développé dans ce chapitre la caractérisation sur les matériaux utilisées dans notre travail ainsi que la méthodologie suivie et les normes appliquées. Les principaux points à retenir de ce chapitre sont comme suit :

- L'utilisation du sable de dunes seul sans correction laisse une discontinuité granulaire dans le mélange étudié. Le sable de dunes possède une granularité très serrée.
- Le sable de dunes utilisé est très propre mais son module de finesse n'est pas conforme à ce que la norme exige.
- Le sable concassé peut assurer la continuité granulaire. Néanmoins, il contient une grande quantité de fines,
- Cette grande quantité de fines influe, par conséquent sur la consistance du béton frais,
- L'introduction du sable concassé augmente considérablement sa proportion par rapport au ciment. Ce qui diminue la proportion des granulats (G8/15).
- Les proportions du sable corrigé et des granulats (8/15) restent toujours supérieures à celle de ciment.
- Les granulats (8/15) présentent toujours la plus grande proportion par rapport aux autres constituants.
- Inversement proportionnelle, l'introduction du sable concassé a fait décroître la proportion de granulats (8/15).
- Généralement, le granulat (3/8) n'a pas beaucoup changé de proportion, même après l'introduction du sable concassé dans la formulation.

Les méthodes expérimentales suivies nous permettent d'analyser les résultats afin d'évaluer l'influence des formulations du béton sur sa résistance à la compression à travers :

- La variation de sa consistance,
- La proportion de sable concassé introduit,
- L'ajout de superplastifiant dans les bétons étudiés.

Cet effet sera mis en évidence dans le chapitre quatre.

Nous étudierons ensuite les bétons vis-à-vis la fissuration, soit par la méthode utilisés dans les chantiers local de « Faury », soit celles sélectionnés avec la méthode Dreux-Gorisse et l'effet du climat sec à travers les modes de conservation retenus, le tout en utilisant les meilleurs types des bétons ainsi que le béton témoin, à partir des résultats décrits au chapitre 04.

Chapitre 4 :

Résultats expérimentaux et interprétations

4.1. Introduction

Dans la 1^{ère} partie expérimentale (chapitre 3), nous avons effectué l'identification physico-mécanique et chimique des matériaux locaux incorporés dans les mélanges des bétons étudiés. Nous avons ensuite présenté les courbes granulométriques obtenues et les différentes proportions des constituants des bétons.

L'élaboration des mélanges de béton en laboratoire a été basée sur la méthode de Faury. Les éprouvettes d'essai ont été exposées au climat d'été ($T > 48^{\circ}\text{C}$, HR très faible).

La reformulation des bétons par la méthode de Dreux-Gorisse et l'introduction de sable concassé à différents pourcentages a permis de corriger les courbes granulaires des bétons. Ce qui a modifié, par conséquent, les propriétés des bétons étudiés.

Etant donné le climat aride de cette région (très agressif en été), l'utilisation d'un superplastifiant a été jugée nécessaire pour améliorer les caractéristiques rhéologiques et même mécaniques des bétons. Le programme du présent chapitre comporte trois parties :

1. Formulation des bétons témoins, avec superplastifiant puis traités par la cure, opération répétée avec deux modes de conservation (méthode Faury la plus utilisée dans les chantiers locaux).
2. Correction des agrégats avec du sable de dunes, et en introduisant un superplastifiant (méthode Dreux-Gorisse à titre comparatif).
3. Choix des bétons qui donnent les meilleurs résultats des points de vue consistance et résistance et analyse expérimentale vis-à-vis de la fissuration (formulation de Dreux-Gorisse).

4.2. Résultats selon la méthode de Faury

4.2.1. Variation de la température

Nous avons mesuré la température du béton frais à l'aide d'un thermomètre de béton (photo 4.1).

Les valeurs obtenues dans les trois bétons sont illustrées dans l'histogramme de la figure 4.1.

La température du béton frais, pour le béton témoin est de 37°C , elle est la même pour le béton traité par la cure, tandis que pour le béton avec superplastifiant, l'indicateur enregistre 36°C .



Photo 4.1. Mesure de température du béton frais

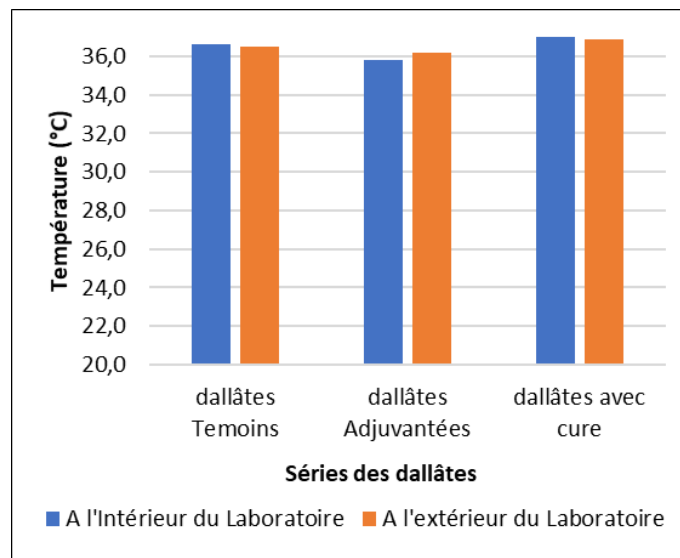


Figure 4.1. Variation de température du béton frais des différents dallâtes

4.2.2. Affaissement du béton

A l'aide du cône d'Abrams (norme NF P18-451) [161], nous avons mesuré l'affaissement du béton.

Nous avons procédé à des gâchages de béton de telle sorte que l'ouvrabilité soit maintenue constante, à consistance plastique [162]. La valeur de l'affaissement au cône d'Abrams pour tous les bétons est donnée par la figure 4.2.

Les affaissements obtenus pour les trois types de bétons sont divisés en deux classes, la première est celle des bétons témoins et des bétons traités par la cure et la deuxième est celle du béton contenant le superplastifiant.

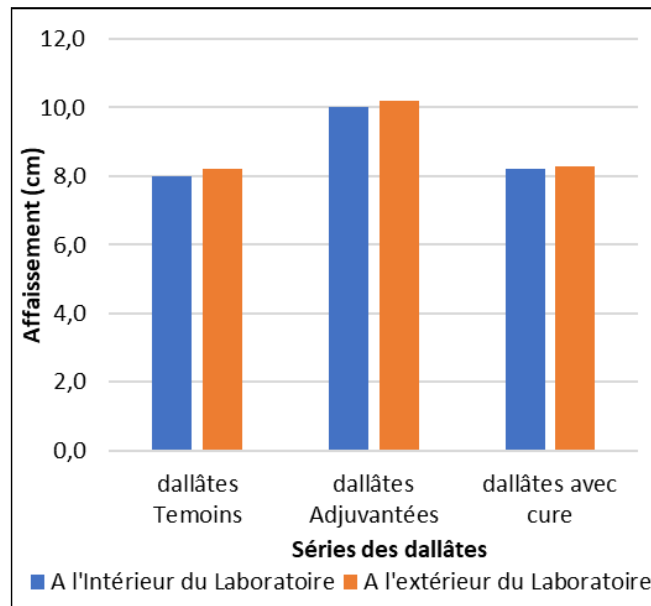


Figure 4.2. Variation de l'affaissement des différents types de bétons

Les dallâtes témoins et celles concernées par la cure présentent un affaissement de 8 cm en moyenne, il correspond donc à un béton plastique.

Les dallâtes contenant le superplastifiant enregistrent un affaissement d'environ 10 cm, c'est donc une consistance d'un béton très plastique.

4.2.3. Dallâtes et progression des fissures

Nous avons confectionné trois types de bétons pour deux séries de conservation, une conservation à l'intérieur du laboratoire et l'autre à l'extérieur. Par mesure de simplification, des appellations ont été données aux différentes dallâtes suivantes :

DTE : béton témoin, dallâtes conservées à l'extérieur du laboratoire.

DTI : béton témoin, dallâtes conservées à l'intérieur du laboratoire.

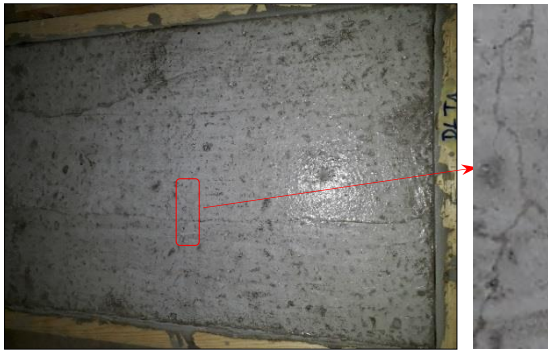
DAE : béton avec superplastifiant, dallâtes conservées à l'extérieur du laboratoire.

DAI : béton avec superplastifiant, dallâtes conservées à l'intérieur du laboratoire.

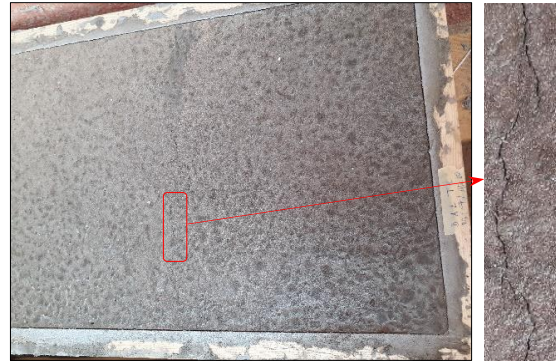
DCE : béton traité par la cure, dallâtes conservées à l'extérieur du laboratoire.

DCI : béton traité par la cure, dallâtes conservées à l'intérieur du laboratoire.

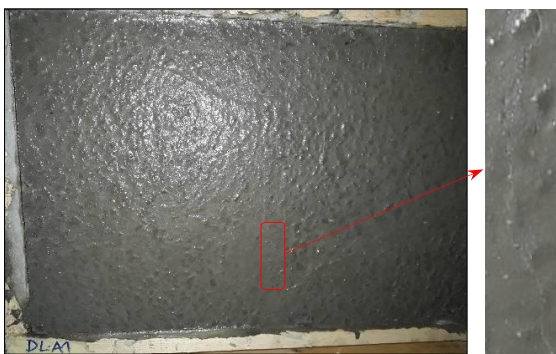
Après chaque coulage des dallâtes, on suit l'évolution des fissures, leurs développements en longueur et en largeur dès leurs premières apparitions (photo 4.3). Ces progressions sont données sous formes de graphes pour mieux interpréter les résultats (figure 4.3).



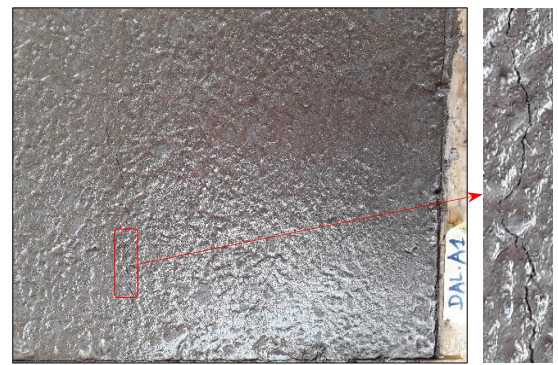
a. Fissures des dallâtes témoins conservées à l'extérieur du laboratoire



b. Fissures sur dallâtes témoins conservées à l'intérieur du laboratoire



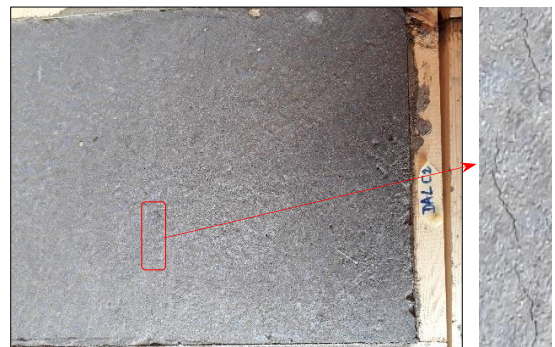
c. Fissures sur dallâtes avec superplastifiant conservées à l'extérieur du laboratoire



d. Fissures sur dallâtes avec superplastifiant conservées à l'intérieur du laboratoire



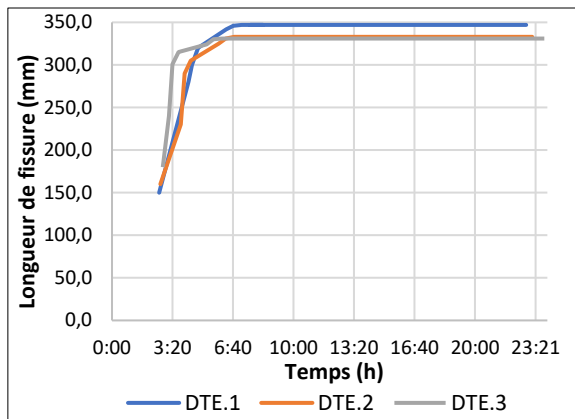
e. Fissures sur dallâtes traitées avec la cure conservées à l'extérieur du laboratoire



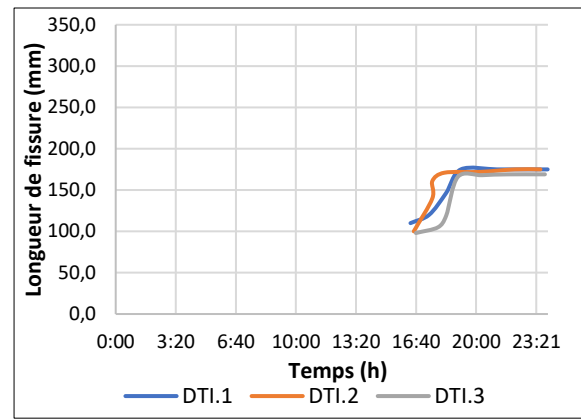
f. Fissures sur dallâtes traitées avec la cure conservées à l'intérieur du laboratoire

Photo 4.2. Fissurations des différentes dallâtes exposées à l'extérieur et à l'intérieur du laboratoire

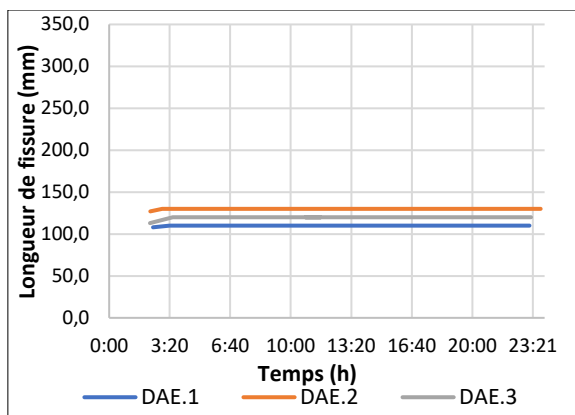
Selon la figure 4.3.a, nous avons constaté qu'après la deuxième heure, les fissures sont déclenchées d'une façon remarquable, au milieu des dallâtes, et pour les trois dallâtes, avec des longueurs de fissures importantes (10 à 20cm).



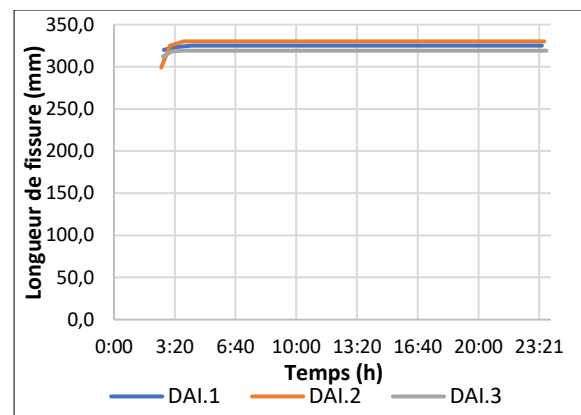
a. Evolution des fissures sur dallâtes témoins conservées à l'extérieur du laboratoire



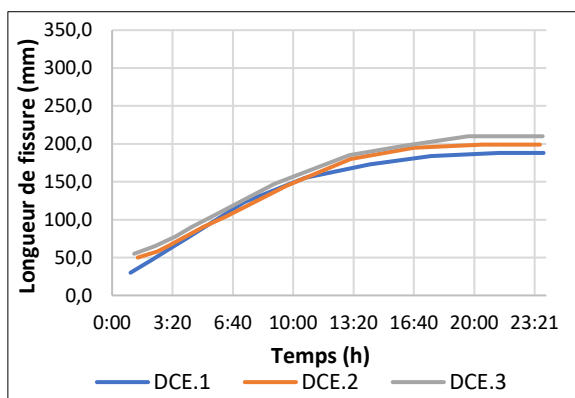
b. Evolution des fissures sur dallâtes témoins conservées à l'intérieur du laboratoire



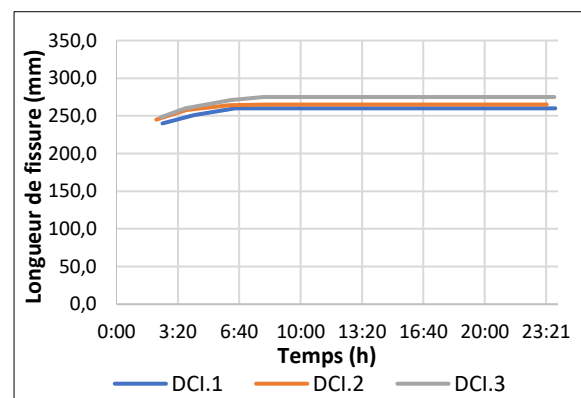
c. Evolution des fissures sur dallâtes avec superplastifiant à l'extérieur du laboratoire



d. Evolution des fissures sur dallâtes avec superplastifiant à l'intérieur du laboratoire



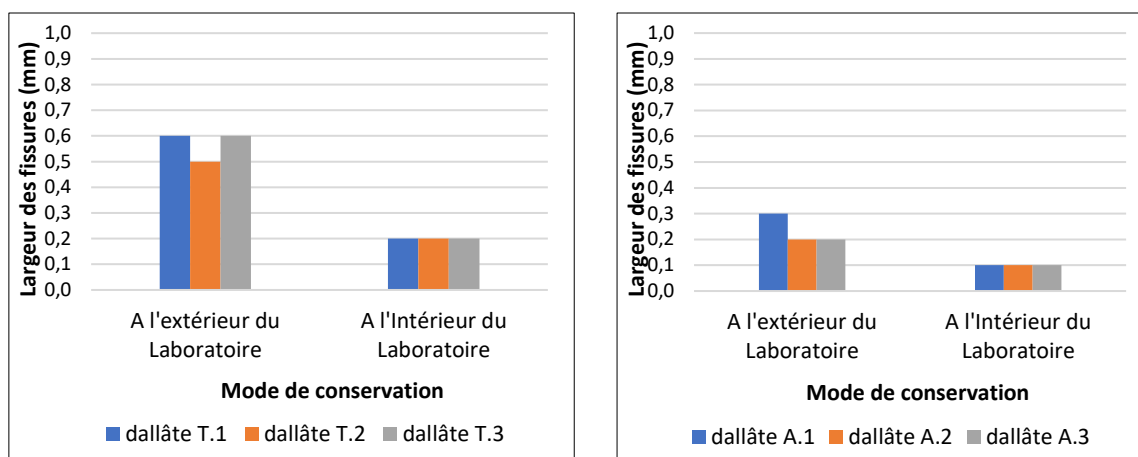
e. Évolution des fissures sur dallâtes avec cure conservées à l'extérieur du laboratoire



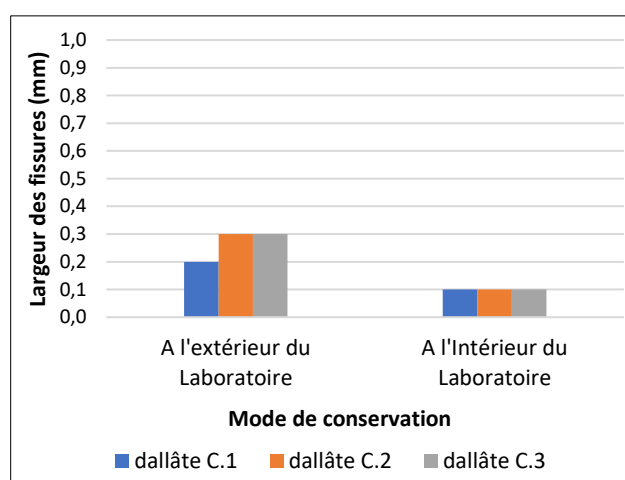
f. Évolution des fissures sur dallâtes avec cure conservées à l'intérieur du laboratoire

Figure 4.3. Courbes d'évolution des longueurs des fissures des différentes dallâtes

Après deux heures environ, cette longueur de fissure augmente d'environ 10cm pour toutes les dallâtes. Après cinq heures du coulage, ces valeurs ont augmenté pour se stabiliser autour de 33cm, et avec une largeur d'épaisseur atteignant 0,6 mm (figure 4.4.a).



a. Largeur des fissures sur dallâtes témoins b. Largeur des fissures, dallâtes avec superplastifiant



c. Largeur des fissures sur dallâtes avec la cure

Figure 4.4. Histogrammes des valeurs de largeur des fissures sur les différentes dallâtes

Les dallâtes témoins conservées à l'intérieur du laboratoire et à l'abri du soleil et du vent (figure 4.3.b), présentent la même allure de progression dans le temps. Cependant, le déclenchement des fissures n'a été enregistré qu'après la seizième heure, et à la dix-neuvième heure, c'est l'arrêt total de progression des ces fissures, atteignant une longueur moyenne de 17cm, c'est 50% par rapport à l'extérieur. La progression n'a duré que trois heures seulement. La longueur de ces fissures est nettement inférieure à celle des dallâtes conservées à l'extérieur du laboratoire. Leurs largeurs n'ont pas dépassé 0,2mm (figure 4.4.a), donc trois fois moins que celles conservées à l'extérieur du laboratoire. Cette différence en largeur a montré clairement l'effet non négligeable du climat dans cette région par l'évaporation rapide de l'eau.

Pour les bétons contenant un superplastifiant et pour les trois dallâtes coulées et exposées à l'air libre à l'extérieur du laboratoire (figure 4.3.c), la courbe représentant l'apparition des fissures se déclenche à partir de la troisième heure, la longueur des fissures est restée constante dans toutes les dallâtes durant toute la période d'observation. Les longueurs

enregistrées des fissures varient de 12 à 14cm qui représente plus de 60% moins des dallâtes témoins. Nous avons constaté aussi que la largeur des fissures est estimée à 0,2mm, elle est inférieure à celles des bétons témoins, c'est sans faute à cause de l'effet de superplastifiant.

L'apparition des fissures sur les dallâtes avec superplastifiant et conservées au laboratoire (figure 4.3.d), d'après l'allure de progression des fissures, est presque la même, avec une valeur moyenne de 32cm de longueur. Après trois heures de coulage, nous enregistrons un arrêt total de cette progression des fissures dans toutes les dallâtes ; la largeur de la fissure est inférieure à celle des dallâtes conservées à l'extérieur du laboratoire (figure 4.4.b), elle n'a pas dépassé 0,1mm, l'effet du climat est donc bien clair.

Les résultats des bétons en extérieurs traités par la cure sont représentés dans la figure 4.3.e, où des petites fissures sont apparues dès la première heure. Sous l'effet de cure, qui a empêché l'évaporation rapide de l'eau dans le béton, l'évolution de fissuration est lente jusqu'à la seizième heure de durcissement. La longueur de la fissuration a évolué de 5 cm jusqu'à 20 cm environ, et avec une largeur de la fissuration variant entre 0,2 et 0,3mm, ce qui représente une valeur inférieure à la moitié de celle des dallâtes témoins (sans traitement de cure).

Pour les dallâtes traitées par la cure et conservés à l'intérieur du laboratoire, il y a apparition des fissures dès les deux premières heures (figure 4.3.f), de longueur constante autour de 26cm. Cette fissure n'a pas dépassé 0,1 mm de largeur (figure 4.4.c). L'effet de cure a contribué dans la conservation de l'eau de gâchage dans le béton.

D'après les résultats obtenus présentés précédemment dans les figures (4.3.a, 4.3.b, 4.3.c, 4.3.d, 4.3.e et 4.3.f), l'apparition de fissures et son développement sont illustrés au tableau suivant :

Tableau 4.1. L'apparition des fissures et son développement à l'intérieur et à l'extérieur du laboratoire.

Dallâtes	Début moyen de fissures (h)	Longueur moyenne initiale de fissures (mm)	Longueur moyenne finale de fissures à (mm)	Largeur moyenne de fissures (mm)
DTE	2:41	163,3	337,0	0,57
DTI	16:32	102,7	173,0	0,20
DAE	2:18	116,0	120,0	0,23
DAI	2:41	310,0	324,7	0,10
DCE	1:13	45,0	199,0	0,24
DCI	2:21	244,3	266,7	0,10

L'analyse des valeurs de tableau 4.1, en comparant ces résultats expérimentaux entre les dallâtes intérieures et extérieures, montre que la première apparition de fissures est toujours dans les dallâtes qui sont à l'extérieur de laboratoire (DTE, DAE et DCE). Ce constat est aussi vérifié pour les longueurs des fissures mais aussi leurs largeurs. Ceci nous montre clairement l'effet de la température caractérisant cette région aride. Aussi le développement des fissures

dans le temps est plus rapide et plus important pour les dallâtes conservées à l'extérieur du laboratoire par rapport à celles conservées à l'intérieur.

Par conséquent, l'apparition des fissures dans ce climat à faible taux d'humidité et à température élevée peut se déclencher à partir de la deuxième heure après de coulage, son évolution est très rapide. Cependant, l'ajout de superplastifiant qui réduit la tension superficielle de l'eau dans le béton, ou de moindre effet le traitement avec la cure qui empêche l'évaporation d'eau du béton, ont réduit considérablement le retrait plastique. Ce phénomène ralenti l'apparition des fissures et diminue leur vitesse de développement. Les longueurs des fissures ainsi que leurs largeurs ont systématiquement diminué.

4.3. Résultats suivant la méthode de Dreux-Gorisse

4.3.1. Optimisation de la formulation

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

A partir des courbes granulométriques de la figure 3.6, nous déduisons les pourcentages de chaque constituant, leurs proportions dans le béton sont reportées dans les tableaux 3.9 à 3.11. Les conditions climatiques défavorables (HR très bas et T° très élevée), rencontrées lors de la mise en place du béton, contribuent à sa perte rapide en eau.

Chaque type de consistances du béton, très plastique et plastique, est reproduite en fonction de quatre taux de sable de dunes ; 100%, 80%, 60% et 40%. Nous avons introduit dans chaque béton le superplastifiant. Au total, nous avons obtenu trente-deux types de bétons à étudier ; seize conservés à l'intérieur du laboratoire et seize à l'extérieur.

4.3.1.1. Consistance des bétons

L'influence de la quantité de sable de dunes et de l'ajout d'un superplastifiant sur les propriétés rhéologiques des bétons confectionnés est étudiée par la mesure de l'affaissement. Les valeurs trouvées sont présentées ci-dessous.

4.3.1.1.1. Bétons témoins

4.3.1.1.1.1. Consistance très plastique

Nous remarquons pour les résultats des bétons très plastiques témoins (figure 4.5) que :

- Le seul béton qui a affiché l'affaissement souhaité (théorique) de 12cm, c'est le type qui ne contient que du sable de dunes,
- L'ajout de sable concassé à des taux de 20% et 40% avec 80% et 60% sable de dunes dans le béton a donné un affaissement toujours plastique avec une valeur très proche de 11cm,
- Pour un béton contenant 60% de sable concassé et 40% de sable de dunes, l'affaissement a enregistré de justesse un béton très plastique, et ce à cause de la quantité élevée des fines que contient le sable concassé.

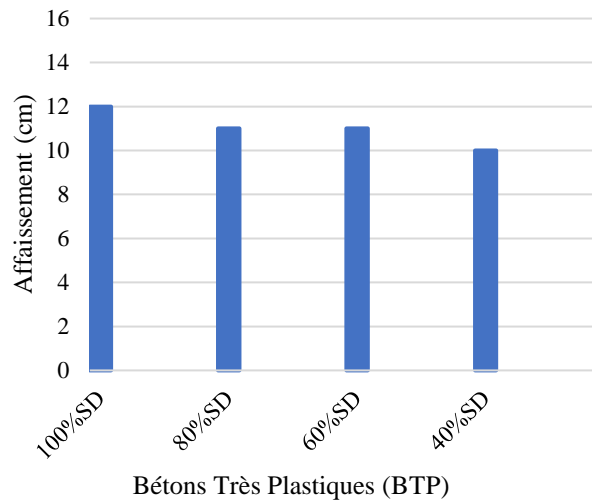


Figure 4.5. Variation de l'affaissement des bétons très plastiques en fonction du pourcentage de sable de dunes.

4.3.1.1.2. Consistance plastique

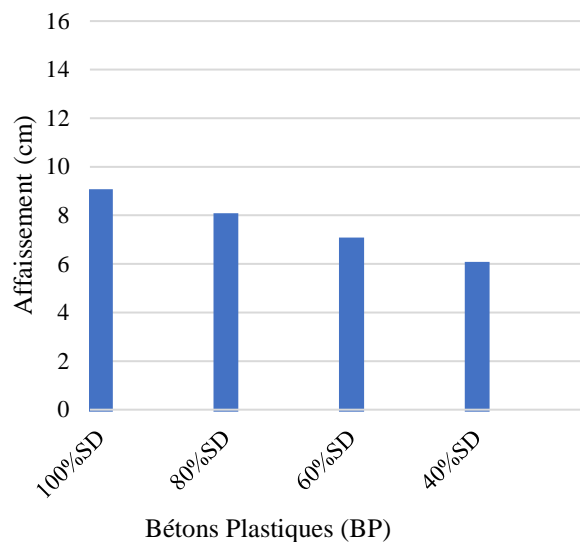


Figure 4.6. Variation de l'affaissement des bétons plastiques en fonction du pourcentage de sable de dunes.

D'après la figure 4.6, il est apparu clairement que :

- La réduction de la quantité d'eau dans le béton plastique par rapport au béton très plastique a un effet sur l'affaissement en réduisant,
- Aussi la consistance de béton qui contient 60% de sable concassé et 40% de sable de dunes, s'éloigne de la consistance désirée, elle a tendance à créer un état de consistance ferme ($A=6\text{cm}$).
- Il y a donc une relation proportionnelle entre la teneur en sable de dunes et l'affaissement.

4.3.1.1.2. Béton avec superplastifiant

4.3.1.1.2.1. Consistance très plastique

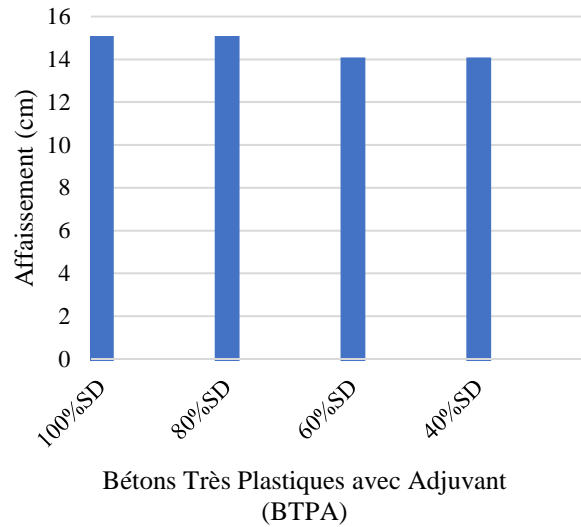


Figure 4.7. Variation de l'affaissement des bétons très plastiques avec superplastifiant en fonction du pourcentage de sable de dunes.

L'histogramme de la figure 4.7 conduit à conclure que :

- L'effet d'amélioration de la fluidité du mélange avec superplastifiants était très évident dans ce type de consistance.
- L'affaissement est pratiquement identique pour deux pourcentages de sables dans deux bétons ; béton avec 100%SD et 80%SD de 15cm et béton avec 60%SD et 40%SD de 14cm,
- L'effet d'augmentation de la fluidité par le superplastifiant se manifeste dans la stabilité de la valeur de la consistance de 15cm pour des bétons contenant 100%SD jusqu'à 60%SD.
- La diminution de l'affaissement pour les bétons à pourcentages 60% et 40% SD est due aux quantités d'eau absorbées par les éléments fins contenant le sable concassé de pourcentage de 40% et 60%.

4.3.1.1.2.2. Consistance plastique

Nous constatons dans la figure 4.8 que :

- Tous les bétons présentent le même affaissement de 8cm, identique à celui calculé théoriquement,
- Malgré la diminution de 6% de quantité de l'eau de gâchage sous l'effet du superplastifiant, les valeurs d'affaissement sont nettement supérieures à celles des bétons témoins.
- L'effet du superplastifiant a donc pu surmonter l'absorption d'eau par les éléments fins des sables.

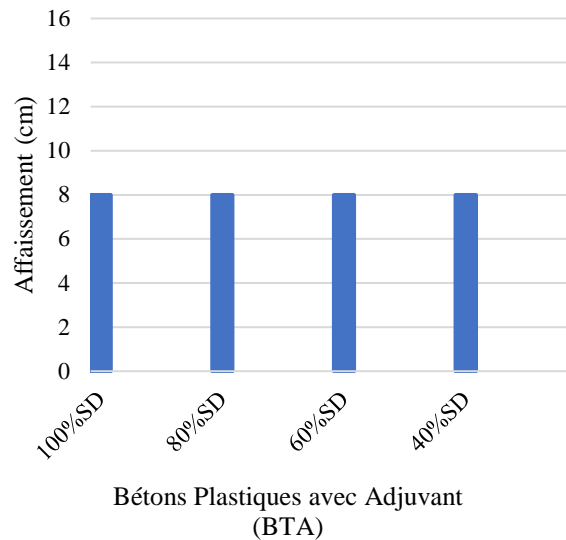


Figure 4.8. Variation de l'affaissement des bétons plastiques avec superplastifiant en fonction du pourcentage de sable de dunes.

4.3.1.2. Résistance des bétons

Les bétons ont été soumis à des essais d'écrasement pour la détermination des résistances à la compression à 28 jours, chaque type de béton est confectionné en six éprouvettes. Les éprouvettes ont été exposées à deux modes de conservation, à l'intérieur du laboratoire à température 30 ± 5 °C et à l'extérieur, à l'aire libre (climat aride) de température 45 ± 5 °C.

4.3.1.2.1. Bétons témoins

4.3.1.2.1.1. Consistance très plastique

Il a été constaté dans les résultats de la résistance à la compression indiqués dans la figure 4.9, que :

- En augmentant la quantité de sable concassé, une croissance de la résistance de 26 MPa à 32 MPa (environ 23%), a été enregistrée, pour la conservation à l'intérieur. Par contre, pour la conservation à l'extérieur, cette résistance augmente de 23 MPa au 30 MPa (environ 30%) mais s'arrête à un taux de 40% de SC.
- Les résistances des bétons conservés au laboratoire sont toujours supérieures à celles conservés à l'extérieur d'environ 2 à 3 MPa,
- Pour les deux modes de conservation, la résistance a évolué avec la diminution du sable de dunes par rapport au sable concassé.
- Les meilleurs résultats ont été enregistrés avec l'introduction de 40% de sable concassé, au-delà de ce taux, la résistance s'est maintenue presque constante.

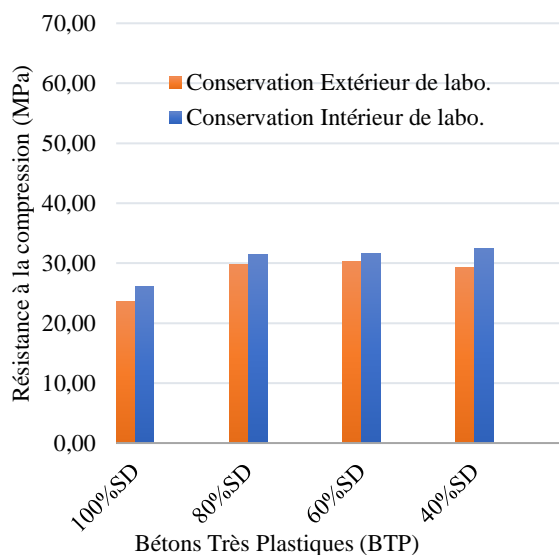


Figure 4.9. Résistance à la compression des bétons très plastiques en fonction du pourcentage de sable de dunes

4.3.1.2.1.2. Consistance plastique

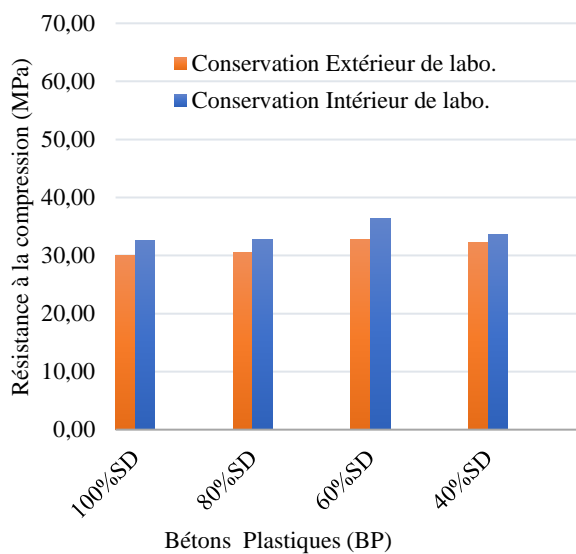


Figure 4.10. Résistance à la compression des bétons plastiques en fonction du pourcentage de sable de dunes

Les bétons plastiques ont donné des résultats illustrés par la figure 4.10 :

- Le faible rapport E/C au béton plastique indique le développement de la propriété mécanique (résistance à la compression) dans tous les bétons avec différents rapports de sable de dunes.
- Il est clair que les bétons à 100% et 80% de sable de dunes ont donné la même résistance de 30 MPa et 32 MPa pour le mode de conservation interne et externe.
- Le mélange optimal du béton, vis-à-vis de la résistance à la compression, correspond au taux de 60% SD + 40% SC, 36 MPa à l'intérieur du laboratoire et 32 MPa à l'extérieur.

- Le pourcentage de 40%SD dans le béton a influé négativement sur sa résistance à la compression, elle a chuté à 33 MPa (environ 9%).

4.3.1.2.2. Béton avec superplastifiant

L'adjuvant MEDAFLOW 3041R a été utilisé pour améliorer certaines propriétés du béton. Il y a non seulement amélioration de la fluidité du béton, mais aussi la croissance de sa résistance à la compression.

4.3.1.2.2.1. Consistance très plastique

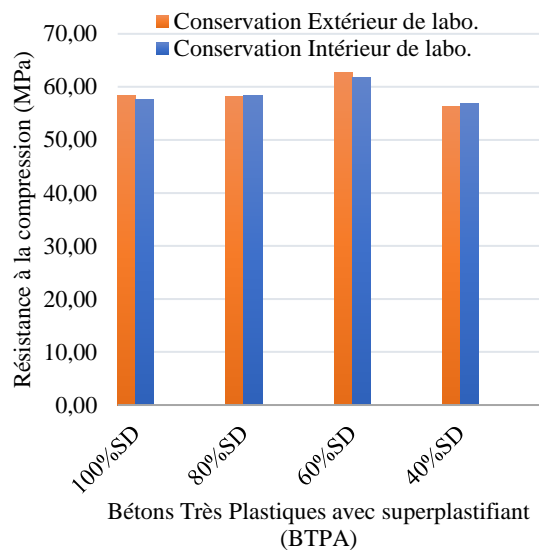


Figure 4.11. Résistance à la compression des bétons très plastiques avec superplastifiant en fonction du pourcentage de sable de dunes

Avec une consistance très plastique souhaitable, l'introduction du superplastifiant, la résistance à la compression a donné des valeurs illustrées par la figure 4.11 :

- Il y a augmentation importante (plus de 100%) de la résistance à la compression, passant du simple au double pour tous les pourcentages de sable de dunes et dans les deux modes de conservation.
- Les valeurs ont varié de 23 à 32 MPa pour les bétons très plastiques témoins et de 57 à 62 MPa pour les bétons très plastiques avec superplastifiant.
- L'introduction du sable concassé a toujours amélioré la résistance d'environ 10% mais jusqu'à 40%SC seulement. Le pourcentage de 60% SC a fait diminuer la résistance de 10%.
- Il n'y a pas de différence remarquable dans les résistances pour les échantillons conservés à l'intérieur ou à l'extérieur du laboratoire. C'est vraisemblablement l'effet retardateur de prise que possède ce superplastifiant.

4.3.1.2.2. Consistance plastique

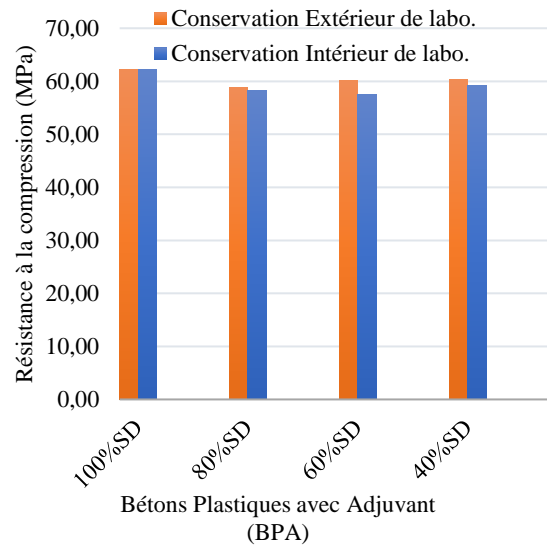


Figure 4.12. Résistance à la compression des bétons plastiques avec superplastifiant en fonction du pourcentage de sable de dunes

L'observation des histogrammes dans la figure 4.12 montrent que :

- Avec la réduction de la quantité d'eau de gâchage due à la consistance plastique, l'effet du superplastifiant a également permis de réduire considérablement la teneur en eau pour obtenir un rapport E/C encore faible, ce qui a réduit la porosité et augmenté la résistance.
- Par conséquent, la résistance a atteint 62 MPa dans le béton contenant 100% de SD et ce, pour les deux modes de conservation.
- Les bétons conservés à l'extérieur du laboratoire ont enregistré des résistances plus élevées à ceux conservés à l'intérieur. A l'inverse du béton sans additif, sans faute, l'un des effets au béton est le retardement de la prise.

D'après les résultats obtenus dans cette section, nous pouvons conclure :

- 1^{er}) Du point de vue consistance, nous avons remarqué que l'introduction de sable concassé influe sur la consistance avec :
 - Pour les bétons témoins, ceux qui ont donné des affaissements plus proches de ceux ciblés sont les bétons qui ont des taux de 100%, 80% et 60%SD, quelle que soit la consistance, très plastique 12 ± 1 cm ou plastique de 8 ± 1 cm.
 - L'affaissement des bétons avec superplastifiant est nettement supérieur à celui des bétons témoins. Pour la consistance très du plastique, l'effet de l'amélioration de la fluidité de superplastifiant a été très évident, et l'affaissement obtenu a été maximum pour le béton (100% SD et 80% SD) de 15 cm, 14 cm pour le béton (60% SD et 40% SD), tandis que pour le béton avec une consistance plastique cible, il a donné une valeur similaire à celle du béton théorique, c'est-à-dire une valeur de 8 cm.

- 2^{ème}) Du point de vue résistance, l'introduction du sable concassé avait comme influence :
 - Pour les bétons témoins très plastiques, l'augmentation du taux de sable concassé a engendré une croissance de la résistance de 26 MPa à 32 MPa (en mode de conservation intérieur). Pour le mode extérieur, l'augmentation s'est limitée au taux 40% SC en passant de 23 MPa à 30 MPa. Par contre, pour les bétons plastiques, les résistances ont augmenté de 32 MPa à 36 MPa en mode intérieur et de 30 MPa à 32 MPa en mode extérieur. Il faut également noter que la résistance diminue après plus de 60%SD ; elle diminue également entre le mode de conservation de l'intérieur à l'extérieur de 2 à 3 MPa. Les meilleurs résultats sont obtenus de 100% à 60% de sable de dunes et au-delà de ce pourcentage, il n'y a pas d'amélioration notable de la résistance.
 - Pour les bétons avec superplastifiant, la résistance s'est beaucoup améliorée. À consistance très plastique, la résistance est d'environ 57 ± 3 MPa, et une légère diminution au béton à 40%SD, cela est généralement évident dans les autres types des bétons. Et pour une consistance plastique, l'indicateur s'est développé pour atteindre 60 ± 2 MPa. Et entre les deux modes de conservation seulement ± 1 MPa de différence.

De tout ce qui précède et des points de vue consistance et résistance, nous avons choisi les deux bétons qui ont enregistré les meilleurs résultats, en l'occurrence le béton avec 80%SD et celui avec 60%SD (c'est-à-dire, une amélioration avec 20%SC et 40%SC). Nous gardons le béton avec 100%SD comme témoin, pour l'étude vis-à-vis de la fissuration en climat aride.

4.3.2. Variations des fissures dans les dallâtes

Abréviations :

Afin de différencier entre les différentes dallâtes, ci-après les abréviations octroyées ;

A. Bétons témoins :

Type de béton	Bétons témoins							
Consistance	Consistance très plastiques (BTP)							
(%) Sable de dunes	100%SD		80%SD		60%SD		40%SD	
Conservation	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur
Appellation	BTP1SDE	BTP1SDI	BTP8SDE	BTP8SDI	BTP6SDE	BTP6SDI	BTP4SDE	BTP4SDI
Consistance	Bétons plastiques (BP)							
(%) Sable de dunes	100%SD		80%SD		60%SD		40%SD	
Conservation	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur
Appellation	BP1SDE	BP1SDI	BP8SDE	BP8SDI	BP6SDE	BP6SDI	BP4SDE	BP4SDI

B. Bétons avec superplastifiant

Type de béton	Bétons avec superplastifiant							
Consistance	Bétons très plastiques (BTPA)							
(%) Sable de dunes	100%SD		80%SD		60%SD		40%SD	
Conservation	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur
Appellation	BTPA1SDE	BTPA1SDI	BTPA8SDE	BTPA8SDI	BTPA6SDE	BTPA6SDI	BTPA4SDE	BTPA4SDI
Consistance	Bétons plastiques (BPA)							
(%) Sable de dunes	100%SD		80%SD		60%SD		40%SD	
Conservation	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur
Appellation	BPA1SDE	BPA1SDI	BPA8SDE	BPA8SDI	BPA6SDE	BPA6SDI	BPA4SDE	BPA4SDI

C. Bétons traités du Cure :

Type de béton	Bétons traités par la cure							
Consistance	Bétons très plastiques (BTPC)							
(%) Sable de dunes	100%SD		80%SD		60%SD		40%SD	
Conservation	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur
Appellation	BTPC1SDE	BTPC1SDI	BTPC8SDE	BTPC8SDI	BTPC6SDE	BTPC6SDI	BTPC4SDE	BTPC4SDI
Consistance	Bétons plastiques (BPC)							
(%) Sable de dunes	100%SD		80%SD		60%SD		40%SD	
Conservation	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur	Extérieur	Intérieur
Appellation	BPC1SDE	BPC1SDI	BPC8SDE	BPC8SDI	BPC6SDE	BPC6SDI	BPC4SDE	BPC4SDI

4.3.2.1. Bétons témoins

4.3.2.1.1. Bétons contenant 100% sable de dunes

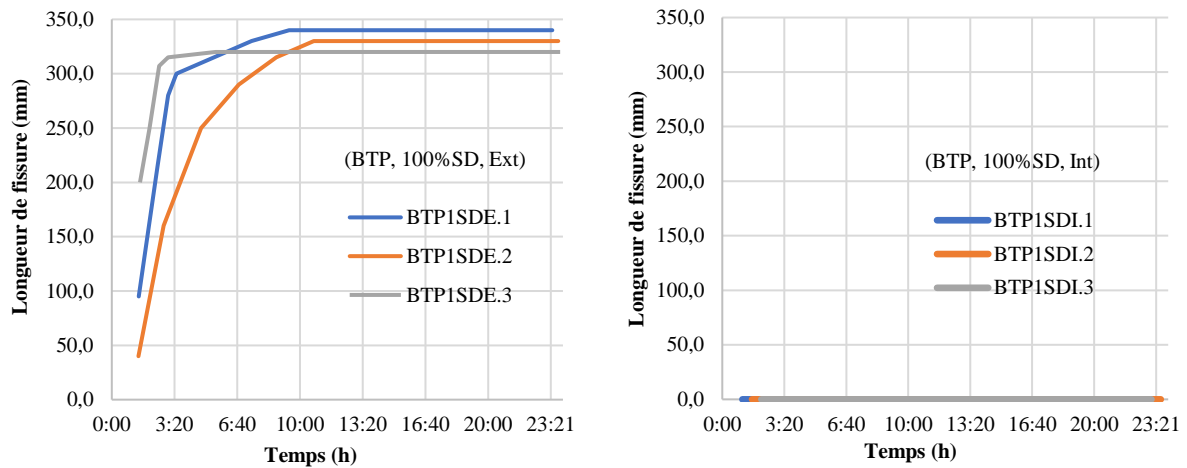
4.3.2.1.1.1. Consistance très plastique

D'après la figure 4.13.a, l'apparition des fissures dans des dallâtes de béton conservé à l'extérieur démarre à partir de la deuxième heure de coulage, avec des longueurs de fissuration distinctes de 40 à 200mm.

La progression de ces fissures a été rapide et importante pendant les six premières heures puis elle ralentie pour s'arrêter à la neuvième heure, atteignant une longueur de 330 ± 10 mm et une largeur d'environ 0,4mm (figure 4.13.c).

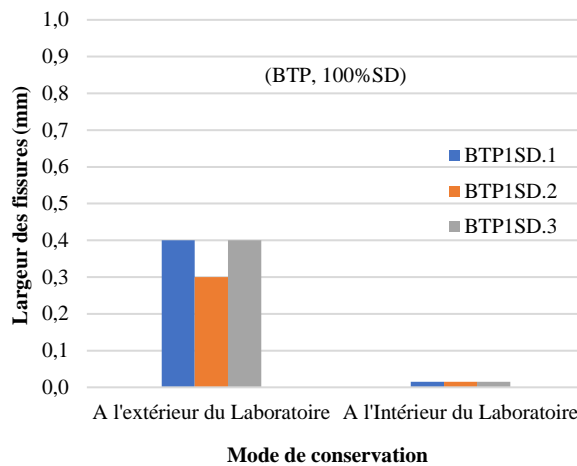
Cependant, pour les mêmes mélanges de bétons très plastiques avec 100%SD et conservés à l'intérieur du laboratoire, nous n'avons rien enregistré comme fissure durant toute la période de surveillance (figure 4.13.b et c).

La cause est évidemment due à la conservation à l'abri des conditions climatiques sévères.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’extérieur de laboratoire

(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

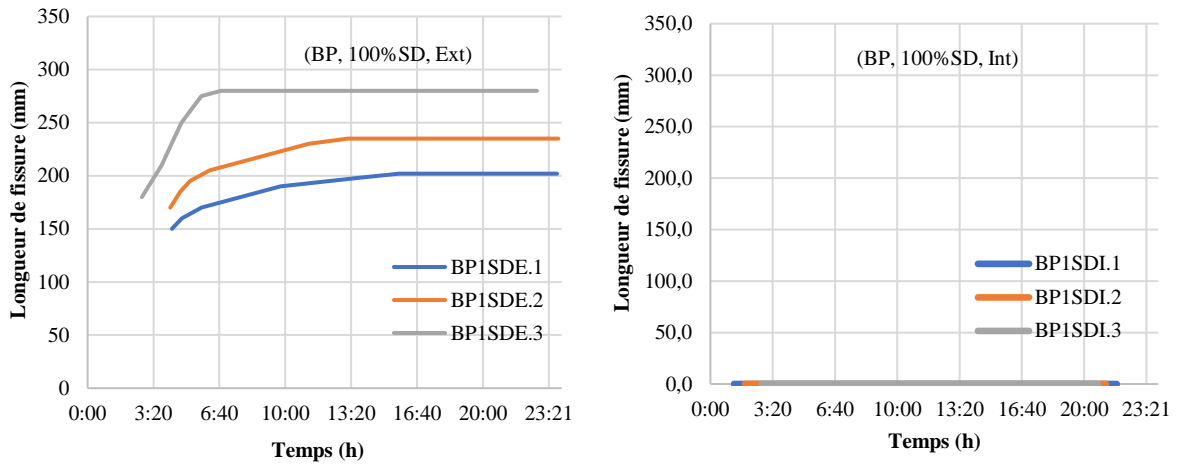
Figure 4.13. Variations des fissures des bétons très plastiques, témoins et avec 100%SD.

4.3.2.1.1.2. Consistance plastique

La consistance plastique des bétons à 100%SD a aussi montré une variation importante de la fissure en longueur (figure 4.14.a), mais qui reste inférieure à celle du béton à consistance très plastique d’environ 30%, et 25% en largeur.

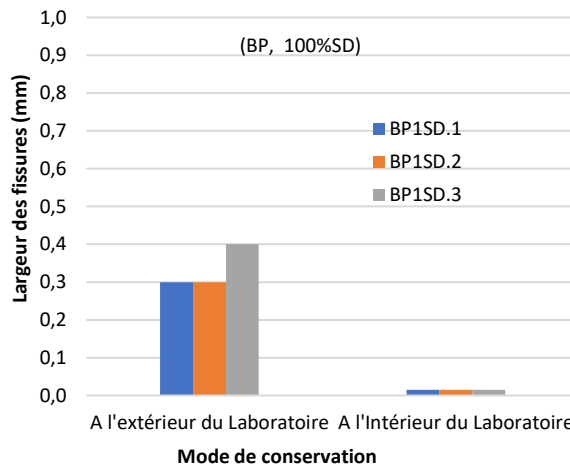
Les valeurs ont varié en longueur de 150mm jusqu’au 230±50mm et en largeur de l’ordre de 0,3mm (figure 4.14.c).

L’apparition de la première fissure s’est déclenchée après plus de trois heures de la mise en place du béton. Ce retard peut être justifié par la diminution du rapport E/C.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire

(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.14. Variations des fissures des bétons plastiques, témoins et avec 100%SD.

4.3.2.1.2. Bétons contenant 80% sable de dunes

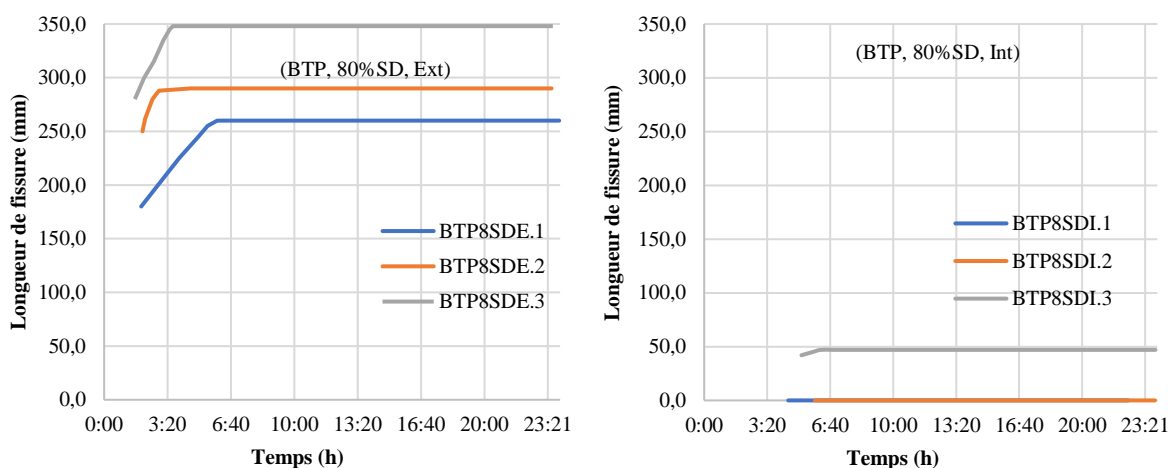
4.3.2.1.2.1. Consistance très plastique

L'incorporation de 20% de sable concassé dans des bétons à consistance très plastique conservés à l'extérieur du laboratoire présente des valeurs des fissures distinctes.

Elle démarre à partir de la deuxième heure (figure 4.15.a), avec une longueur de fissure de 180 à 280 mm pour atteindre 260 à 348 mm après trois heures et s'arrête à six heures après coulage. La largeur de la fissure atteint 0,2 mm en moyenne (figure 4.15.b).

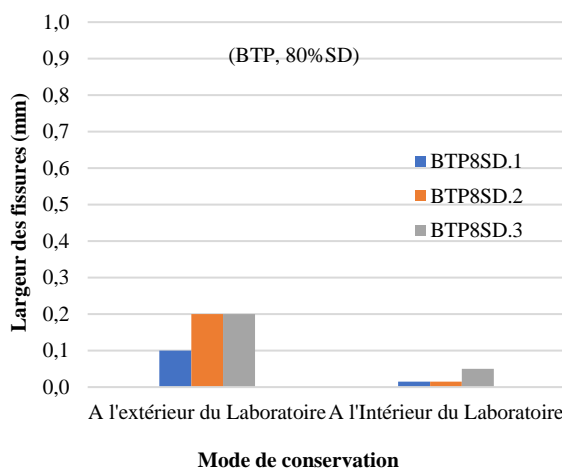
Ces valeurs présentent une diminution non négligeable des fissures par rapport au même type de béton avec 100%SD, d'environ 33%.

Les mélanges conservés à l'intérieur de laboratoire n'ont présenté qu'une petite fissure dans la troisième dallâte (figure 4.15.b et c).



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire

(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



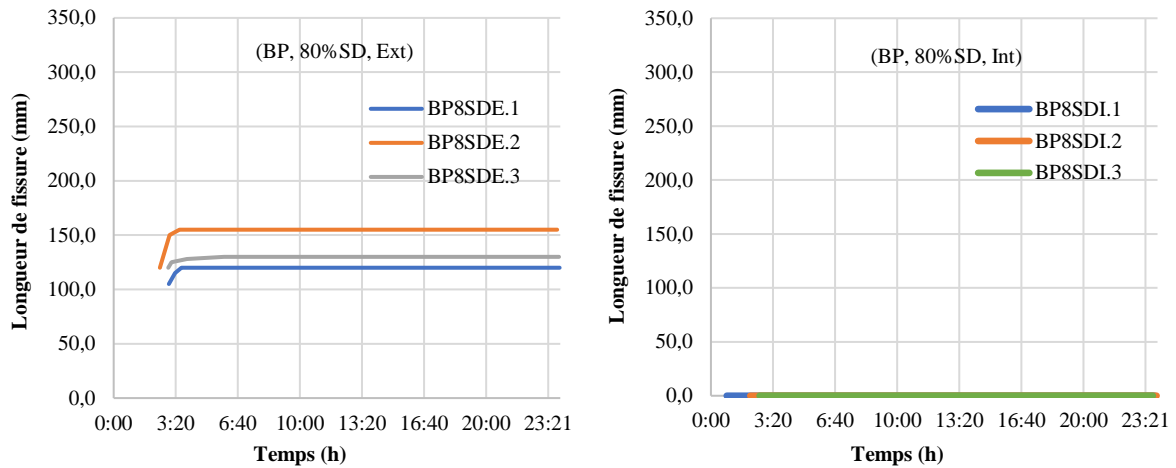
(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.15. Variations des fissures des bétons très plastiques, témoins et avec 80%SD.

4.3.2.1.2.2. Consistance plastique

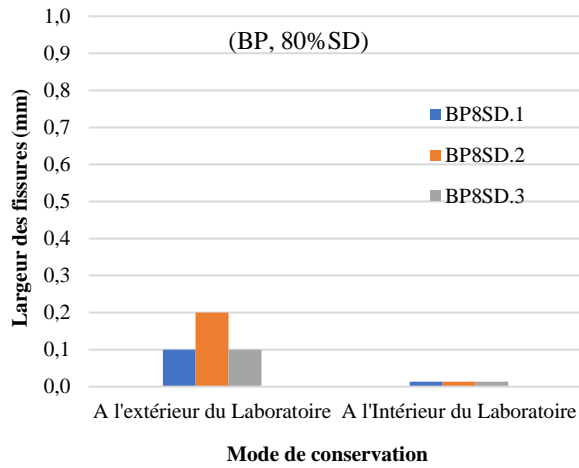
La figure 4.16.a présente l'évolution des fissures des bétons plastiques et avec 80%SD, enregistrant des longueurs de fissures à partir de 105 à 120 mm jusqu'à 140±10mm et des largeurs en moyenne de 0,1mm (figure 4.16.b), durant une période qui ne dépasse pas une heure. Une diminution prononcée des valeurs par rapport au même type de béton avec une consistance très plastique, et c'est le rôle joué par le sable concassé, pour remplir les pores intergranulaires. Notons toujours que la période de croissance des longueurs de fissures dans la consistance plastique est moindre, par rapport à la consistance très plastique, car un rapport E/C plus faible peut affecter la quantité d'eau à évaporer.

Les mêmes remarques sont valables pour la majorité des autres bétons en conservation intérieur du laboratoire ne laissant pas de traces des fissures aux dallâtes.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire

(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

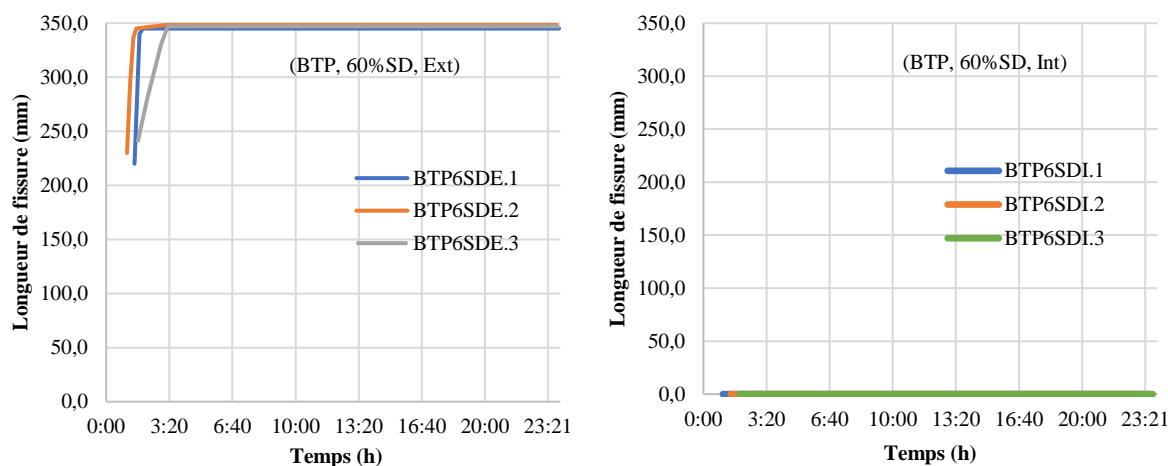
Figure 4.16. Variations des fissures des bétons plastiques, témoins et avec 80%SD.

4.3.2.1.3. Bétons contenant 60% sable de dunes

4.3.2.1.3.1. Consistance très plastique

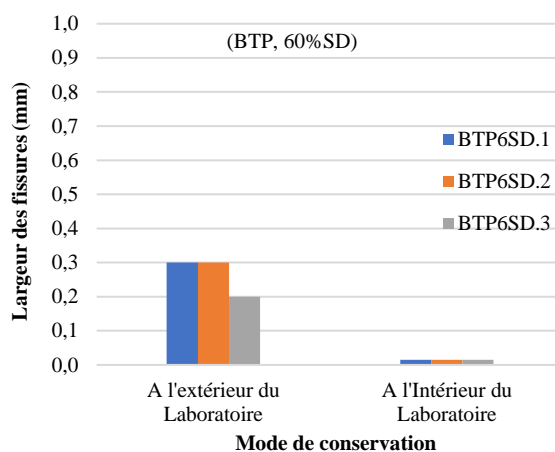
Le pourcentage de 60%SD dans un béton très plastique exposé directement au climat aride (BTP6SDE), présente, à partir de la deuxième heure, des fissures importantes en longueur $230 \pm 10 \text{ mm}$ jusqu'à 350 mm (figure 4.17.a). La largeur des fissures a cependant enregistré $0,3 \text{ mm}$ en moyenne (figure 4.17.c). Les grains fins dans le sable concassé en quantité (inférieur à $0,08 \text{ mm}$) absorbent une grande quantité d'eau, additivement aux conditions climatiques sévères ;

Cette conclusion est confirmée par la figure 4.17.b, qui a affiché des fissures en longueur et en largeur nulles (figure 4.17.c) des trois dallâtes conservées à l'intérieur du laboratoire.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire

(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.17. Variations des fissures des bétons très plastiques, témoins et avec 60%SD.

4.3.2.1.3.2. Consistance plastique

La courbe de la figure 4.18.a, a clairement montré que :

- En mode de conservation extérieure, les fissures ont enregistré, à partir de la deuxième heure, des valeurs de 110 ± 10 mm, sa progression s'arrête à la troisième heure pour afficher en moyenne 135 mm en longueur et en moyenne de largeur de 0,1 mm (figure 4.18.c). Ces valeurs ont diminué d'environ 66% par rapport à celles du béton à consistance très plastique. Parce que cette consistance a une quantité d'eau nécessaire à une hydratation adéquate mieux que celle d'une consistance très plastique.
- En mode de conservation intérieure, ce type de béton n'a enregistré aucune fissure, comme c'est illustré dans les figures 4.18.b et c.
 - Afin de mieux comparer et justifier nos analyses, les résultats obtenus avec tous les types de bétons témoins, sont récapitulés dans le tableau 4.2.

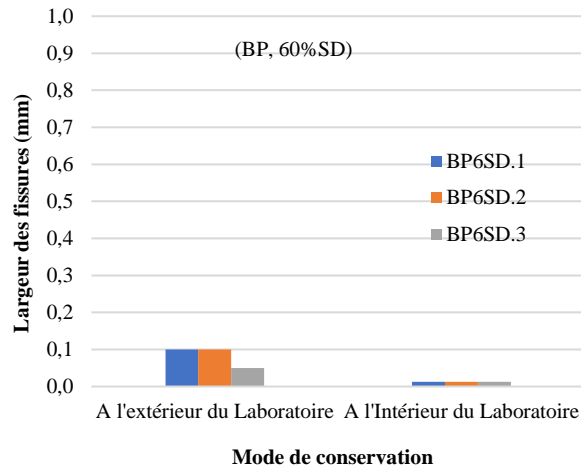
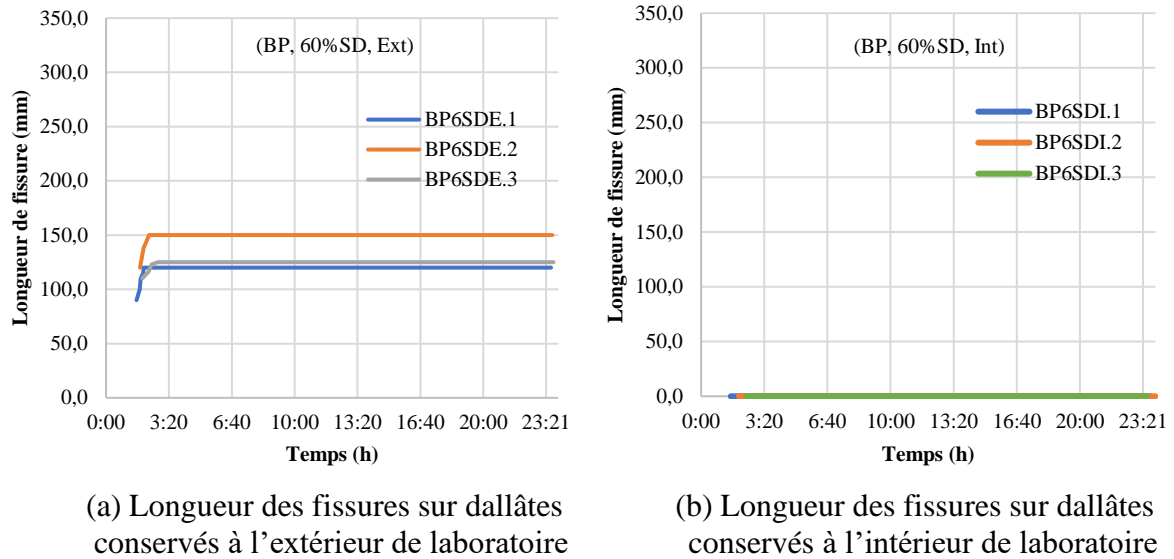


Figure 4.18. Variations des fissures des bétons plastiques, témoins et avec 60%SD.

Tableau 4.2. L'apparition des fissures et leur développement dans les bétons témoins.

Types des bétons	Début moyen de fissures (h)	Longueur initiale moyenne des fissures (mm)	Longueur finale moyenne des fissures (mm)	Largeur finale moyenne des fissures (mm)
BTP1SDE	1:27	120,0	320,0	0,40
BTP1SDI	-	0	0	0
BP1SDE	3:30	165,0	235,0	0,30
BP1SDI	-	0	0	0
BTP8SDE	1:49	230,0	304,0	0,20
BTP8SDI	-	0	0	0
BP8SDE	2:44	112,5	137,5	0,10
BP8SDI	-	0	0	0
BTP6SDE	1:23	230,0	347,5	0,30
BTP6SDI	-	0	0	0
BP6SDE	1:46	105,0	135,0	0,10
BP6SDI	-	0	0	0

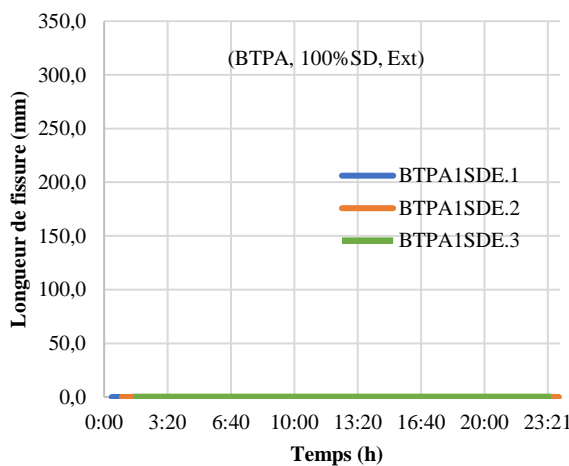
4.3.2.2. Bétons avec superplastifiant

4.3.2.2.1. Bétons contenant 100% de sable de dunes

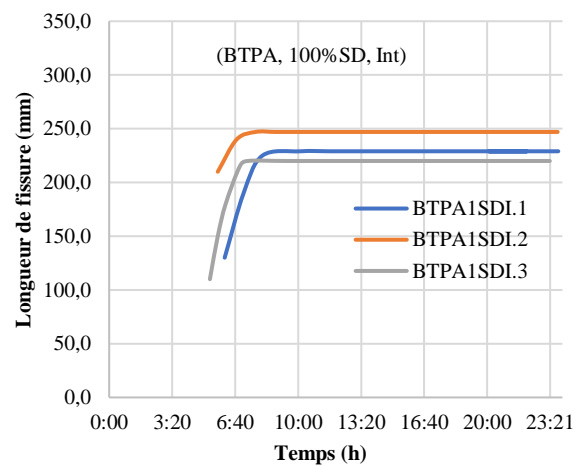
4.3.2.2.1.1. Consistance très plastique

Malgré le manque en distribution granululaire qui caractérise ces types de bétons à 100%SD, le superplastifiant pouvait améliorer le développement de la résistance et améliorer aussi efficacement les performances de rupture du béton avec une diminution de porosité. Les figures 4.19.a et c présentent le béton exposé aux conditions sévères où aucune fissure n’a été détectée.

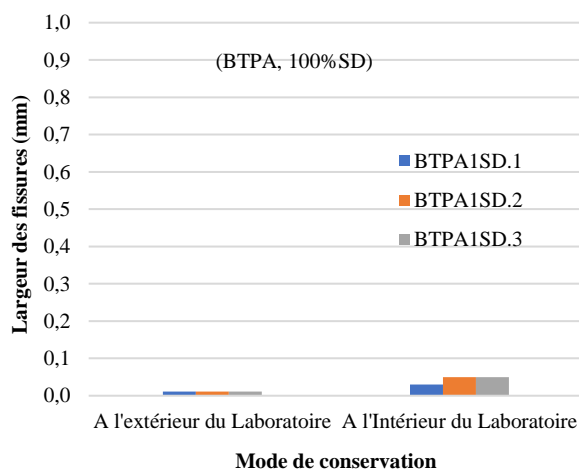
Cependant, les dallâtes ayant subi le mode de conservation intérieur présentent des fissures fines et longueur de 232 ± 10 mm (Fig. 4.19.b), ces fissures se développent souvent sur des éléments de d’ouvrage horizontaux (dalles et radiers) soumis à des sollicitations particulièrement fortes menaçante par retrait précoce ou par capillarité (figure 4.19.c).



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’intérieur de laboratoire



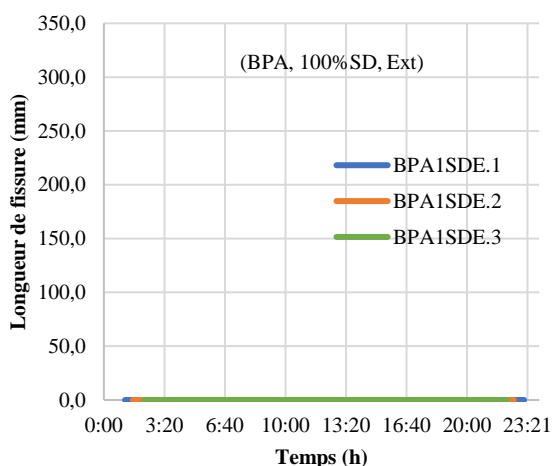
(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.19. Variations des fissures des bétons très plastiques, avec superplastifiant et avec 100%SD.

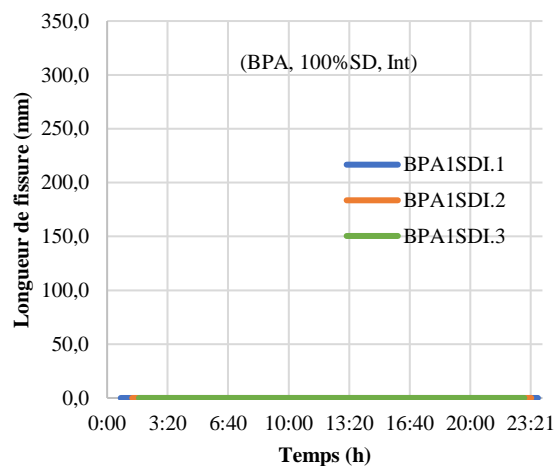
4.3.2.2.1.2. Consistance plastique

Aucune fissure n'a été enregistrée que ce soit en longueur ou en largeur.

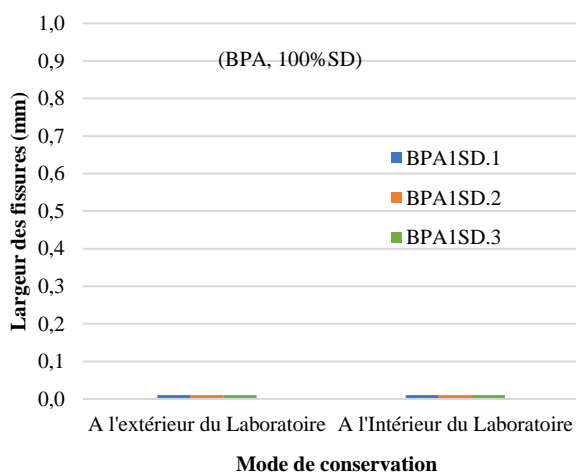
Avec le béton plastique avec 0% sable concassé, l'incorporation de super plastifiant a non seulement réglé la consistance et augmenté la résistance mais elle a aussi atténué les fissures d'une manière considérable, soit dans un béton exposé à des conditions climatiques sévères (BPA1SDE) figure 4.20.a et c, soit dans un mode intérieur de laboratoire (BPA1SDI) figure 4.20.b et c, ceci avec un faible rapport (E/C), sous l'influence de ce superplastifiant réducteur d'eau qui a réduit le retrait.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

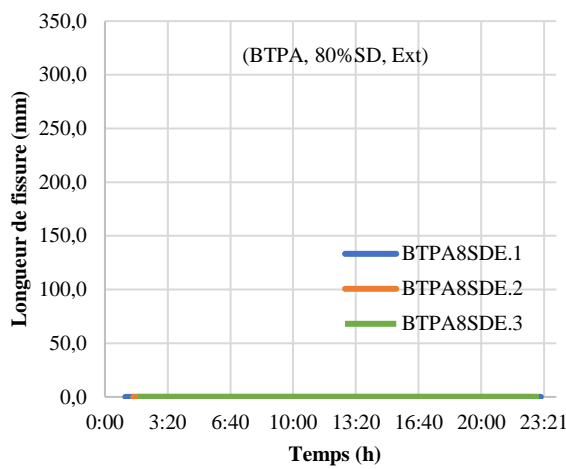
Figure 4.20. Variations des fissures des bétons plastiques, avec superplastifiant et 100%SD.

4.3.2.2. Bétons contenant 80% de sable de dunes

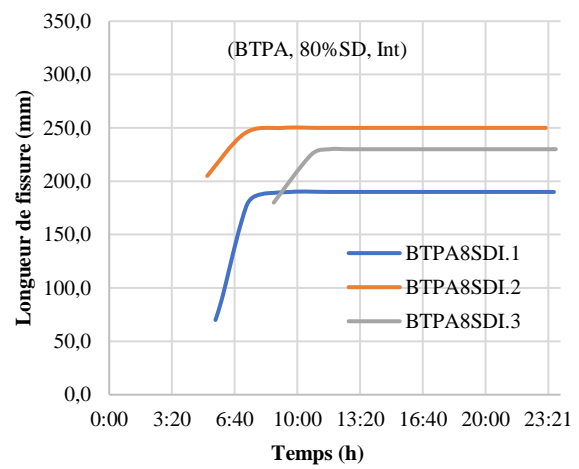
4.3.2.2.1. Consistance très plastique

Pour les dallâtes conservées à l’extérieur du laboratoire, aucune manifestation des fissures n’a été enregistrée (figures 4.21.a et c). Nous justifions ce constat par le fait que les éléments fins qui existent en importantes quantités dans le sable concassé ont piégé et adsorbé l’eau qui est censée s’évaporer.

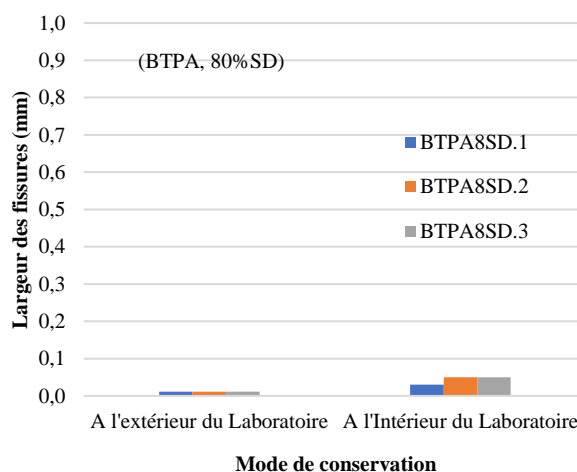
Pour les dallâtes à l’intérieur, les fissures sont minces, et son évolution dans le temps est plus lente, dû à une compacité plus élevée suite l’introduction du sable concassé (figures 4.21.b et c), et le béton est localement empêché de se tasser, le tassement des particules solides induit une contrainte, lorsque cette contrainte dépasse la résistance du béton frais, la fissuration se produit.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’intérieur de laboratoire

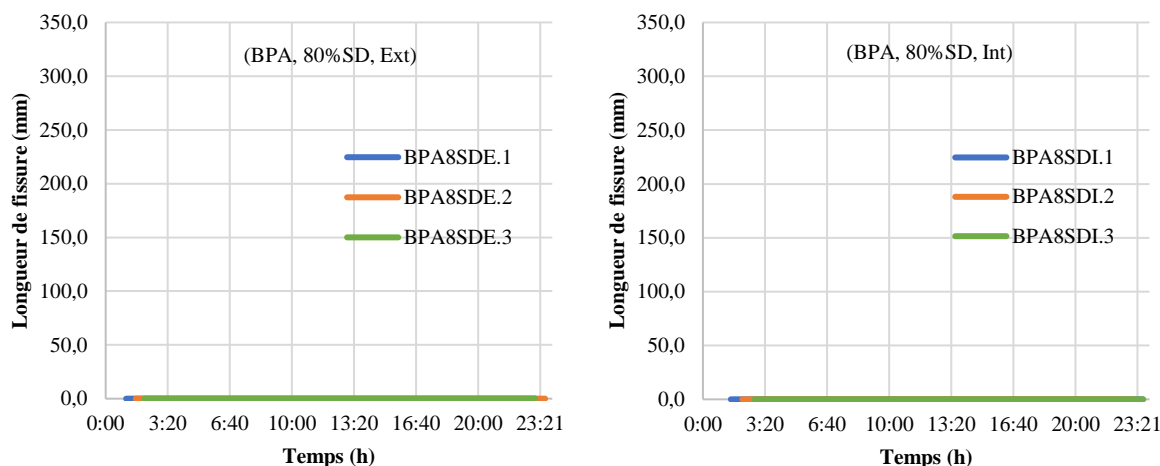


(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.21. Variations des fissures des bétons très plastiques, avec superplastifiant et 80%SD.

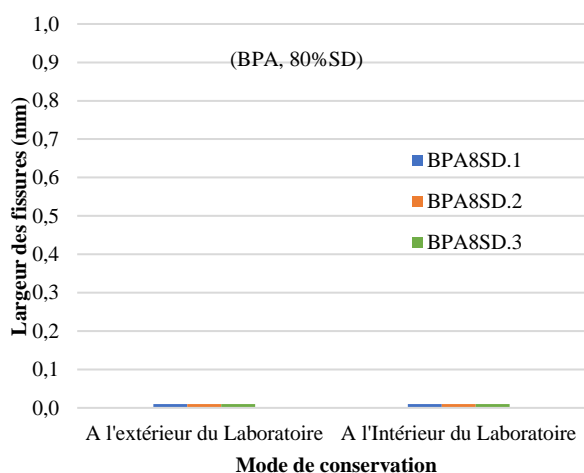
4.3.2.2.2. Consistance plastique

Avec 80% de sable de dunes et 20% de sable concassé et à consistance plastique, (E/C) est réduit, ceci est compensé par l'action du superplastifiant réducteur d'eau utilisé, qui agissent comme des retardateurs et peuvent réduire le taux d'hydratation du béton, par conséquent en plus de l'affaissement obtenu c'est celle ciblé le béton n'a présenté aucune fissure pour les deux modes de conservation ce qui est illustré dans les figures 4.22.a, b et c.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire

(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

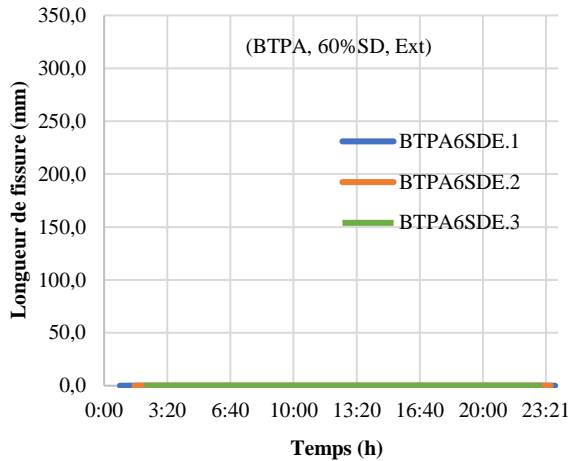
Figure 4.22. Variations des fissures des bétons plastiques, avec superplastifiant et 80%SD.

4.3.2.2.3. Bétons contenant 60% de sable de dunes

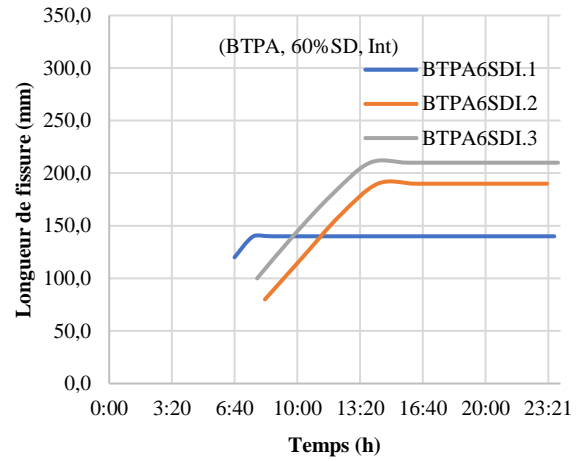
4.3.2.2.3.1. Consistance très plastique

La présence de superplastifiant en conservation extérieure (figure 4.23a et c), a réussi de garder le béton intact, il est convenablement réagi avec les conditions climatiques sévères, et pourtant les quantités des éléments fines ont encore augmenté.

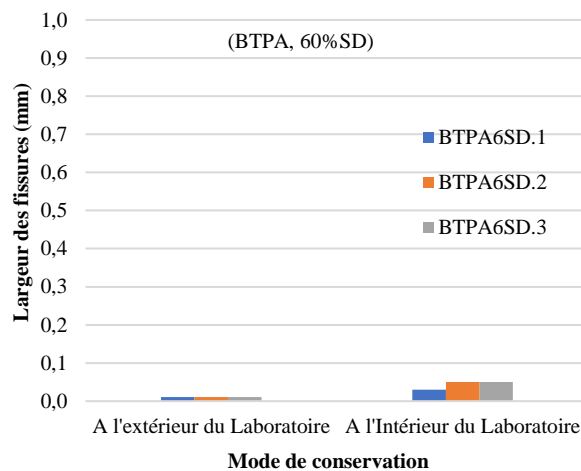
La conservation intérieure a créé de très fines fissures qui démarrent à partir de la sixième heure avec des valeurs de 80 à 100 mm (figure 4.23b et c). Elles atteignent, après la treizième heure de coulage en moyenne 200 ± 10 mm. Dans ces conditions climatiques moins sévères, un affaissement élevé du béton augmente non seulement la possibilité de fissuration mais peut également diminuer la force d'adhérence en raison d'une plus grande quantité d'eau libre.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire

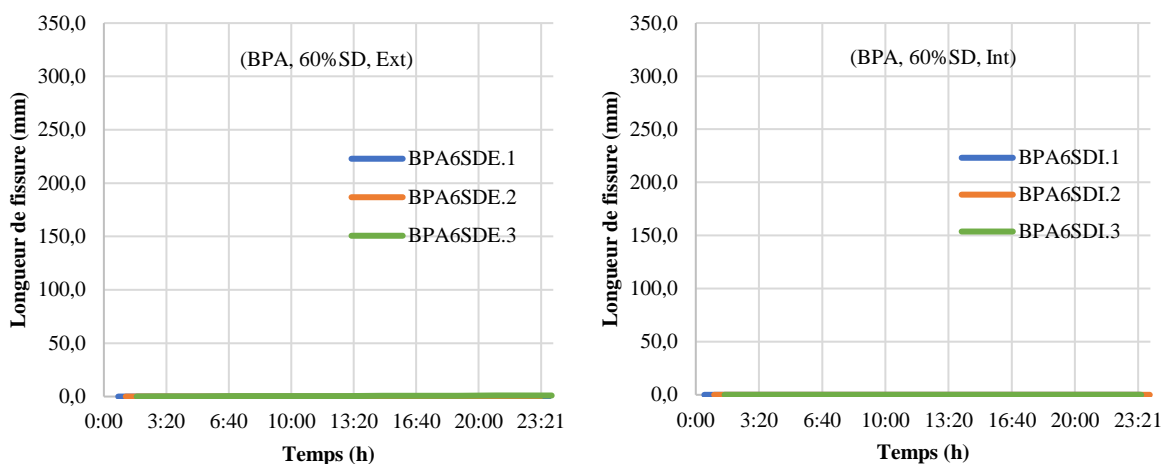


(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.23. Variations des fissures des bétons très plastiques, avec superplastifiant et 60%SD.

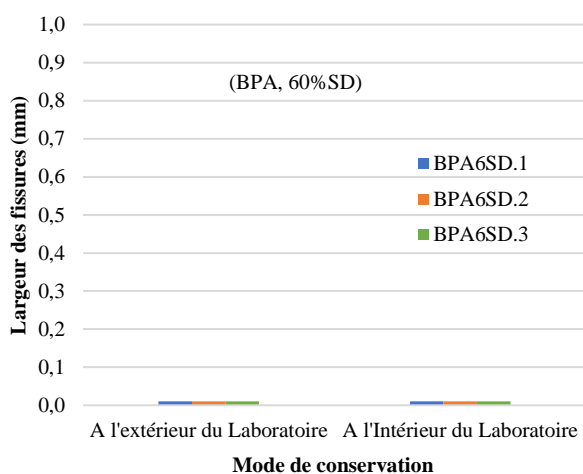
4.3.2.2.3.2. Consistance plastique

Le béton plastique, avec 60% de sable de dunes et 40% de sable concassé et avec le superplastifiant (teneur E/C faible), n'a pas enregistré de fissures que ce soit en longueur ou en largeur, et c'est vérifié pour les deux modes de conservation (figures 4.24.a, b et c). Nous signalons que ce type de béton a donné dans les sections précédentes un affaissement similaire à celui recherché, et des résistances assez intéressantes pour les deux modes conservation.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’extérieur de laboratoire

(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.24. Variations des fissures des bétons plastiques, avec superplastifiant et 60%SD.

Les points majeurs assemblés au tableau 4.3, pour mieux exploiter avec autres types des bétons.

Tableau 4.3. L’apparition des fissures et son développement dans les bétons avec superplastifiant (intérieur et extérieur du laboratoire)

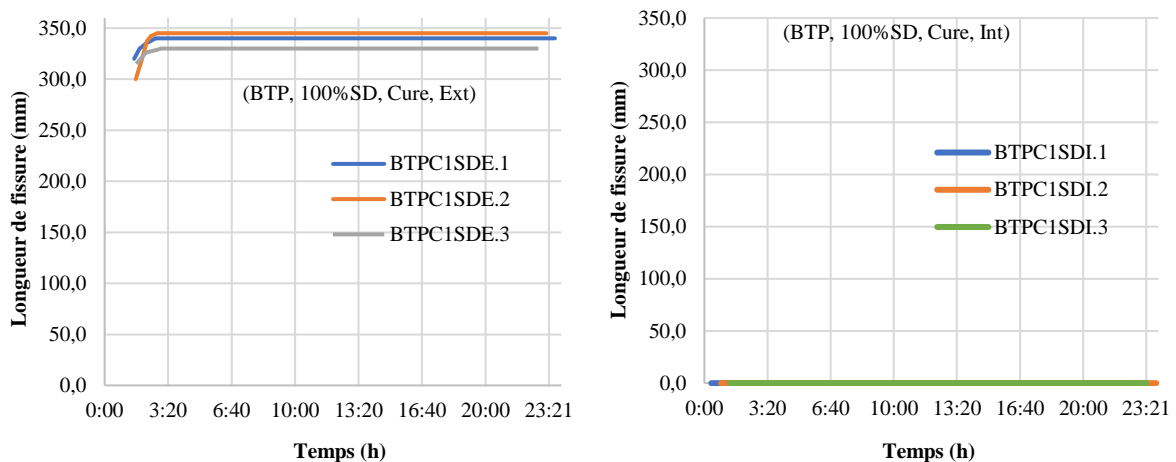
Types des bétons	Début moyen de fissures (h)	Longueur moyenne initiale de fissures (mm)	Longueur moyenne finale de fissures à (mm)	Largeur moyenne de fissures (mm)
BTPA1SDE	-	0	0	0
BTPA1SDI	5:44	160,0	213,5	0,5
BPA1SDE	-	0	0	0
BPA1SDI	-	0	0	0
BTPA8SDE	-	0	0	0
BTPA8SDI	5:26	192,5	220,0	0,5
BPA8SDE	-	0	0	0
BPA8SDI	-	0	0	0
BTPA6SDE	-	0	0	0
BTPA6SDI	8:04	90,0	200,0	0,5
BPA6SDE	-	0	0	0
BPA6SDI	-	0	0	0

4.3.2.3. Bétons traités par la cure

4.3.2.3.1. Bétons contenant 100% de sable de dunes

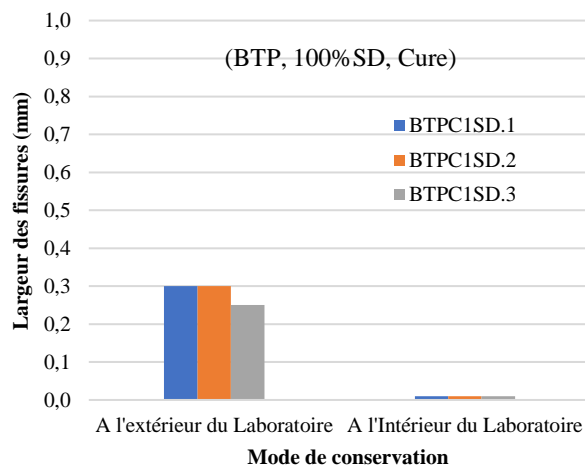
4.3.2.3.1.1. Consistance très plastique

Dans les zones arides, la cure joue un rôle important pour minimiser l'évaporation de l'eau. Nous avons choisi une méthode qui consiste à utiliser une isolation « MEDACURE » sur la surface du béton.



(a) Longueurs des fissures sur dallâtes conservées à l'extérieur de laboratoire

(b) Longueurs des fissures sur dallâtes conservées à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeurs des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.25. Variations des fissures des bétons très plastiques, traités par cure et avec 100%SD.

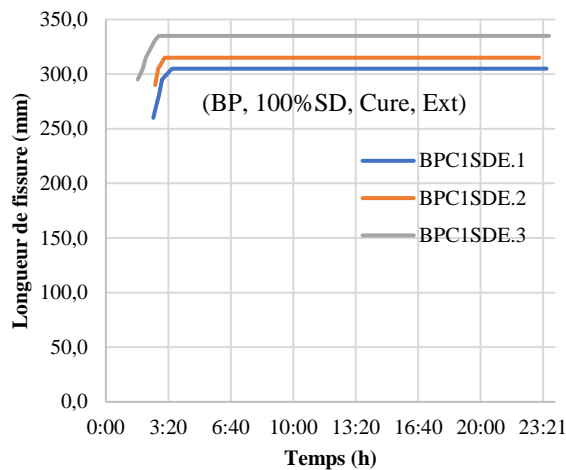
Les résultats dans la figure 4.25, sur un béton très plastique avec 100%SD, ont montré que :

- En mode de conservation extérieure, des fissurations sont créées après environ une heure de coulage avec des valeurs importantes en longueur de 300 ± 10 mm, leur développement a duré une heure pour se stabiliser à 340 ± 5 mm (figure 4.25.a), les largeurs étaient de l'ordre de 0,3mm (figure 4.25.c).
- En mode de conservation intérieure, aucune fissure n'a été enregistrée (figure 4.25.b et c), le facteur d'aridité a montré son influence.

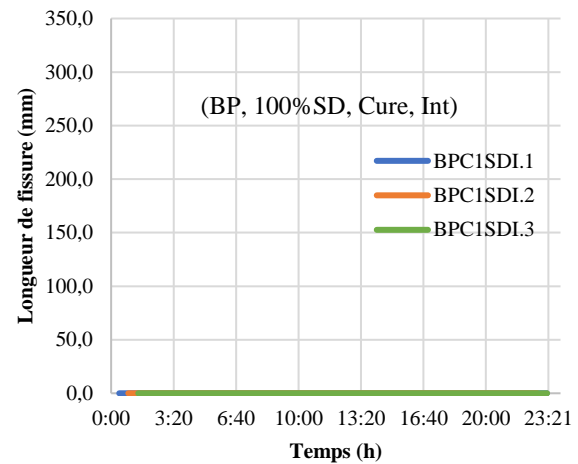
4.3.2.3.1.2. Consistance plastique

Le béton de consistance plastique avec 100%SD et traité par la cure, a enregistré, pour les dallâtes exposées à l'extérieur de laboratoire, des valeurs de fissures moins importantes que celles d'un béton à consistance très plastique. Après environ deux heures de la mise en place du béton, la longueur des fissures a atteint 275 ± 15 mm, sa croissance est stoppée après la troisième heure (figure 4.26.a et c). Par ailleurs, la largeur moyenne était de 0,2 mm, inférieure à celle d'un béton à consistance très plastique. Même si le rapport E/C est diminué, c'est grâce à la cure qui a ralenti l'évaporation rapide de l'eau de gâchage.

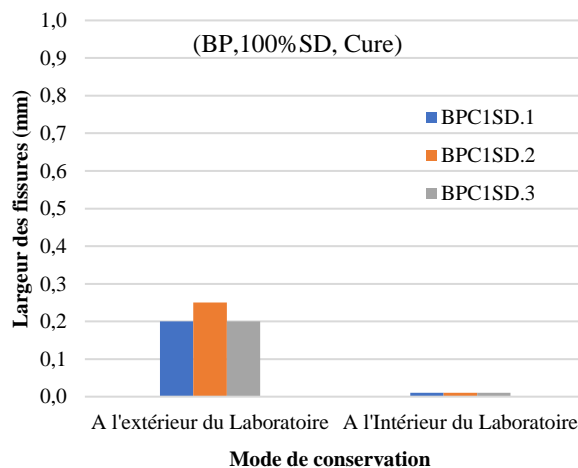
Cependant, les dallâtes qui ont été conservées à l'abri (intérieur de laboratoire) et traitées par la cure, n'ont enregistré, comme le cas du béton à consistance très plastique, aucune fissure durant toute la période de contrôle (figure 4.26.b et c).



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.26. Variations des fissures des bétons plastiques, traités par cure et avec 100%SD.

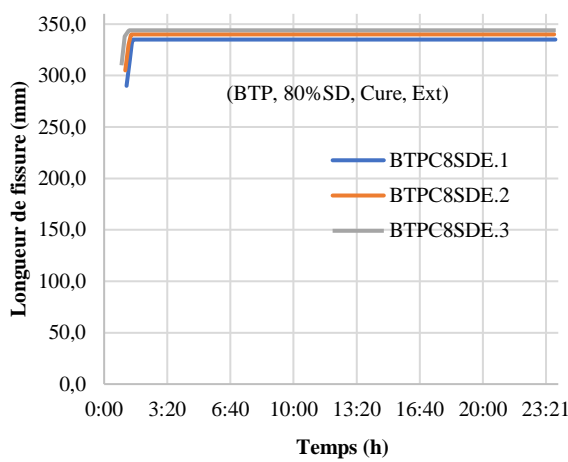
4.3.2.3.2. Bétons contenant 80% de sable de dunes

4.3.2.3.2.1. Consistance très plastique

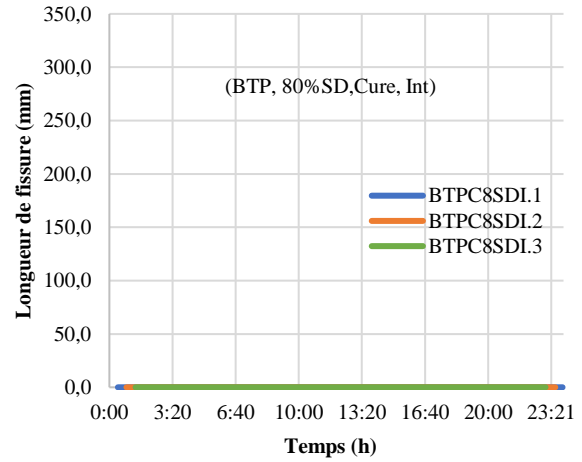
Nous avons incorporé du sable concassé dans notre béton très plastique, sachant que ce sable contient des particules fines, par conséquent, il y avait augmentation de façon excessive le besoin en eau du béton. Ceci explique l'augmentation des largeurs des fissures 0,3 mm en moyenne (figure 4.27.c).

L'effet de la cure à participer à minimiser la durée de l'évolution des longueurs des fissures (courte durée), ça commence au début et se termine à la fin de la deuxième heure après le coulage, a des valeurs très proches de 340±5mm (figure 4.27.a).

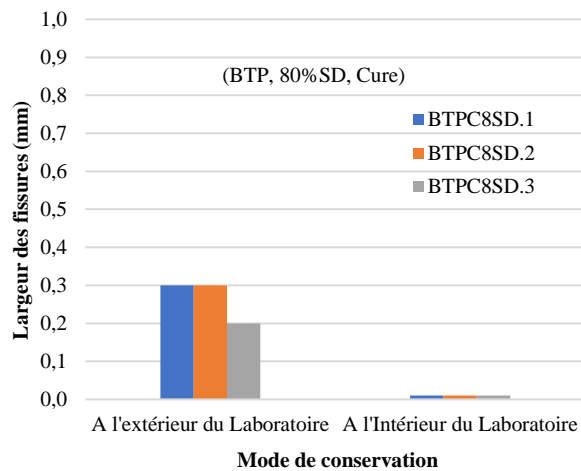
Le béton intérieur de laboratoire et protégé par la cure, n'a subi aucun changement durant la période de surveillance, voir figures 4.27.b et c.



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

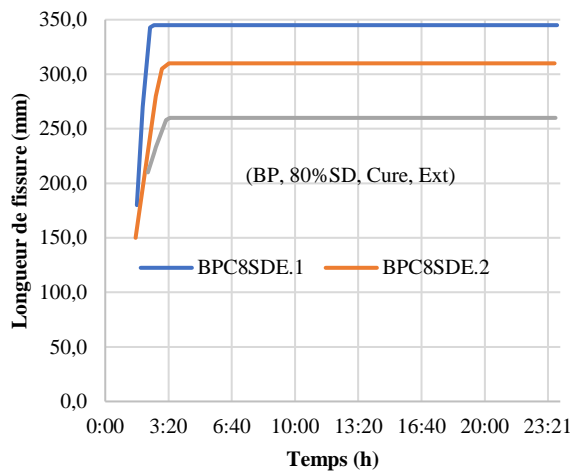
Figure 4.27. Variations des fissures des bétons très plastiques, traités par cure et avec 80%SD.

4.3.2.3.2.2. Consistance plastique

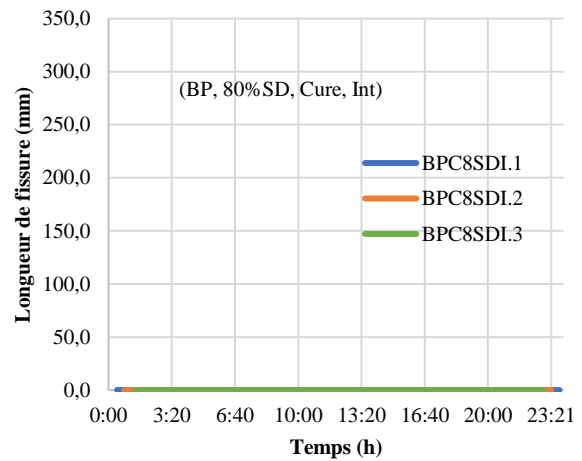
D’après la figure 4.28.a, les fissures sont déclenchées avec des valeurs variant de 150 à 210mm de longueur. Cette croissance rapide s’arrête. Cet arrêt est dû à la cure appliquée. Les longueurs des fissures dans les trois dallâtes ont marqué des valeurs différents 260, 310 et 345mm.

De même les largeurs aussi différentes (figure 4.28.c), de 0,2 à 0,3mm. Cette formulation à montrer des longueurs et des largeurs différents d’ordre décroissent avec le temps, c’est-à-dire que la dallât qu’a été coulé en premier lieu a présenté la plus grande longueur et largeur des fissures ces valeurs se décroît avec chaque coulage, et c’est dû à la diminution du temps d’exposition aux conditions climatiques sévères à l’extérieur du laboratoire.

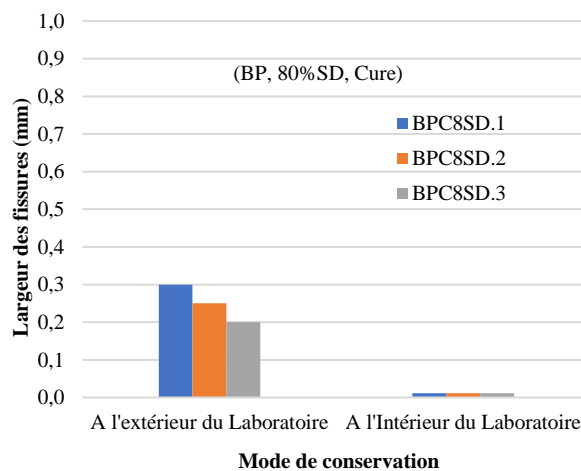
Ajoutons que le béton conservé à l’intérieur du laboratoire n’a pas manifesté des fissures apparentes (figure 4.28.b et c).



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l’intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.28. Variations des fissures des bétons plastiques, traités par cure et avec 80%SD.

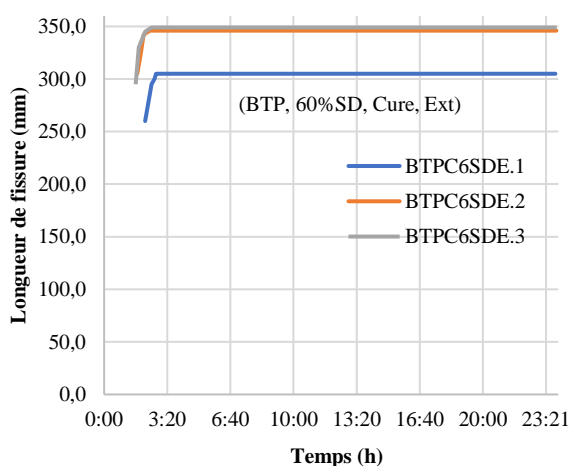
4.3.2.3. Bétons contenant 60% sable de dunes

4.3.2.3.3.1. Consistance très plastique

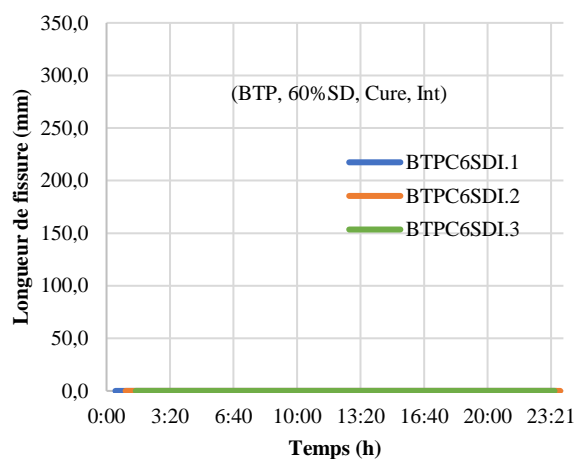
D'une manière générale, avec l'ajout de la quantité de sable concassé de 40%, les fissures augmentent avec le temps en termes de largeur et longueur, ça s'explique par la quantité d'eau absorbée et nécessaire pour l'hydratation totale de ciment, par le sable concassé qui engendre des fissures plus importantes.

Ces fissures ont commencé durant la deuxième heure avec des longueurs qui vont jusqu'à 300mm, puis ça se développe au bout d'une heure pour atteindre les extrémités de la pièce (figure 4.29.a) et des largeurs atteignant 0,3mm (figure 4.29.c).

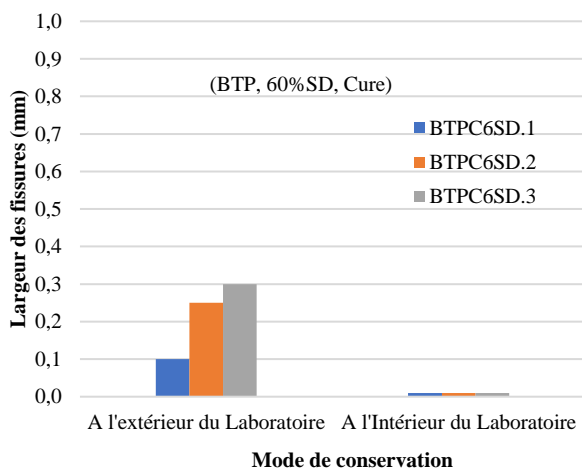
Or que nous n'avons rien signalé aux dallâtes conservées à l'intérieur du laboratoire et traitées avec la cure (figure 4.29.b et c).



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

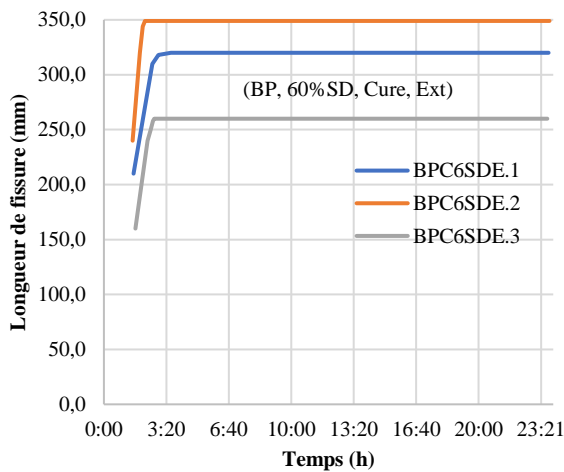
Figure 4.29. Variations des fissures des bétons très plastiques, traités par cure et avec 60%SD.

4.3.2.3.3.2. Consistance plastique

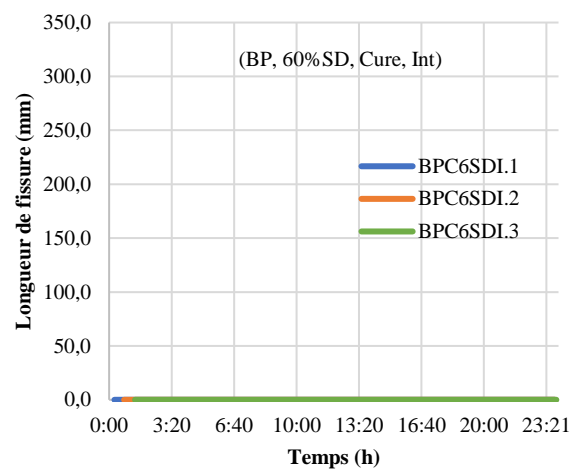
La réduction de la quantité d'eau avec l'application de produit de cure dans cette formulation plastique a montré son impact sur la taille des fissures qui a diminué dans les mélanges conservés à l'extérieur de laboratoire.

La cure était efficace pour diminuer la période de croissance des fissures à moins d'une heure, la longueur de la fissure évolue de 160 à 240mm jusqu'à 260 à 349mm avec une allure semblable des trois dallâtes (figure 4.30.a). Cependant, la largeur de la fissure affiche en moyenne 0,25mm pour les bétons conservés à l'extérieur (figure 4.30.c).

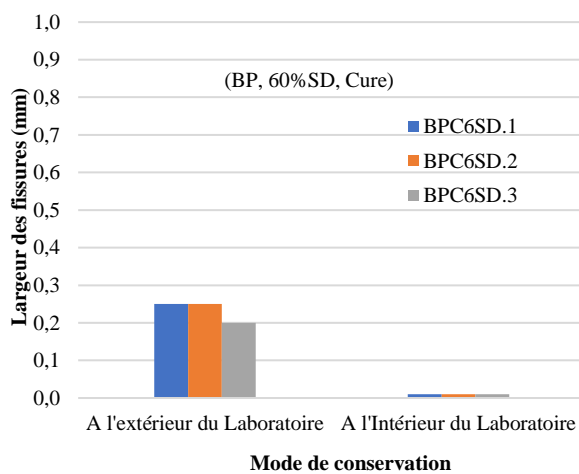
La cure confirme encore son efficacité dans la protection des dallâtes contre les conditions climatiques sévères. Les éprouvettes de béton n'ont subi aucun changement par rapport à leur état initial (figure 4.30.b et c).



(a) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'extérieur de laboratoire



(b) Longueur des fissures sur dallâtes conservés à l'intérieur de laboratoire



(c) Largeur des fissures sur dallâtes en deux modes de conservations

Figure 4.30. Variations des fissures des bétons plastiques, traités par cure et avec 60%SD.

A titre d'éclaircissement et de comparaison, l'apparition des fissures et leur développement dans les bétons étudiés sont illustrés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4. L'apparition des fissures et leur développement dans les bétons traités par cure.

Types des bétons	Début moyen de fissures (h)	Longueur initiale moyenne de fissures (mm)	Longueur finale moyenne de fissures (mm)	Largeur moyenne de fissures (mm)
BTPC1SDE	1:37	310,0	337,5	0,3
BTPC1SDI	-	0	0	0
BPC1SDE	2:10	277,5	320,0	0,2
BPC1SDI	-	0	0	0
BTPC8SDE	1:03	300,0	339,5	0,3
BTPC8SDI	-	0	0	0
BPC8SDE	1:57	180,0	302,5	0,25
BPC8SDI	-	0	0	0
BTPC6SDE	1,55	282,5	327,0	0,2
BTPC6SDI	-	0	0	0
BPC6SDE	1,36	200,0	309,7	0,25
BPC6SDI	-	0	0	0

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats sont présentés, du point de vue consistance, résistance et fissuration sur les différents types des bétons que nous avons élaborés au laboratoire.

- Nous avons commencé à étudier les bétons suivant la méthode de Faury, les résultats ont montré que : La température du béton frais, est considérablement élevée dans l'ensemble des bétons préparés avec une petite différence pour le béton qui contient du superplastifiant, ce changement de température dépend de l'évolution de la chaleur dans le béton, qui est influencée aussi par les conditions ambiantes.

Ensuite ; les consistances de ces bétons ont présenté des affaissements d'un béton plastique pour les mélanges témoins et d'un béton très plastique pour les mélanges contenant le superplastifiant.

Puis on suit l'évolution des fissures : les résultats ont montré que les largeurs des fissures des bétons conservées à l'intérieur du laboratoire ont diminué d'environ 66% par rapport à celles conservés à l'extérieur du laboratoire.

Cependant, le superplastifiant a beaucoup minimisé l'évolution de la fissuration, nous avons enregistré une diminution de la fissuration d'environ 50% en longueur et 66% en largeur ;

Le traitement avec la cure a ralenti l'apparition des fissures et leur vitesse de développement, il a réduit d'environ 40% en longueur et 50% en largeur en mode de conservation extérieur, et d'environ 50% en largeur en mode intérieur par rapport aux bétons témoins.

- En deuxième étape, nous avons utilisé la méthode Dreux-Gorisse.

Le premier volet de l'optimisation c'est la consistance qui montre que : les bétons témoins avec 100%, 80% et 60%SD ont donné un affaissement proche à celui souhaité ; à consistance très plastique et plastique, et les bétons avec superplastifiant, à consistance très plastique l'affaissement était plus grand que la valeur désirée dans des bétons à 100%SD et 80%SD, et plus petit pour les bétons à 40% et 60%. Pour une consistance plastique, tous les bétons présentent un affaissement recherché.

Le deuxième volet c'est la résistance du béton à la compression,

- Pour les bétons témoins, l'augmentation de la quantité de sable concassé, a augmenté la résistance d'environ 20% au mode intérieur et d'environ 30% au mode extérieur en consistance très plastique, d'environ 11% à l'intérieur et de 6% à l'extérieur à consistance plastique et que le béton à 40%SD a diminué la résistance d'environ 8%.
- Pour les bétons avec superplastifiant, on ajoute de quantité de sable concassé, on obtient une croissance de plus de 94% à consistance très plastique et de plus de 57% à consistance plastique.
- En troisième étape, nous avons étudié les bétons vis-à-vis de la fissuration, l'analyse a donné :
 - ✓ Les bétons témoins et en conservation extérieure, avec 100%SD, comparés au même béton confectionné par la formule Faury a enregistré, une diminution de 47% en largeur des fissures. Le béton à 80%SD, a montré des baisses de 50% et de 66% en consistances très plastique et plastique, et pour 60%SD, une réduction des fissures en largeur de 25% et de 66% a été enregistrée, pour une consistance très plastique et plastique, respectivement. En mode intérieur, aucune fissure n'a été constatée dans l'ensemble des bétons (tableau 4.2).
 - ✓ Les bétons avec superplastifiant, à consistances très plastique et plastique avec 100%SD, 80%SD et 60%SD, n'ont pas marqué de fissures dans l'ensemble des dallâtes (voir tableau 4.3). Ce même type de superplastifiant et avec le même dosage n'a pas réussi à arrêter l'apparition des fissures des bétons formulés par la méthode Faury.
 - ✓ Pour les bétons traités par la cure, à consistances très plastique et plastique avec 100%SD, présente moins de 33% par rapport au béton formulé par la méthode Faury en mode extérieur, et 100% en mode intérieur. Les autres bétons avec 80%SD et 60%SD, n'ont pas amélioré la performance du béton vis-à-vis de la fissuration (voir tableau 4.4).

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale :

Dans cette thèse, nous avons présenté l'effet des conditions climatiques sévères, caractérisant la région d'Adrar (zone aride), sur la fissuration du béton, en utilisant des matériaux locaux de cette région.

Les principales conclusions tirées de cette thèse de doctorat sont comme suit :

▪ **Du point de vue consistance :**

- Les bétons témoins contenant des taux de 100%, 80% et 60%SD et de consistances très plastique et plastique ont donné des affaissements plus proches de ceux ciblés.
- Sous l'effet du superplastifiant, les bétons ont enregistré des affaissements nettement supérieurs à ceux des bétons témoins. Avec une consistance très plastique, les bétons à (60%SD et 40%SD) ont des valeurs proches de celles ciblées. Les bétons très plastiques à (100%SD et 80%SD) affichent des valeurs supérieures. Tandis que pour une consistance plastique ciblée, tous les bétons ont donné l'affaissement souhaité.

▪ **Du point de vue résistance :**

- Pour les bétons témoins :
 - A consistance très plastique, la résistance augmente d'environ 20% et ce en ajoutant 20% de sable concassé (béton très plastique de 80%SD). Au-delà de ce taux de sable concassé, il n'y a pas de changement considérable. Tous les bétons conservés à l'intérieur ont affiché de 4% à 10% d'augmentation de la résistance par rapport à celle du béton exposé au climat aride.
 - Pour les bétons plastiques, seul le béton à 60%SD a une augmentation de la résistance d'environ 11% par rapport au béton témoin à 100%SD. Cependant, le béton à 40%SD a diminué d'environ 8% par rapport au béton à 60%SD.
- Pour les bétons avec superplastifiant :

Enfin, nous pouvons confirmer qu'en présence du superplastifiant, la résistance s'est nettement améliorée.

- A consistance très plastique ; le développement de la résistance est estimé entre 94% et 120%.
- A consistance plastique ; le développement de la résistance est estimé entre 57% et 107%.

Les bétons qui ont enregistré les meilleurs résultats sont ceux avec 80%SD et 60%SD, des points de vue consistance et résistance.

Nous avons choisi ces bétons pour introduire le superplastifiant d'une part, et leur appliqué, le traitement par un produit de cure d'une part ; pour les étudiés vis-à-vis de la fissuration en climat aride.

Les principaux points à retenir de cette étude sont :

▪ **Selon la méthode Faury :**

- Le déclenchement des fissures s'effectue toujours, en premier lieu, sur les dallâtes conservées à l'extérieur du laboratoire et avec une évolution plus rapide ;
- Les largeurs des fissures des dallâtes conservées à l'intérieur ont diminué d'environ 66% par rapport à celles conservées à l'extérieur ;
- L'introduction du superplastifiant a beaucoup réduit l'évolution de la fissuration, en enregistrant un taux de diminution de la fissuration de 50% en longueur et 66% en largeur ;
- Le traitement des dallâtes conservées à l'extérieur, par la cure a lui aussi ralenti l'évolution des fissures d'environ 40% et 50% en longueur et en largeur, respectivement. Cette diminution est limitée à 50% en largeur pour les dallâtes conservées à l'intérieur.

▪ **Selon la méthode Dreux-Gorisse :**

✓ Les bétons témoins :

- Avec 100%SD, entre bétons très plastiques et plastiques présentent en mode de conservation extérieur, une diminution de 25%. En mode intérieur, aucune fissure n'a été constatée.
- En comparaison avec la méthode Faury, la méthode Dreux-Gorisse et en mode extérieur, une diminution de 47% en largeur des fissures a été enregistrée. Elle atteint, en mode intérieur 100%.
- Le béton contenant 80%SD a marqué une réduction des fissures en largeur de 50% pour un béton très plastique et de 66% pour un béton plastique, par rapport au béton à 100%SD en mode extérieur de laboratoire, et en mode intérieur pas de fissure.
- Un béton à 60%SD, de consistances très plastique et plastique et en mode extérieur, a montré une réduction de largeur des fissures de 25% et de 66%, respectivement. En mode de conservation intérieur, aucune fissure n'a été constatée.

✓ Les bétons avec superplastifiant :

- Les bétons très plastiques et plastiques avec 100%SD, 80%SD et 60%SD et en modes de conservation extérieure et intérieure, contenant le superplastifiant, n'enregistrent aucune trace de fissures dans les dallâtes. En comparaison avec les bétons formulés selon la méthode Faury, il y a réduction de la fissuration, mais cette dernière continue à se développer, même avec les mêmes dosages et les mêmes conditions.

✓ Les bétons traités par la cure

- Entre les bétons très plastiques et plastiques avec 100%SD, les fissures ont diminué en largeur de 25% et 33% respectivement en mode extérieur, et en mode intérieur n'ont pas marqué des fissures. Pour les autres bétons à des taux de 80%SD et 60%SD, il n'y a pas d'amélioration vis-à-vis de la fissuration.

Cette thèse nous a permis de mettre en évidence les différents paramètres et facteurs régissant l'apparition des fissures, leur évolution et les valeurs quantitatives et qualitatives de ces fissures.

Notre étude a été menée sur des bétons élaborés en laboratoire avec des éprouvettes d'essais conditionnées dans un climat aride. Nous avons pu justifier le phénomène de fissuration précoce ainsi que les paramètres d'étude qui ont pu atténuer le développement de la fissuration et parfois l'arrêter.

Dans un objectif de validité des résultats obtenus et pour permettre une comparaison suffisamment justifiée, nous avons jugé utile d'élaborer les différents bétons selon les deux méthodes universellement connues, en l'occurrence la méthode Faury et la méthode Dreux-Gorrise. Notre programme de recherche majoritairement expérimental nous a permis d'optimiser la formulation du béton, en zone aride, vis-à-vis de ses propriétés mécaniques et du phénomène de fissuration.

Perspectives :

Le présent travail scientifique de recherche ne peut être exhaustif que si dans un très proche avenir, nous aurions le temps et les moyens pour pouvoir mieux cerner d'autres paramètres tels que :

- Effectuer une simulation théorique et numérique afin d'aboutir à un paramétrage ou à une modélisation, nous permettant d'arriver à des conclusions suffisamment justifiées sans procéder à une multitude d'essais lourds avec toutes les imprécisions qui en découlent.
- Analyser le phénomène de fissuration en variant le diamètre maximal de granulats D_{\max} 25 et D_{\max} 8.
- Analyser le phénomène de fissuration avec d'autres types de bétons (autoplaçant, de fibres etc.).
- Suivre la période de contrôle des fissures jusqu'au durcissement total du béton.

Références bibliographiques :

- [1] F. Ghomari, A. Bezzar, et C. Abdellaoui, “Study of the transfer of metallic elements through sand/bentonite layers,” in *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 2012, vol. 16, no. SUPPL. 1, doi: 10.1080/19648189.2012.682444.
- [2] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, L. Baquerizo, et P. Lura, “Susceptibility of Portland cement and blended cement concretes to plastic shrinkage cracking,” *Cem. Concr. Compos.*, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.002.
- [3] M. Kayondo, R. Combrinck, et W. P. Boshoff, “State-of-the-art review on plastic cracking of concrete,” *Construction and Building Materials*. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.197.
- [4] M. A. Sanjuán et R. D. Tolêdo Filho, “Effectiveness of crack control at early age on the corrosion of steel bars in low modulus and coconut fibre-reinforced mortars,” *Cem. Concr. Res.*, 1998, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00003-9.
- [5] G. Festa, J et Dreux, *Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants*, Eyrolles. Paris, 1998.
- [6] S. Ouali, A. Khellaf, et E. K. Baddari, “Etude des ressources géothermiques du sud algérien,” *Rev. des Energies Renouvelables*, vol. 10, no. May 2014, pp. 3–407, 2007, [Online]. Available: http://www.cder.dz/download/Art10-3_10.pdf.
- [7] C. A. Shaeles et K. C. Hover, “Influence of mix proportions and construction operations on plastic shrinkage cracking in thin slabs,” *ACI Mater. J.*, vol. 85, no. 6, pp. 495–504, Nov. 1988, doi: 10.14359/2242.
- [8] J. Abel et K. Hover, “Effect of water/cement ratio on the early age tensile strength of concrete,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1610, pp. 33–38, 1998, doi: 10.3141/1610-06.
- [9] N. Banthia et R. Gupta, “Plastic shrinkage cracking in cementitious repairs and overlays,” *Mater. Struct. Constr.*, 2009, doi: 10.1617/s11527-008-9403-9.
- [10] P. J. Uno, “Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas,” *ACI Mater. J.*, vol. 95, no. 4, pp. 365–375, Jul. 1998, doi: 10.14359/379.
- [11] A. A. Almusallam, M. Maslehuddin, M. Abdul-Waris, et M. M. Khan, “Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments,” *Constr. Build. Mater.*, 1998, doi: 10.1016/S0950-0618(98)00019-1.
- [12] H. G. Kwak et S. J. Ha, “Plastic shrinkage cracking in concrete slabs. Part II: Numerical experiment and prediction of occurrence,” *Mag. Concr. Res.*, 2006, doi: 10.1680/mac.2006.58.8.517.
- [13] A. Rajabather, “Investigation of cracks in buildings,” *Forensic Struct. Eng.*, 2016.
- [14] A. Mohan et S. Poobal, “Crack detection using image processing: A critical review and analysis,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 2, pp. 787–798, 2018.
- [15] W. O. Ajagbe et O. S. Ojedele, “Structural investigation into the causes of cracks in building and solutions: A case study,” *Am. J. Eng. Res.*, vol. 7, no. 8, pp. 152–160, 2018.
- [16] B. Das, K. Umnag, et G. Murthy, “Study on Causes of Cracks and Its Preventive Measures in Concrete Structures of CCEM Building, Raipur,” *Int. J. Archit. Plan.*, vol. 1, no. 1, pp. 30–36, 2021.
- [17] C. J. Chitte et Y. N. Sonawane, “Study on Causes and Prevention of Cracks in Building,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 453–461, 2018.
- [18] T. Shiotani et D. G. Aggelis, “Determination of surface crack depth and repair effectiveness using Rayleigh waves,” *Fract. Mech. Concr. Struct. Assess. Retrofit. RC Struct. Taylor Fr. London, UK*, pp. 1011–1018, 2007.
- [19] E. A. Jiya, N. S. N. Anwar, et M. Z. Abdullah, “Detection of cracks in concrete structure using microwave imaging technique,” *Int. J. Microw. Sci. Technol.*, vol. 2016, 2016.
- [20] F. Andrews-Phaedonos, “Technical Bulletin TB 51, Guide to the Assessment,

- Maintenance and Rehabilitation of Concrete Bridges,” *VicRoads, Melb.*, 2010.
- [21] W. Party, “Non-structural cracks in concrete,” *Rep. a Concr. Soc. Work. Party (The Concr. Soc. London, 1986) pp*, pp. 1–38, 1992.
- [22] C. J. Larosche, “Types and causes of cracking in concrete structures,” in *Failure, distress and repair of concrete structures*, Elsevier, 2009, pp. 57–83.
- [23] H. Ziari, S. J. Vaziri Kang Oleyaei, et H. Fazaeli, “Investigation of the Effect of Different Climate Conditions on the Temporal Characteristic of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Pavements,” *Amirkabir J. Civ. Eng.*, vol. 53, no. 11, p. 16, 2022.
- [24] J. Guo *et al.*, “Mineral Additives to Enhance Early-Age Crack Resistance of Concrete under a Large-Temperature-Difference Environment,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 19, p. 9338, 2021.
- [25] A. M. Neville, *Properties of concrete*, vol. 4. Longman London, 1995.
- [26] D. Basham, J. Wright, K. Ferguson, et G. Moy, “Concrete crack and partial-depth spall repair,” *US Dep. Def.*, 2001.
- [27] D. P. Bentz, “A review of early-age properties of cement-based materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 196–204, 2008.
- [28] J. Stark, “Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 666–678, 2011.
- [29] J. H. Kim, R. P. Ferron, et S. P. Shah, “Fresh concrete and its significance for sustainability,” *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 16–23, 2012.
- [30] K. Kovler et N. Roussel, “Properties of fresh and hardened concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 775–792, 2011.
- [31] M. Nehdi et A. M. Soliman, “Early-age properties of concrete: overview of fundamental concepts and state-of-the-art research,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Mater.*, vol. 164, no. 2, pp. 57–77, 2011.
- [32] H. W. Reinhardt, “Characterization of fresh and early age concrete using NDT,” in *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, Springer, 2013, pp. 407–421.
- [33] H. Mihashi et J. P. de B. Leite, “State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 141–154, 2004.
- [34] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, M. Plamondon, and P. Lura, “On the mechanism of plastic shrinkage cracking in fresh cementitious materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 115, no. May, pp. 251–263, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.10.015.
- [35] M. Emborg et S. Bernander, “Assessment of risk of thermal cracking in hardening concrete,” *J. Struct. Eng.*, vol. 120, no. 10, pp. 2893–2912, 1994.
- [36] B. Klemczak et A. Knoppik-Wróbel, “Early age thermal and shrinkage cracks in concrete structures—description of the problem,” *Archit. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 35–48, 2011.
- [37] N. F. EN, “196-3/IN1-Méthodes d’essais des ciments-Partie 3: détermination du temps de prise et de la stabilité,” *Norme française, AFNOR*, 2009.
- [38] E. E. Holt, “Early age autogenous shrinkage of concrete,” *VTT Publ.*, no. 446, 2001.
- [39] E. Holt et M. Leivo, “Cracking risks associated with early age shrinkage,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 5, pp. 521–530, 2004.
- [40] R. J. Frosch et S. Jeffrey, “Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures,” *Am. Concr. Institute. Farmingt. Hills*, 2007.
- [41] J. E. Hiller et J. R. Roesler, “Determination of critical concrete pavement fatigue damage locations using influence lines,” *J. Transp. Eng.*, vol. 131, no. 8, pp. 599–607, 2005.
- [42] M. A. Issa, “Investigation of cracking in concrete bridge decks at early ages,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 116–124, 1999.
- [43] M. Safiuddin, A. B. M. A. Kaish, C. O. Woon, et S. N. Raman, “Early-age cracking in concrete: Causes, consequences, remedial measures, and recommendations,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 10, 2018, doi: 10.3390/app8101730.

- [44] T. Meagher, N. Shanahan, D. Buidens, K. A. Riding, et A. Zayed, “Effects of chloride and chloride-free accelerators combined with typical admixtures on the early-age cracking risk of concrete repair slabs,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 270–279, 2015.
- [45] P. M. Hoby, A. S. Santhi, et G. M. Ganesh, “An experimental study on the strength and corrosion of blended cement concrete exposed to seawater in an arid region,” *J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 25, no. 6, pp. 1075–1085, 2022.
- [46] J. Branch, D. J. Hannant, et M. Mulheron, “Factors affecting the plastic shrinkage cracking of high-strength concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 54, no. 5, pp. 347–354, 2002.
- [47] E. Holt, “Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 464–472, 2005.
- [48] D. Nguyen et V. Dao, “Tensile properties of early-age concrete,” in *Proceedings of the 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in conjunction with the 69th RILEM Week, Melbourne, Australia*, 2015, pp. 1314–1324.
- [49] Z. P. Bažant, G. Cusatis, et L. Cedolin, “Temperature effect on concrete creep modeled by microprestress-solidification theory,” *J. Eng. Mech.*, vol. 130, no. 6, pp. 691–699, 2004.
- [50] Z. P. Bažant, A. B. Hauggaard, S. Baweja, et F.-J. Ulm, “Microprestress-solidification theory for concrete creep. I: Aging and drying effects,” *J. Eng. Mech.*, vol. 123, no. 11, pp. 1188–1194, 1997.
- [51] G. Pickett, “The effect of change in moisture-content on the crepe of concrete under a sustained load,” in *Journal Proceedings*, 1942, vol. 38, pp. 333–356.
- [52] Z. P. Bažant et X. I. Yunping, “Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms,” *Mater. Struct.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–14, 1994.
- [53] G. De Schutter et L. Taerwe, “Specific heat and thermal diffusivity of hardening concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 47, no. 172, pp. 203–208, 1995.
- [54] Y. Wei et W. Hansen, “Tensile creep behavior of concrete subject to constant restraint at very early ages,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 9, pp. 1277–1284, 2013.
- [55] M. A. Issa, A. A. Yousif, et M. A. Issa, “Effect of construction loads and vibrations on new concrete bridge decks,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 249–258, 2000.
- [56] G. De Schutter et L. Taerwe, “Estimation of early-age thermal cracking tendency of massive concrete elements by means of equivalent thickness,” *Mater. J.*, vol. 93, no. 5, pp. 403–408, 1996.
- [57] F.-J. Ulm et O. Coussy, “What is a ‘massive’ concrete structure at early ages? Some dimensional arguments,” *J. Eng. Mech.*, vol. 127, no. 5, pp. 512–522, 2001.
- [58] S. Harsh et D. Darwin, “Effects of traffic induced vibrations on bridge deck repairs,” University of Kansas Center for Research, Inc., 1984.
- [59] F. H. Dakhil, P. D. Cady, et R. E. Carrier, “Cracking of fresh concrete as related to reinforcement,” in *Journal Proceedings*, 1975, vol. 72, no. 8, pp. 421–428.
- [60] P. Lura, K. van Breugel, et I. Maruyama, “Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 12, pp. 1867–1872, 2001.
- [61] F. Massazza, “Pozzolanic cements,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 15, no. 4, pp. 185–214, 1993.
- [62] X. Liu, Y. Yuan, et Q. Su, “Sensitivity analysis of the early-age cracking risk in an immersed tunnel,” *Struct. Concr.*, vol. 15, no. 2, pp. 179–190, 2014.
- [63] D. P. Bentz, G. Sant, et J. Weiss, “Early-age properties of cement-based materials. I: Influence of cement fineness,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 7, pp. 502–508, 2008.
- [64] A. M. Raximov, X. L. Alimov, A. A. To’xtaboev, B. A. Mamadov, et K. K. Mo’minov, “Heat And Humidity Treatment Of Concrete In Hot Climates,” *Int. J. Progress. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 312–319, 2021.

- [65] J. P. Rizzuto *et al.*, “Effect of self-curing admixture on concrete properties in hot climate Conditions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 261, p. 119933, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119933.
- [66] J. D. Dippenaar, “The tensile properties of early age concrete and the experimental apparatus required for its determination.” Stellenbosch: Stellenbosch University, 2015.
- [67] S. Igarashi, A. Bentur, et K. Kovler, “Stresses and creep relaxation induced in restrained autogenous shrinkage of high-strength pastes and concretes,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 11, no. 4, pp. 169–177, 1999.
- [68] M. Sule et K. van Breugel, “Cracking behaviour of reinforced concrete subjected to early-age shrinkage,” *Mater. Struct.*, vol. 34, no. 5, pp. 284–292, 2001.
- [69] R. Cortas, E. Rozière, S. Staquet, A. Hamami, A. Loukili, et M.-P. Delplancke-Ogletree, “Effect of the water saturation of aggregates on the shrinkage induced cracking risk of concrete at early age,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 50, pp. 1–9, 2014.
- [70] E. E. Holt, “Early age autogenous shrinkage of concrete,” *VTT Publ.*, no. 446, 2001.
- [71] C. Hua, A. Ehrlacher, et P. Acker, “Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste II. Modelling at scale of hydrating grains,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 2, pp. 245–258, 1997.
- [72] C. MacInnis et P. W. Kosteniuk, “Effectiveness of revibration and high-speed slurry mixing for producing high-strength concrete,” in *Journal Proceedings*, 1979, vol. 76, no. 12, pp. 1255–1265.
- [73] K. P. Akins et D. E. Dixon, “Concrete structures and construction vibrations,” *Spec. Publ.*, vol. 60, pp. 213–249, 1979.
- [74] A. Ansell et J. Silfwerbrand, “The vibration resistance of young and early-age concrete,” *Struct. Concr.*, vol. 4, no. 3, pp. 125–134, 2003.
- [75] D. Shen, J. Jiang, J. Shen, P. Yao, et G. Jiang, “Influence of curing temperature on autogenous shrinkage and cracking resistance of high-performance concrete at an early age,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 103, pp. 67–76, 2016.
- [76] D. Shen, J. Jiang, W. Wang, J. Shen, et G. Jiang, “Tensile creep and cracking resistance of concrete with different water-to-cement ratios at early age,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 410–418, 2017.
- [77] W. C. Krell, “Effect of Coal Mill Vibration on Fresh Concrete concrete bration on fresh,” *Concr. Int.*, vol. 1, no. 12, pp. 31–34, 1979.
- [78] C. Hua, P. Acker, et A. Ehrlacher, “Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste: I. Modelling at macroscopic scale,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 7, pp. 1457–1468, 1995.
- [79] J. P. Charron, B. Zuber, J. Marchand, B. Bissonnette, et M. Pigeon, “Influence of temperature on the early-age behavior of concrete,” in *Proceedings of the International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering: A Tribute to Arnon Bentur, Evanston, IL, USA*, 2004, vol. 24.
- [80] B. H. Oh, S. C. Choi, et S. W. Cha, “Temperature and relative humidity analysis in early-age concrete decks of composite bridges,” in *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, Springer, 2006, pp. 305–316.
- [81] M. Briffaut, F. Benboudjema, J. M. Torrenti, et G. Nahas, “Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behavior of massive concrete structures,” *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 4, pp. 1390–1401, 2011.
- [82] M. A. Mustafa et K. M. Yusof, “Mechanical properties of hardened concrete in hot-humid climate,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 21, no. 4, pp. 601–613, 1991.
- [83] D. Cusson et W. L. Repette, “Early-age cracking in reconstructed concrete bridge barrier walls,” *ACI Mater. Journal-American Concr. Inst.*, vol. 97, no. 4, pp. 438–446, 2000.
- [84] D. G. Manning, “Effects of traffic-induced vibrations on bridge-deck repairs,” *NCHRP*

- Synth. Highw. Pract.*, no. 86, 1981.
- [85] K. Van Breugel, "Self-healing material concepts as solution for aging infrastructure," in *37th conference on our world in concrete and structures (OWICS 2012)*, Singapore, Singapore, 2012, pp. 89–103.
- [86] G. De Schutter, "Durability of marine concrete structures damaged by early age thermal cracking," in *International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, Cannes, Oct. 2000, RILEM Proceedings PRO16 (Ed. D. Naus)*, 2000, pp. 185–194.
- [87] H. Ba, A. Su, X. Gao, et Q. Tao, "Cracking tendency of restrained concrete at early ages," *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.*, vol. 23, no. 2, pp. 263–267, 2008.
- [88] H. Huang, G. Ye, C. Qian, et E. Schlangen, "Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions," *Mater. Des.*, vol. 92, pp. 499–511, 2016.
- [89] S. V. Kumar et H. V. S. GangaRao, "Fatigue response of concrete decks reinforced with FRP rebars," *J. Struct. Eng.*, vol. 124, no. 1, pp. 11–16, 1998.
- [90] R. De Borst et A. H. Van den Boogaard, "Finite-element modeling of deformation and cracking in early-age concrete," *J. Eng. Mech.*, vol. 120, no. 12, pp. 2519–2534, 1994.
- [91] D. J. Hannant, J. Branch, et M. Mulheron, "Equipment for tensile testing of fresh concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 51, no. 4, pp. 263–267, 1999.
- [92] Z. Bayasi et M. McIntyre, "Application of fibrillated polypropylene fibers for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete," *Mater. J.*, vol. 99, no. 4, pp. 337–344, 2002.
- [93] O. Esping, "Early age properties of self-compacting concrete— Effects of fine aggregate and limestone filler," 2007.
- [94] P. Tattersall, G.H. et Banfill, *The rheology of fresh concrete*. 1983.
- [95] D. Mindess, S., Young, F. J., & Darwin, *Concrete*, 2nd Editio. 2003.
- [96] P. Renaud, S. Chartier, et D. Kaufman, *Properties of concrete by A.M. Neville*. 2008.
- [97] I. Esping, O. et Löfgren, "Cracking due to plastic and autogenous shrinkage— Investigation of early age deformation of self-compacting concrete—Experimental study." Chalmers University of Technology, Sweden, 2005.
- [98] Y. Kasai, K. Vokoyama, et I. Matsui, "Tensile properties of early-age concrete," in *Proceedings of Conference on Mechanical Behaviour of Materials.*, 1972, no. Conf Paper.
- [99] L. F. Gillemot, "Criterion of crack initiation and spreading," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 8, no. 1, 1976, doi: 10.1016/0013-7944(76)90089-8.
- [100] J. Branch, A. Rawling, D. J. Hannant, et M. Mulheron, "The effects of fibres on the plastic shrinkage cracking of high strength concrete," *Mater. Struct.*, vol. 35, no. 3, pp. 189–194, 2002.
- [101] S. Swaddiwudhipong, H.-R. Lu, et T.-H. Wee, "Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 12, pp. 2077–2084, 2003.
- [102] V. T. Dao, P. F. Dux, P. H. Morris, C. Chau, X. Li, et Z. Li, "Tensile properties of early-age concrete," in *Concrete Durability: Achievement and Enhancement, Proceedings of the International Congress Concrete: Construction's Sustainable Option, Dundee, UK*, 2008, vol. 4, p. 469.
- [103] P. H. Morris et P. F. Dux, "Analytical solutions for bleeding of concrete due to consolidation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 10, pp. 1531–1540, 2010.
- [104] W. P. Boshoff et R. Combrinck, "Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 48, pp. 34–39, 2013.
- [105] V. Slowik, M. Schmidt, et R. Fritzsich, "Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 7,

- pp. 557–565, 2008.
- [106] M. Schmidt et V. Slowik, “Instrumentation for optimizing concrete curing,” *Concr. Int.*, vol. 35, no. 8, pp. 60–64, 2013.
- [107] P. Lura, B. Pease, G. B. Mazzotta, F. Rajabipour, et J. Weiss, “Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks,” *ACI Mater. J.*, 2007, doi: 10.14359/18582.
- [108] A. Leemann, P. Nygaard, et P. Lura, “Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.002.
- [109] V. Slowik et M. Schmidt, “Early age cracking and capillary pressure controlled concrete curing,” *Adv. Cem. Mater.*, vol. 126, pp. 229–234, 2010.
- [110] A. Radocea, “A model of plastic shrinkage,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 46, no. 167, pp. 125–132, 1994.
- [111] D. ACI, “305R-hot weather concreting,” *Am. Concr. Inst. Int.*, 1999.
- [112] A. A. Almusallam, M. Abdul-Waris, M. Maslehuddin, et A. S. Al-Gahtani, “Placing and shrinkage at extreme temperatures,” *Concr. Int.*, vol. 21, no. 1, pp. 75–79, 1999.
- [113] F. Sayahi, M. Emborg, et H. Hedlund, “Plastic shrinkage cracking in concrete: State of the art,” *Nord. Concr. Res.*, vol. 51, pp. 95–110, 2014.
- [114] P. J. Uno, N. Banthia, et R. Gupta, “Plastic shrinkage cracking in cementitious repairs and overlays,” *ACI Mater. J.*, 1998, doi: 10.14359/379.
- [115] D. Bloem, “Plastic cracking of concrete,” *Eng. Inf.*, 1960.
- [116] W. Lerch, “Plastic shrinkage,” in *Journal Proceedings*, 1957, vol. 53, no. 2, pp. 797–802.
- [117] C. A. Menzel, “Causes and prevention of crack development in plastic concrete,” 2008.
- [118] F. Sayahi, M. Emborg, et H. Hedlund, “Plastic Shrinkage Cracking in Concrete – Influence of Test Methods,” *2nd Int. RILEM/COST Conf. Early Age Crackinh Serv. Cem. Mater. Struct. - EAC2*, 2017.
- [119] P. C. Carman, “Capillary rise and capillary movement of moisture in fine sands,” *Soil Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 1–14, 1941.
- [120] M. D. Cohen, J. Olek, et W. L. Dolch, “Mechanism of plastic shrinkage cracking in portland cement and portland cement-silica fume paste and mortar,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, no. 1, pp. 103–119, 1990.
- [121] V. T. N. Dao, P. F. Dux, P. H. Morris, et L. O’Moore, “Plastic shrinkage cracking of concrete,” *Aust. J. Struct. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 207–214, 2010.
- [122] F. Sayahi, M. Emborg, H. Hedlund, et I. Löfgren, “Plastic shrinkage cracking in self-compacting concrete: a parametric study,” *MSSCE2016 RILEM*, vol. 22082016, pp. 609–619, 2016.
- [123] I. Löfgren, O. Esping, O. Jensen, P. Lura, et K. Kovler, “Early age cracking of self-compacting concrete,” in *Int. RILEM Conf. Vol. Chang. Hardening Concr. Test. Mitigation* Lyngby, 2006, pp. 251–260.
- [124] S. E. Pihlajavaara, “A review of some of the main results of a research on the ageing phenomena of concrete: Effect of moisture conditions on strength, shrinkage and creep of mature concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 4, no. 5, pp. 761–771, 1974.
- [125] A. ASTM C1579, “Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete.” UNITED STATES: ASTM INTERNATIONAL, 2012.
- [126] F. Sayahi, M. Emborg, H. Hedlund, et Y. Ghasemi, “Experimental Validation of a Novel Method for Estimating the Severity of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete,” *Available SSRN 3990729*, 2021.
- [127] A. Hufty, *Introduction à la climatologie: le rayonnement et la température*,

- l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine*. Presses Université Laval, 2001.
- [128] Wikipedia.org, "Wikipedia.org," *William Howard Taft*. 2005.
- [129] B. Lecoquierre, *Le Sahara, un désert mondialisé*. 2015.
- [130] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, et F. Rubel, "World map of the Köppen-Geiger climate classification updated," *Meteorol. Zeitschrift*, 2006, doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- [131] WorldWeatherOnline, "World Weather Online," *WorldWeatherOnline*. 2012.
- [132] E. N. 933-8, "Tests for geometrical properties of aggregates, Part 8: Assessment of fines, Sand equivalent test," *Eur. Stand. ICS 91.100.15, Eur. Comm. Stand.*, 2012.
- [133] NA. 5042, "Méthodes d'essais des ciments, analyse chimique des ciments," 2007.
- [134] A. Moulay-Ali, M. Abdeldjalil, et H. Khelafi, "An experimental study on the optimal compositions of ordinary concrete based on corrected dune sand—Case of granular range of 25 mm," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 14, p. e00521, 2021.
- [135] NF P 18-560, "Analyse granulométrique par tamisage," 1990.
- [136] NF P18-304, "Granulométrie des granulats," 1973.
- [137] N. E. 1744-1, "Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats Partie 1 : Analyse chimique," 1998.
- [138] X. 18-591, "Détermination de la propreté superficielle," 1990.
- [139] N. E. 1097-6, "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," 2001.
- [140] N. E. 1097-5, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 5 : Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve," 1999.
- [141] N. E. 1097-2, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation," 1998.
- [142] N. E. 1097-1/A1, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats Partie 1 : Détermination de la résistance à l'usure (microDeval)," 2004.
- [143] N. E. 1097-3, "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," 1998.
- [144] NF EN 12620, "Granulats pour béton," 2003.
- [145] EN 934-2: 2009 + A1:2012, "Admixtures for concrete, mortar and grout – Part 2: Concrete admixtures – Définitions, requirements, conformity, marking and labelling," 2012.
- [146] NF P18-370, "Admixtures - Curing products for concrete and mortar - Definition, specifications and marking - Adjuvants," 2013.
- [147] X. S. Xie, F. Tian, et Y. H. Hong, "Experimental investigation into the impact of polypropylene fibers and SRA on the early crack resistance of concrete," 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.194-196.858.
- [148] M. Sirajuddin et R. Gettu, "Plastic shrinkage cracking of concrete incorporating mineral admixtures and its mitigation," *Mater. Struct. Constr.*, 2018, doi: 10.1617/s11527-018-1173-4.
- [149] P. min Zhan et Z. hai He, "Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review," *Construction and Building Materials*. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.209.
- [150] NA. 5102, "Essais pour béton frais, Essai d'affaissement," 2013.
- [151] NA. 2600, "Béton- Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques," p. 3, 1992.
- [152] NA. 2598, "Bétons- Mise en place par microtable vibrante," p. 6, 1992.
- [153] NA. 5093, "Essai pour béton durci. Confection et conservation des éprouvettes pour

- essais de résistance,” p. 7, 2007.
- [154] N. 427, “No Title Béton-Détermination de la résistance à la compression des éprouvettes,” p. 5, 1989.
- [155] ASTM, “C1579-13. Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert).,” *ASTM Int. - Am. Soc. Test. Mater.*, 2013, doi: 10.1520/C1579-13.2.
- [156] S. Ghourchian, M. Wyrzykowski, L. Baquerizo, et P. Lura, “Performance of passive methods in plastic shrinkage cracking mitigation,” *Cem. Concr. Compos.*, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.05.008.
- [157] P. Lura, “Evaporation, settlement, temperature evolution, and development of plastic shrinkage cracks in mortars with shrinkage-reducing admixtures,” 2006, doi: 10.1617/291214390x.023.
- [158] EN 934-2/A2:2006, “Admixtures For Concrete, Mortar And Grout - Part 2: Concrete Admixtures - Definitions, Requirements, Conformity, Marking And Labelling No Title,” 2006.
- [159] NF EN 13670, “Exécution des ouvrages en béton,” 2013.
- [160] J Faury, *Concrete*, 3rd ed. France, 1958.
- [161] NF P18-451, “Bétons-essai d’affaissement,” 1981.
- [162] N. B. O. Safer, N. Belas, K. Belguesmia, O. Belaribi, A. Mebrouki, “Influence de l’incorporation de la vase du barrage Chorfa sur les performances mécaniques des bétons ordinaires,” *Alger. J. Env. Sc. Technol.*, vol. 3:3-A, pp. 478–484, 2017.