



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



## Université Amar Thelidji Laghouat

FACULTÉ DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE  
DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL

### MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : BENTABET MARIA  
LADJAL MERIEM IKRAM

DOMAINE : Sciences et technologies

FILIERE : Génie civil

OPTION : Matériaux de Génie Civil

### Thème

**Prédiction des propriétés physico-mécaniques  
des mortiers de réparation à base des matériaux  
locaux par des modèles numériques**

#### Jury de soutenance :

<u>Nom et prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Qualité</u>
Tadj Walid	MCB	Président
Merrah Ahmed	MCA	Examineur
Krobba Benharzallah	MCB	Encadreur
Lakhdari Mohammed Fatah	MAA	Invité

Promotion : Septembre 2021



## *Remerciements*

*Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*Nos vifs remerciements à notre encadreur Mr KROBBA Ben harzallah, pour sa patience, sa disponibilité, son encouragement et surtout son aide et ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.*

*Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements à Mr Merrah Ahmed et Mr Tadj Walid, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse.*

*Nos grands remerciements vont également à l'ensemble du personnel du Bibliothèque de l'Université de Laghouat, pour leurs aides et leur disponibilité.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Veillez trouver dans ce travail l'expression de notre respect le plus profond et notre affection la plus sincère.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes parents qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mon frère Mohamed et mon adorable petite sœur Manal*

*A mon médecin Dr. delilech qui m'a apporté de la lumière là où tout était sombre*

*A ma chère tante Loli pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études*

*A l'âme de mon oncle Mohamed Adî que dieu l'accueille en son vaste paradis*

*A mes meilleurs cousines Noor et fazou*

*A mes chères amies Rym, Manel et Safa*

*A ma binôme Maria et sa famille*

*A toute la famille Ladjal et Adî*



*Meriem Ikram*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi « mon père ».*

*À la femme parfaite, celle que je respecte et que j'aime énormément à toi «ma mère».*

*Mes chers frères et mes chers sœur **Abderrahman, Fatima zahra, Hassan et Farah** pour leur soutien et encouragement.*

*À mon âme sœur et meilleure amie **Nadjet**, merci d'être toujours là pour moi.*

*À mes cousines **Imane et Ryma** pour leur écoute et leurs soutiens moraux.*

*À ma binôme **Ikram** et Sa famille.*

*À tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès*

*À toute la famille Bentabet et Bouaicha .*

*À tous ceux que j'aime.*



***Maria Bentabet***

## ملخص

تعتبر مونة الإصلاح ذاتية التموضع، كمنتجات بتقنية جديدة ، مفضلة بشكل خاص لإعادة تأهيل وإصلاح الهياكل الخرسانية المسلحة . قد تحقق قابلية التموضع الذاتي لملاط الإصلاح مزايا كبيرة في القوالب الضيقة. يقدم هذا العمل نهجًا إحصائيًا لتقييم تأثيرات أنواع ونسب مختلفة من الرمل على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمونة الإصلاح ذاتية التموضع.

في هذا السياق ، تم استخدام 15 خليطًا مختلفًا لتسليط الضوء على تأثيرات رمل الوديان SA ، رمل الحجر الكلسي SC ورمل الكتبان SD في توليفات ثنائية وثلاثية على مقاومة الانضغاط ، مقاومة الانثناء ، معامل المرونة والمسامية عند 7، 28 و 90 يومًا . تم إجراء التحليل الإحصائي للخطات المختلفة باستخدام برنامج JMP

النماذج الرياضية التي تم الحصول عليها مفيدة للغاية لتسليط الضوء على تأثيرات جميع التوليفات الممكنة من SA و SC و SD والتنبؤ بالخصائص الفيزيائية والميكانيكية وتقييم فعالية أنواع المونة المنتجة. تم تأكيد النتائج أيضًا من خلال المعلمات الإحصائية ومخططات الانحدار والتحليل المتبقي. كما تم الحصول على علاقات جيدة بين الخواص الفيزيائية والميكانيكية لمونة الإصلاح ذاتية التموضع.

**كلمات مفتاحيه :** مونة ذاتية التموضع ، التوافق، طريقة خطة الخط ، مقاومة ميكانيكية ، معامل المرونة ، المسامية ، رمل الوديان، رمل الحجر الكلسي، رمل الكتبان.

## Abstract

Self-compacting repair mortars (SCRM), as new technology products, are especially preferred for the rehabilitation and repair of reinforced concrete structures. The self-compactability of repair mortars may bring considerable advantages at narrow mould systems.

This work presents provides a statistical approach to evaluate the effects of different types and proportions of sand on the physic-mechanical properties of self-compacting repair mortar (SCRM). In this context, 15 mixture was used to highlight the effects of river sand (SA), crushed sand (SC) and dune sand (SD) in binary and ternary combinations on compressive strength, flexural strength, elastic modulus and porosity at 7, 28 and 90 days. The statistical analysis of the different combinations was performed using JMP software.

The obtained mathematical models are very useful to highlight the effects of all possible combinations of SA, SC and SD and to predict the physic-mechanical properties and evaluate the effectiveness of elaborated mortars. The results have also confirmed by statistical parameters, regression plots and residual analysis. Good relationships between SCC mortar physic-mechanical properties were also obtained.

**Key words:** Self-compacting mortar, Compatibility, Mixture design modeling method, mechanical strength, Porosity, Alluvial sand, Dune sand, Crushed sand.

## Résumé

Les mortiers autoplaçant (MAP), comme produits de nouvelle technologie, sont particulièrement préférés pour la réhabilitation et la réparation des structures en béton armé. L'auto-compactibilité des mortiers de réparation peut apporter des avantages considérables dans les systèmes de moules étroits.

Ce présent travail propose une approche statistique pour évaluer les effets de différents types et proportions de sable sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers de réparations (MRAP). Dans ce cadre, 15 mélanges ont été utilisés pour mettre en évidence les effets du sable alluvionnaire (SA), du sable concassé (SC) et du sable des dunes (SD) en combinaisons binaires et ternaires sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion, le module d'élasticité et la porosité à 7, 28 et 90 jours. L'analyse statistique des différentes combinaisons a été réalisée à l'aide du logiciel JMP.

Les modèles mathématiques obtenus sont très utiles pour mettre en évidence les effets de toutes les combinaisons possibles de SA, SC et SD, et pour prédire les propriétés physico-mécaniques et évaluer l'efficacité des mortiers élaborés. Les résultats ont été également confirmés par des paramètres statistiques, des graphiques de régression et une analyse résiduelle. De bonnes relations entre les propriétés physico-mécaniques des mortiers de réparation autoplaçant ont été également obtenues.

**Mots clés :** Mortier autoplaçant, Compatibilité, Méthode de plan de mélange, Résistances mécaniques, Porosité, Sable des dunes, Sable alluvionnaire, Sable calcaire



# *Table des matières*

# Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Introduction .....	4
I.2. Compatibilité .....	4
I.3. Compatibilité entre le matériau de réparation et le béton du substrat .....	5
I.4. Compatibilité deformationnelle.....	6
I.5. Facteurs influençant la compatibilité dimensionnelle .....	7
I.5.1. Module d'élasticité.....	7
I.5.2. Retrait .....	8
I.5.2.1. Retrait plastique.....	8
I.5.2.2. Retrait thermique .....	9
I.5.2.3. Retrait endogène.....	9
I.5.2.4. Retrait de séchage.....	9
I.5.3. Fluage .....	10
I.5.4. Dilatation thermique.....	10
I.6. L'adhérence.....	11
I.6.1. Définition de la force de liaison .....	11
I.6.2. Concept d'adhérence.....	11
I.6.3. Facteurs affectant la force d'adhésion.....	12
I.6.3.1. Propreté .....	12
I.6.3.2. Rugosité de surface .....	12
I.6.3.3. Mise en œuvre du matériau de réparation .....	13
I.6.4. Méthodes d'essai pour évaluer la force d'adhérence: .....	14
I.7. Réhabilitation des structures en béton.....	16
I.7.1. Causes de détérioration du béton.....	16
I.7.2. Processus d'une réparation .....	16
I.7.3. Types de matériaux de réparation.....	18

I.8.	Constituants de mortier hydraulique .....	19
I.8.1.	Ciment .....	19
I.8.2.	Le sable.....	19
I.8.2.1.	Sable alluvionnaire .....	19
I.8.2.1.	Sable de dune.....	20
I.8.2.2.	Sable calcaire.....	20
I.8.3.	Eau de gâchage.....	21
I.9.	L'effet des constituants sur les performances d'un mortier hydraulique : .....	21
I.9.1.	Résistance mécanique.....	21
I.9.2.	Retrait .....	23
I.9.3.	Absorption d'eau par capillarité.....	24
I.9.4.	Module d'élasticité .....	25
I.10.	Corrélation entre les propriétés physico-mécaniques du béton ou du mortier de ciment.....	25
I.10.1.	Relation entre la résistance à la compression et la résistance a la flexion.....	25
I.10.2.	Relation entre la porosité et les résistances mécaniques .....	27
I.10.3.	Relation entre résistance à la compression et le module d'élasticité .....	31
I.11.	Conclusion:.....	32
II.1.	Introduction .....	34
II.2.	Plan de mélange.....	34
II.3.	Contrainte fondamentale des mélanges .....	35
II.4.	Représentation géométrique des mélanges.....	36
II.4.1.	Mélange a deux constituants .....	36
II.4.2.	Lecture du diagramme des mélanges binaires.....	37
II.4.3.	Lecture du diagramme des mélanges ternaires.....	38
II.5.	Domaine expérimental et domaine d'étude.....	40
II.6.	Modèles mathématiques .....	41
II.6.1.	Plans de mélanges classiques .....	42
II.6.2.	Plans en réseaux .....	42
II.7.	Applications de plan de mélange.....	44
II.8.	Conclusion:.....	48
III.1.	Introduction .....	50
III.2.	Modélisation des résultats trouvés par le plan de mélanges .....	50
III.3.	Résistances à la compression .....	53
III.4.	Résistances à traction par flexion.....	58
III.5.	Module d'élasticité .....	63
III.6.	Porosité.....	68

III.7.	Corrélation entre les propriétés des mortiers élaborés.....	74
III.7.1.	Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion.....	74
III.7.2.	Relation entre le module d'élasticité et la résistance à compression .....	75
III.7.3.	Relation entre la résistance à la compression et la porosité .....	76
III.7.4.	Relation entre la porosité et le module d'élasticité .....	77

## Liste des Figures

<b>Figure I.1 :</b> Les différents types de compatibilité et les principaux facteurs qui influencent la compatibilité déformationnelle	<b>6</b>
<b>Figure I.2 :</b> Effets d'une inadéquation des modules élastiques. (a) Charge parallèle à l'interface (b) Charge perpendiculaire à l'interface	<b>7</b>
<b>Figure I.3 :</b> Représentation schématique induite par le retrait empêché dans les réparations	<b>8</b>
<b>Figure I.4 :</b> Déformation endogène de la pâte de ciment	<b>9</b>
<b>Figure I.5 :</b> Principes de la théorie de l'adhésion	<b>11</b>
<b>Figure I.6 :</b> Modèle des profils de surface CSP	<b>13</b>
<b>Figure I.7 :</b> Procédure de vibration typique d'un matériau de réparation	<b>13</b>
<b>Figure I.8 :</b> Effet de la durée de cure sur le développement de la résistance à la compression	<b>14</b>
<b>Figure I.9 :</b> Diverses méthodes d'essai pour évaluer la force de liaison à l'interface	<b>15</b>
<b>Figure I.10 :</b> Les trois principales étapes d'une bonne réparation	<b>17</b>
<b>Figure I.11 :</b> Système de réparation à trois phases	<b>18</b>
<b>Figure I.12 :</b> Résistance à la compression(a) et à la flexion(b) des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant	<b>22</b>
<b>Figure I.13 :</b> Retrait des différents mortiers étudiés	<b>23</b>
<b>Figure I.14 :</b> Influence du type de sable sur l'absorption capillaire a base de différente de sables	<b>24</b>
<b>Figure I.15 :</b> Corrélation entre les propriétés mécaniques des MAP en fonction de la période de cure initiale dans l'eau : (a) la résistance à la compression en fonction de VAS, (b) la Résistance à la flexion en fonction de la résistance à la compression	<b>26</b>
<b>Figure I.16 :</b> Conditions de cure pour le deuxième groupe d'éprouvettes	<b>26</b>

<b>FigureI.17:</b> Relation entre la résistance à la compression et à la flexion	<b>27</b>
<b>FigureI.18 :</b> Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité par différents modèles	<b>28</b>
<b>Figure I.19 :</b> Corrélation entre la résistance à la flexion et la porosité	<b>28</b>
<b>Figure I.20 :</b> Relation entre la résistance à la flexion prévue et observée	<b>29</b>
<b>Figure I.21 :</b> Relation entre la résistance à la flexion et à la compression	<b>29</b>
<b>Figure I.22 :</b> Relation entre la résistance à la compression et la porosité	<b>30</b>
<b>FigureI.23 :</b> Relation entre la porosité et la résistance à la compression du mortier	<b>31</b>
<b>FigureI.24 :</b> Relation entre la porosité et la résistance à la flexion du mortier	<b>31</b>
<b>FigureII.1 :</b> Représentation d'un mélange dans un système d'axes cartésiens	<b>36</b>
<b>FigureII.2 :</b> Les compositions des mélanges à deux constituants	<b>36</b>
<b>FigureII.3 :</b> Représentation des mélanges à deux constituants sur un segment de droite	<b>37</b>
<b>Figure II.4 :</b> Le mélange 1 contient 20% de A et 80% de B le mélange 2 contient 77% de A et 23% de B( Exemple de représentation des mélanges à deux constituants)	<b>38</b>
<b>Figure II.5:</b> Représentation des mélanges à trois constituants à l'aide d'un triangle équilatéral	<b>39</b>
<b>Figure II.6 :</b> L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse	<b>40</b>
<b>Figure II.7 :</b> Plan de mélanges de trois produits purs	<b>42</b>
<b>Figure II.8 :</b> Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié.	<b>43</b>
<b>Figure II.9 :</b> Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges $1/3-2/3$ et $1/3-1/3-1/3$	<b>44</b>

<b>Figure II.10</b> : Diagramme ternaire de SPD en fonction des proportions SR, SC et SD	<b>45</b>
<b>Figure II.11</b> : Diagramme ternaire de T500 en fonction des proportions SR, SC et SD	<b>46</b>
<b>Figure II.12</b> : Diagramme ternaire de J-ring en fonction des proportions SR, SC et SD.	<b>46</b>
<b>Figure II.13</b> : Diagrammes ternaires des la résistances mécaniques à la compression et la résistance a la flexion	<b>47</b>
<b>Figure II.14</b> : Diagrammes ternaires pour vitesse relative des entonnoirs et l'écoulement d'affaissement relatif	<b>48</b>
<b>Figure III.1</b> : Graphique ternaire de la résistance à la compression en fonction du dosage des différents types de sables à 7 jours	<b>54</b>
<b>Figure III.2</b> : Graphique ternaire de la résistance à la compression en fonction du dosage des différents types de sables à 28 jours	<b>54</b>
<b>Figure III.3</b> : Graphique ternaire de la résistance à la compression en fonction du dosage des différents types de sables à 90 jours	<b>55</b>
<b>Figures III.4</b> : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la compression	<b>56</b>
<b>Figures III.5</b> : Graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de la résistance à la compression	<b>58</b>
<b>Figure III.6</b> : Graphique ternaire de la résistance à la traction par flexion en fonction du dosage des différents types de sables à 7 jours	<b>59</b>
<b>Figure III.7</b> : Graphique ternaire de la résistance à la traction par flexion en fonction du dosage des différents types de sables à 28 jours	<b>60</b>
<b>Figure III.8</b> : Graphique ternaire de la résistance à la traction par flexion en fonction du dosage des différents types de sables à 90 jours	<b>60</b>
<b>Figures III.9</b> : Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévue de la résistance à la traction par flexion	<b>62</b>

<b>Figures III.10 :</b> Graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de la résistance à la traction par flexion	<b>63</b>
<b>Figure III.11:</b> Graphique ternaire du module d'élasticité en fonction du dosage des différents types de sables à 7 jours	<b>64</b>
<b>Figure III.12:</b> Graphique ternaire du module d'élasticité en fonction du dosage des différents types de sables à 28 jours	<b>65</b>
<b>Figure III.13:</b> Graphique ternaire du module d'élasticité en fonction du dosage des différents types de sables à 90 jours	<b>65</b>
<b>Figures III.14 :</b> Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues du module d'élasticité	<b>66</b>
<b>Figures III.15 :</b> Graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues du module d'élasticité	<b>68</b>
<b>Figure III.16:</b> Graphique ternaire de la porosité en fonction du dosage des différents types de sables à 7 jours	<b>69</b>
<b>Figure III.18:</b> Graphique ternaire de la porosité en fonction du dosage des différents types de sables à 90 jours	<b>70</b>
<b>Figures III.19 :</b> Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues la porosité	<b>72</b>
<b>Figures III.20 :</b> Graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues la porosité	<b>73</b>
<b>Figure III.21:</b> Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression	<b>74</b>
<b>Figure III.22 :</b> Corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à compression	<b>76</b>
<b>Figure III.23 :</b> Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité	<b>77</b>
<b>Figure III.24 :</b> Corrélation entre le module d'élasticité et la porosité	<b>78</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Propriétés des matériaux de réparation de béton typique	<b>18</b>
<b>Tableau I.2 :</b> Exemples de quelques modèles de prédiction du module d'élasticité	<b>32</b>
<b>Tableau II.1 :</b> Modèles obtenus	<b>45</b>
<b>Tableau II.2 :</b> Estimations des paramètres du modèle des réponses des propriétés à l'état frais	<b>45</b>
<b>Tableau III.1 :</b> Propriétés physico-mécaniques des mortiers étudiés	<b>52</b>
<b>Tableau III.2 :</b> Modèles obtenus de la résistance à la compression	<b>53</b>
<b>Tableau III.3 :</b> Paramètres des modèles des réponses étudiées (résistance à la compression)	<b>55</b>
<b>Tableau III.4 :</b> Modèles obtenus de la résistance à la traction par flexion	<b>95</b>
<b>Tableau III.5 :</b> Paramètres des modèles des réponses étudiées (Résistance à la flexion)	<b>61</b>
<b>Tableau III.6 :</b> Modèles obtenus du module d'élasticité	<b>64</b>
<b>Tableau III.7:</b> Paramètres des modèles des réponses étudiées (Module d'élasticité)	<b>66</b>
<b>Tableau III.8 :</b> Modèles obtenus de la porosité	<b>69</b>
<b>Tableau III.9:</b> Paramètres des modèles des réponses étudiées (Porosité)	<b>71</b>
<b>Tableau III.10 :</b> Exemples de quelques modèles de prédiction du module d'élasticité	<b>75</b>



*Introduction*  
*Générale*

## Introduction générale

Après des années de service, il est fréquent d'apercevoir des structures en béton nécessitant des réparations, d'entretien, ou des reconstructions partielles, à cause des différentes dégradations subies pendant l'exploitation, à vrai dire, la nature et l'origine des défauts sont multiples. Les dommages peuvent apparaître lors du chargement accidentel ou à cause des défauts de conception et de mise en œuvre. Par ailleurs, des pathologies du béton peuvent être à l'origine de graves dégradations, également la carbonatation, la réaction alcali-granulats, les attaques des sulfates...etc. Tout cela mène à des structures en mauvais état qui exigent l'une des deux réparations: une reconstruction partielle ou une réparation.

La détérioration des ouvrages en maçonneries et en béton armé tels que les monuments historiques, les quais des ports, ponts... etc, commence à attirer l'attention des collectivités locales de notre pays que ce soit sur le plan économique ou socioculturel. L'Algérie possède un patrimoine de plus de 8000 d'ouvrages d'art, dont 55% routiers, avec plus du quart de ce nombre nécessitant des interventions de réparation ou de renforcement. En conséquence, leur réhabilitation devient une force majeure de point de vue économique afin de les maintenir en service et d'éviter leur démolition. La réhabilitation des structures impose au premier lieu de trouver des matériaux de réparation résistants et de vérifier leur compatibilité et leur durabilité à long terme. Ceux-ci conduisent à penser à un nouveau mortier à base de matériaux locaux, pour l'utiliser dans la réparation de ces structures endommagées.

Le sable est l'un des composants des mortiers autoplaçant, leur effet sur les caractéristiques des mortiers à l'état frais et à l'état durci constitue un facteur très important. Plusieurs types de sable de propriétés et de natures différentes sont disponibles en Algérie tel que le sable des dunes, le sable calcaire et le sable alluvionnaire.

L'utilisation du sable des dunes ainsi que celui obtenu suite au concassage de roches calcaires pour la confection de mortiers ou de bétons offre une opportunité pour la préservation des sables alluvionnaires dont l'exploitation effrénée nuit de façon très sensible à l'environnement et constitue une contribution technique, économique et environnementale importante.

# Introduction Générale

Notre travail s'inscrit dans cette optique à pour objectif de la prédiction des propriétés physico-mécaniques des mortiers de réparations autoplaçant à base de combinaisons des différents types de sable (sable de dune, sable calcaire et sable alluvionnaire).

Le présent travail s'articule sur les points suivants :

Après une revue bibliographique sur le thème, objet du premier chapitre s'intéresse particulièrement à :

- L'étude de la compatibilité entre mortier de réparation et construction réparée.
- L'effet du sable sur les performances d'un mortier hydraulique,
- Corrélation entre les propriétés physico-mécanique du mortier de ciment, cette partie porte sur les principaux travaux et recherches traitant ce point.

Nous avons consacré le deuxième chapitre sur les notions générales sur les plans d'expériences qui permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles dans le but d'obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences.

Dans le dernier chapitre nous présentons la modélisation des résultats des caractéristiques des mortiers de réparation autoplaçant trouvés dans le cadre du projet de fin d'étude de master proposé et dirigé par Dr Krobb Benharzallah pendant l'année universitaire 2019/2020, en appliquant la méthode de plan de mélanges basée sur les plans d'expériences et la discussion de ces résultats. La modélisation a été réalisée par un logiciel d'analyse statistique JMP édité par SAS-Institute (Statistical American Systems).



*Chapitre I :*  
Etude bibliographique

## **I.1. Introduction**

La détérioration des structures en béton est un problème majeur en génie civil, qui est principalement associée à la contamination, aux fissures et à l'écaillage du béton de couverture[1], dans ce cas l'entretien et la réparation deviennent une partie de plus en plus importante de l'industrie de la conception et de la construction. Certaines des principales exigences pour la construction de réparations durables. C'est l'importance de l'installation de matériaux et de systèmes de réparation avec une compatibilité, une compatibilité dimensionnelle et une durabilité.

La compatibilité du matériau de réparation avec le substrat existant est une considération aussi importante si la réparation doit résister à toutes les contraintes induites par des influences telles que les changements de volume et les effets chimiques et électrochimiques. [2]

Ce chapitre est destiné à présenter une recherche bibliographique sur la réparation et le mécanisme d'adhérence, avec un aperçu détaillé sur les problèmes de durabilité du système de réparation et les facteurs affectant la compatibilité des matériaux de réparation,

## **I.2. Compatibilité**

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support d'ancien béton (vieux béton)il se pose le problème de leur compatibilité. Cette compatibilité se définit comme un équilibreentre les propriétés physiques, chimiques et électrochimiques du matériau de réparation et duvieux béton existant.[3]

Le succès avec lequel il sera possible de rencontrer les différentes exigences de compatibilité dépend de plusieurs facteurs: le choix du matériau, les opérations de préparation du support, la technique de mise en place et les opérations de contrôle de la qualité[4]

Pour être « compatibles », les matériaux de réparation doivent être formulés afin de répondre à diverses exigences. Les matériaux doivent d'abord permettre de rétablir la continuité du béton. Dans ce but, les caractéristiques suivantes sont demandées :

✓ adhérer à la surface du béton, de manière à pouvoir participer à la transmission des efforts à l'ensemble de la structure de l'ouvrage;

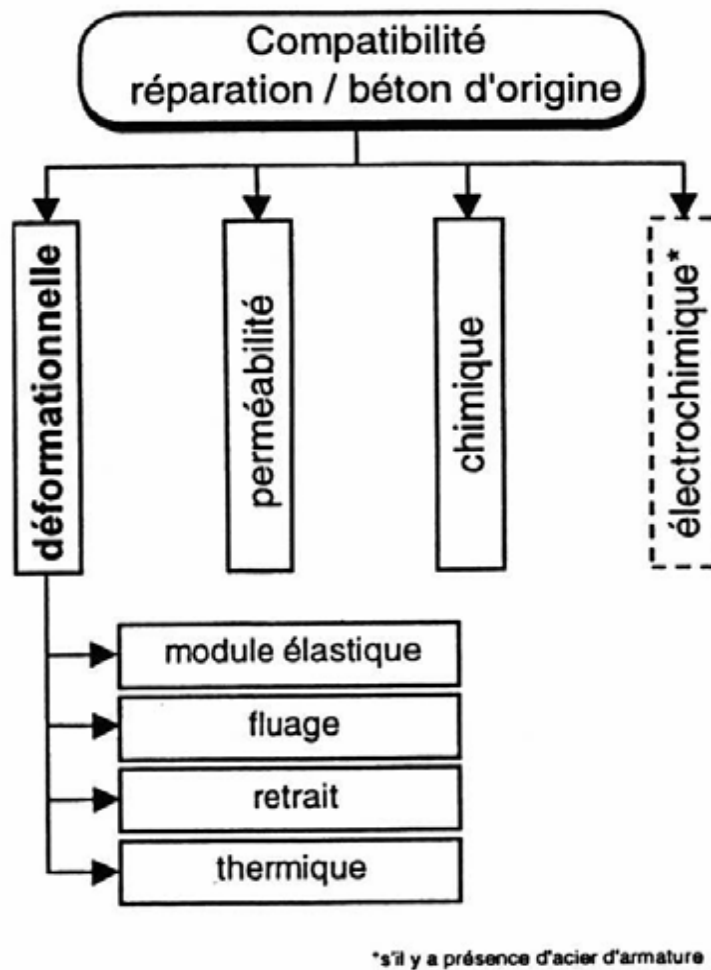
✓ présenter des résistances mécaniques (compression, traction, flexion) suffisantes, comparables ou supérieures à celles du béton;

✓ présenter un module d'élasticité similaire à celui du béton; ceci est impératif si le mortier de réparation doit contribuer activement à la stabilité mécanique de l'ensemble (cas de réparations effectuées sur des éléments dont la section a été fortement réduite); au cas où le ragréage est moins sollicité mécaniquement, on peut s'accommoder de valeurs de module d'Young (E) inférieures, ce qui accroît leur déformabilité et contribue à un meilleur comportement sous d'éventuels mouvements du support[5]

### **I.3. Compatibilité entre le matériau de réparation et le béton du substrat**

La plupart des échecs dans les réparations sont dus à l'incompatibilité entre les nouveaux et les anciens bétons ou à des niveaux de retrait élevés qui entraînent un décollement et une fissuration. Le système composite doit supporter les différentes contraintes causées par les variations de volume du matériau de recouvrement et les effets chimiques ou électrochimiques sans délamination ou fissuration pendant la durée de vie spécifique de la réhabilitation.[6]

La compatibilité est définie comme étant « *un équilibre entre le matériau de réparation et le substrat* ». Comme présenté dans la **Figure I.1** il ya quatre types de compatibilité. Chaque type est sensible à des facteurs différents. Un fort contraste de ces propriétés ne peut que conduire à une détérioration plus au moins rapide de la réparation.



**Figure II.1:** Les différents types de compatibilité et les principaux facteurs qui influencent la compatibilité déformationnelle[7]

#### I.4. Compatibilité déformationnelle

Les matériaux composant un système de réparation peuvent subir dans leur environnement des sollicitations environnementales qui engendrent des changements volumétriques, en absence de tout chargement externe. Le béton du support est stable hydriquement. Son hydratation est inactive, où les variations volumiques du matériau de réparation seront restreintes par le support. En effet, l'hydratation du vieux béton est terminée, donc, les propriétés mécaniques ainsi que le module élastique, sont élevées, comparativement au matériau de réparation.[7]

Par conséquent, la compatibilité déformationnelle est toujours la source de défaillances dans le système de réparation. Les caractéristiques qui affectent l'équilibre déformationnelle ou l'équilibre dimensionnel du système de réparation sont le retrait au séchage, le coefficient de dilatation thermique, le module d'élasticité et le fluage.

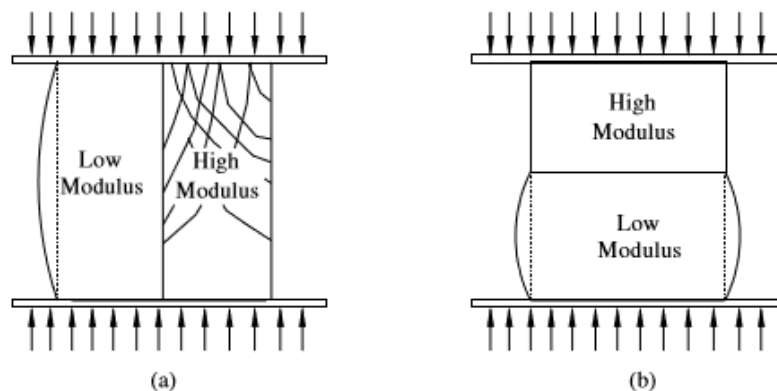
## I.5. Facteurs influençant la compatibilité dimensionnelle

### I.5.1. Module d'élasticité

Le module d'élasticité est une mesure de la rigidité d'un matériau. Un matériau avec un module d'élasticité plus élevé est plus rigide qu'un matériau de module inférieur, qui est plus flexible. Le module d'élasticité est la constante de proportionnalité entre la contrainte appliquée et la déformation dans la gamme contrainte déformation linéaire du matériau.

Il correspond à la pente de la partie droite d'un graphique de la contrainte par rapport à la déformation. Le terme élasticité fait référence au caractère réversible du changement dimensionnel (comme un ressort se ressaisirait s'il était comprimé ou étiré)[8]

Les matériaux à faible module d'élasticité se déforment plus que ceux à un module élevé sous une charge donnée. Lorsque la charge (compression ou traction) est appliquée parallèlement à l'interface (béton-matériau de réparation) **figure I.2.a**, les matériaux ayant des modules élastiques différents transfèrent les contraintes du matériau à faible module (efficacité portante inférieure) au matériau à module élevé. Lorsque la charge est appliquée perpendiculairement à la l'interface (béton-matériau de réparation) **Figure I.2.b**, la différence de rigidité entre les deux matériaux est moins critique si la charge appliquée est une charge de compression [4]



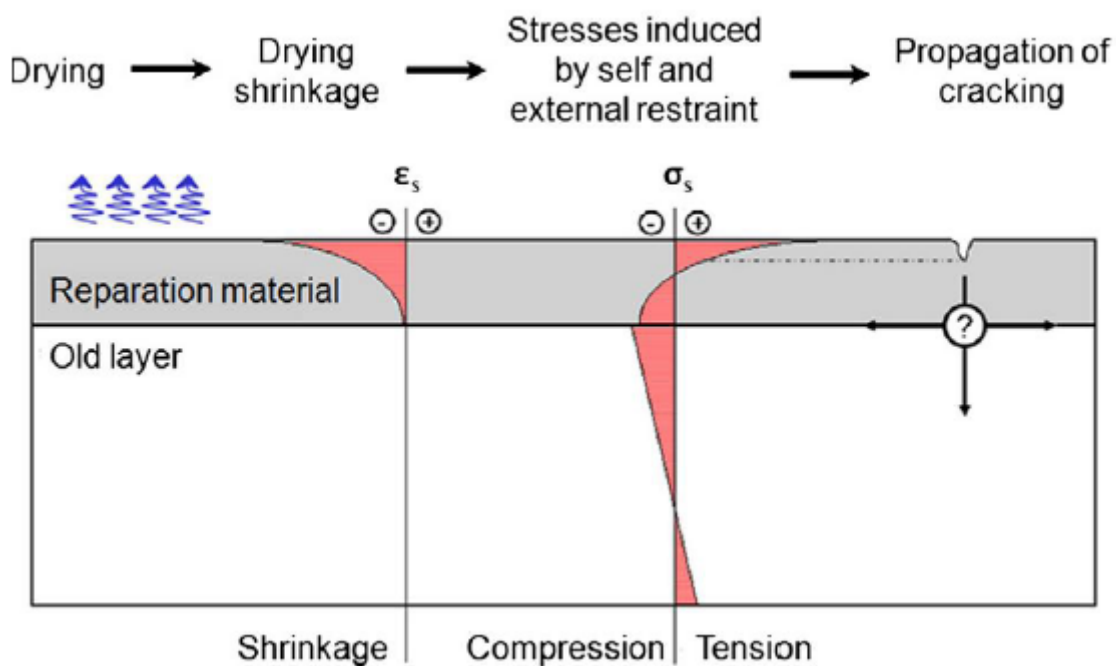
**Figure I.2:** Effets d'une inadéquation des modules élastiques. (a) Charge parallèle à l'interface  
(b) Charge perpendiculaire à l'interface[4]

### I.5.2. Retrait

Pour les matériaux de réparation cimentaire, la teneur en eau diminue quelques heures après l'application à cause de l'hydratation du ciment. Ceci s'accompagne d'une contraction du matériau qui est due à la dessiccation. Ainsi le matériau subit un phénomène de variation volumique, désigné par le retrait. Ce phénomène a lieu à l'état frais comme à l'état durci.[9]

On distingue quatre principaux types de retrait : plastique, thermique, endogène, de et de séchage

Ces quatre composantes du retrait total d'une matrice cimentaire sont cumulatives avec des cinétiques très différentes[5]



**Figure I.3:**Représentation schématique induite par le retrait empêché dans les réparations

[10]

#### I.5.2.1. Retrait plastique

Le retrait plastique est une déformation qui se produit avant la prise et le durcissement sous l'effet d'une dessiccation. Car, une partie d'eau du béton frais peut s'évaporer ou être absorbée par le support. Par conséquent des tensions capillaires dans le matériau se traduisent par une diminution du volume occupé par la pâte, c'est le retrait plastique[11] L'effet du retrait plastique sur le comportement mécanique des structures réparées par rechargements minces adhérents n'est pas considérable. Car le rechargement peut s'adapter aux variations dimensionnelles avant la prise du matériau[5]

### I.5.2.2. Retrait thermique

Le retrait thermique est dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur d'hydratation du ciment [9] par conséquent une contraction peut générer des déformations empêchées. Susceptibles de conduire à l'apparition du phénomène de fissuration. Néanmoins, dans le cas des réparations minces où l'épaisseur est limitée à quelques centimètres, la fissuration du retrait thermique n'est pas un problème important[7]

### I.5.2.3. Retrait endogène

Le retrait endogène est défini comme un changement de volume de béton se produisant sans transfert d'humidité vers l'environnement. C'est simplement le résultat des réactions chimiques et structurales internes des composants en béton. La contribution du retrait endogène était auparavant considérée comme «insignifiante» dans les mélanges de béton typiques en raison du rôle dominant du retrait au séchage[12]

Le retrait endogène ayant pour origine la réaction d'hydratation du ciment avec l'eau, est le phénomène qui survient en premier au cours de la vie d'une réparation. Au jeune âge du matériau, le retrait endogène est donc le phénomène principal qui influe sur le comportement mécanique d'une réparation

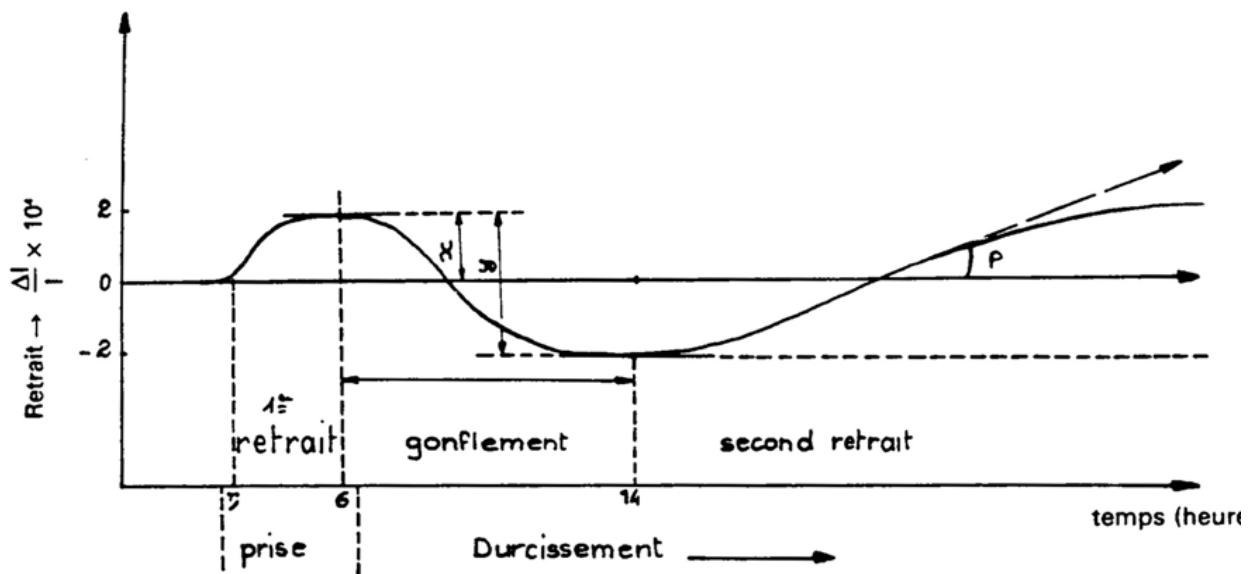


Figure I.4: Déformation endogène de la pâte de ciment[5]

### I.5.2.4. Retrait de séchage

Le retrait de dessiccation ou le retrait de séchage est dû au mouvement de l'eau qui se trouve dans les pores du béton vers le milieu extérieur lors de son séchage. Ce retrait dépend des conditions ambiantes dans lesquelles se trouve le béton telles que le taux d'humidité

relatif et la température. L'inverse du retrait de séchage est le gonflement du béton dû à un apport d'eau au béton, par exemple lors d'une cure humide.[13]

Le retrait au séchage du matériau cimentaire est principalement causé par la contraction du gel de silicate de calcium hydraté (C-S-H) dans la pâte d'eau de ciment durci, lorsque l'humidité du gel est diminuée[14]

Une partie de l'eau dans les pores s'évapore jusqu'à ce que soit atteint l'équilibre entre l'humidité interne du béton et l'humidité ambiante. Cette perte d'eau cause le retrait de séchage. Le processus de séchage est influencé par la porosité de la pâte de ciment, elle-même déterminée par le rapport eau/ciment et le degré d'hydratation. Lors du séchage du nouveau matériau, un gradient de teneur en eau s'installe dans la couche de réparation jusqu'à ce que l'équilibre hygrométrique soit atteint, donc le matériau est soumis à un retrait différentiel[15]

### **I.5.3. Fluage**

Le fluage est la déformation différée que le matériau doit subir sous charge constante au-delà de la déformation instantanée, la déformation de fluage est décomposée en une déformation de fluage propre et de dessiccation. Chacune de ces composantes correspond à un environnement de conservation différent vis-à-vis de l'humidité relative. Dans des conditions de température et d'hygrométrie en équilibre avec les caractéristiques internes du matériau (système thermodynamique fermé), le béton (ou mortier) sous chargement présente des déformations de fluage propre. S'il y a un échange hygrométrique durant le chargement, on considère que le retrait de séchage et le fluage s'ajoutent. Le supplément de fluage observé lors du séchage est appelé fluage de séchage.

Le fluage est défini comme la déformation dans le temps causé par une charge constante. Selon divers auteurs, le matériau de réparation doit généralement posséder un très faible potentiel de fluage, sauf si le matériau de réparation est sollicité à la traction, le fluage dans ce cas peut être bénéfique, car il peut compenser ou réduire l'effet négatif du retrait dans le matériau de réparation[16][17]

### **I.5.4. Dilatation thermique**

Le coefficient de dilatation thermique est important à considérer, en particulier lorsque la structure à réparer se trouve dans un environnement qui subit de grandes variations de température. Un écart important entre les coefficients de dilatation thermique du béton de support et du matériau de réparation peut créer une restriction des déformations et donc des contraintes internes dans la réparation[10]

## I.6. L'adhérence

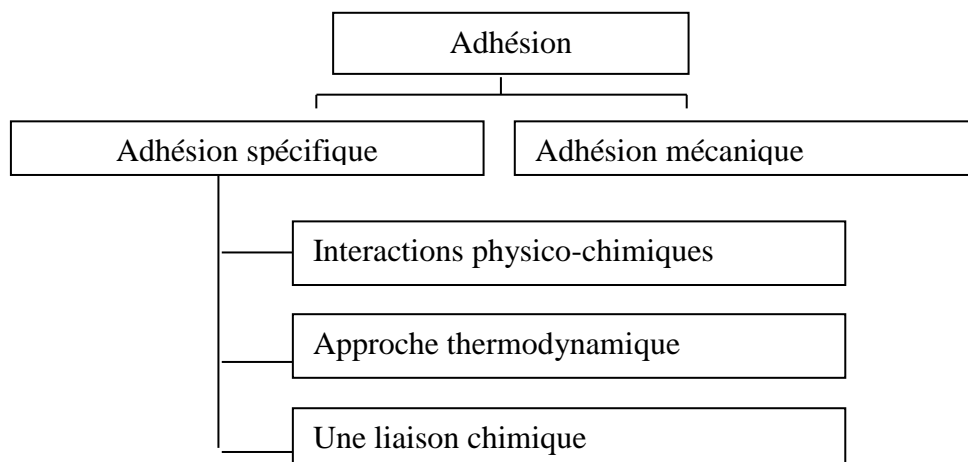
### I.6.1. Définition de la force de liaison

L'adhérence entre les matériaux de réparation et le substrat en béton est l'un des facteurs les plus importants qui affectent la fiabilité et la durabilité de la réparation. Une forte adhérence entraîne une tolérance plus élevée sur la non-compatibilité des propriétés des deux matériaux. Une bonne adhérence est un facteur clé pour avoir un système monolithique[18][19]

### I.6.2. Concept d'adhérence

Le concept d'adhésion doit d'abord être clairement défini en raison de la «dualité» du terme (Derjaguin, 1978): «d'une part, l'adhésion est comprise comme un processus par lequel deux corps sont réunis et attachés (liés) à chacun autre, de telle sorte qu'une force externe ou un mouvement thermique est nécessaire pour rompre la liaison. D'autre part, nous pouvons examiner le processus de rupture d'un lien entre des corps déjà en contact. Dans ce cas, comme mesure quantitative de l'intensité d'adhésion, on peut prendre la force ou l'énergie nécessaire pour séparer les deux corps ».

L'adhésion a donc deux aspects différents, selon que notre intérêt réside principalement dans les conditions et la cinétique de contact ou dans le processus de séparation. L'intensité d'adhésion dépendra non seulement de l'énergie utilisée pour créer le contact, mais également de l'interaction existant dans la zone d'interface. D'une manière générale, le mécanisme d'adhésion doit être envisagé à partir de deux origines: l'adhérence spécifique et l'emboîtement mécanique[20]



**Figure I.5 :** Principes de la théorie de l'adhésion[20]

### **I.6.3. Facteurs affectant la force d'adhésion**

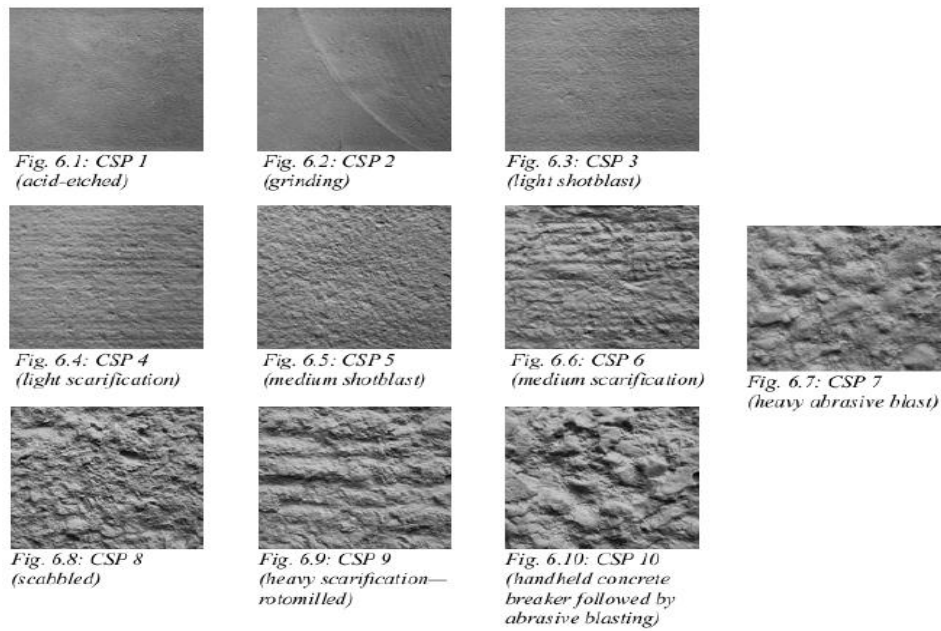
L'adhérence entre les matériaux de réparation et les substrats de béton est essentiel pour la performance à long terme et la durabilité de béton réparée. De nombreux facteurs influent sur la force d'adhérence entre l'ancien et le nouveau matériau de réparation telque la résistance à la compression du vieux béton et du matériau de réparation, la surface du substrat (état d'humidité ou mouillabilité conditions de mouillage, rugosité, présence de microfissures, propreté et la cure)[21]

#### **I.6.3.1. Propreté**

Une surface de collage doit être exempte de poussière, d'huile, de graisse et d'autres contaminants. Ceux-ci ont une influence significative sur la force de liaison s'ils restent. Ils diminuent le frottement et forment la couche préventive pour l'inter verrouillage entre le substrat et la couche supérieure. Les poussières peuvent être facilement éliminées mais il est difficile de nettoyer l'huile ou la graisse de la surface[19]

#### **I.6.3.2. Rugosité de surface**

Afin d'obtenir une adhérence adéquate, la surface doit être préparée avant d'effectuer le recouvrement. Dans les travaux de réparation du béton, le béton détérioré doit être enlevé avant la préparation de la surface car il peut endommager la nouvelle couche et sa résistance est insuffisante. Des méthodes telles que le brossage, le sablage, le grenailage, et l'hydro-démolition sont généralement adoptées pour préparer la surface du substrat.[21] La rugosité de la surface du substrat a une influence significative sur la force de liaison (adhérence), mais Silfwerbrand prouvé que la rugosité en elle-même n'a pas d'influence significative, mais la méthode de préparation de la surface et l'absence de microfissures sont plus importantes[19]



**Figure I.6:** Modèle des profils de surface CSP[22]

### I.6.3.3. Mise en œuvre du matériau de réparation

Le compactage du matériau de réparation permet de remplir les cavités et les pores à la surface de vieux béton, ce qui conduit à une zone de contact moins poreuse. L'autre avantage est d'avoir un matériau de réparation moins perméable, ce qui est également utile pour la durabilité de la liaison matériau de réparation - béton.[19]



**Figure I.7:** Procédure de vibration typique d'un matériau de réparation

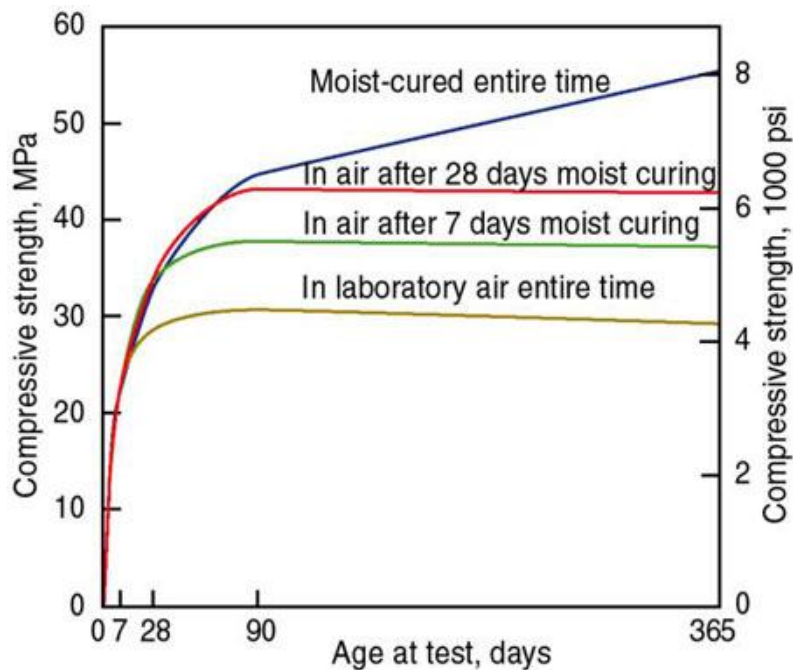
### I.6.3.1. Cure du matériau de réparation

La cure est le processus de contrôle du taux de la perte d'humidité du béton pendant l'hydratation du ciment. Étant donné que l'hydratation du ciment prend du temps, des jours et

même des semaines de cure doivent être entrepris pendant une période de temps raisonnable si le béton doit atteindre sa résistance et sa durabilité potentielles.

La cure du béton conduire à un gain plus grand et plus rapide de la résistance à la traction et cela minimise le taux de fissuration causées par le retrait à jeune âge.

La résistance du béton dépend du taux de développement des cristaux dans la matrice du béton. Ces cristaux se développent à partir d'une réaction entre le ciment Portland et l'eau, une réaction connue sous le nom d'hydratation. S'il n'y a pas assez d'eau, les cristaux ne peuvent pas développer et le béton ne développe pas la résistance qu'il devrait. Il est important de savoir que la température a principalement une influence sur la vitesse et le taux d'hydratation. L'effet de la durée de cure sur le développement de la résistance à la compression est présenté dans la figure ci-dessous[19]

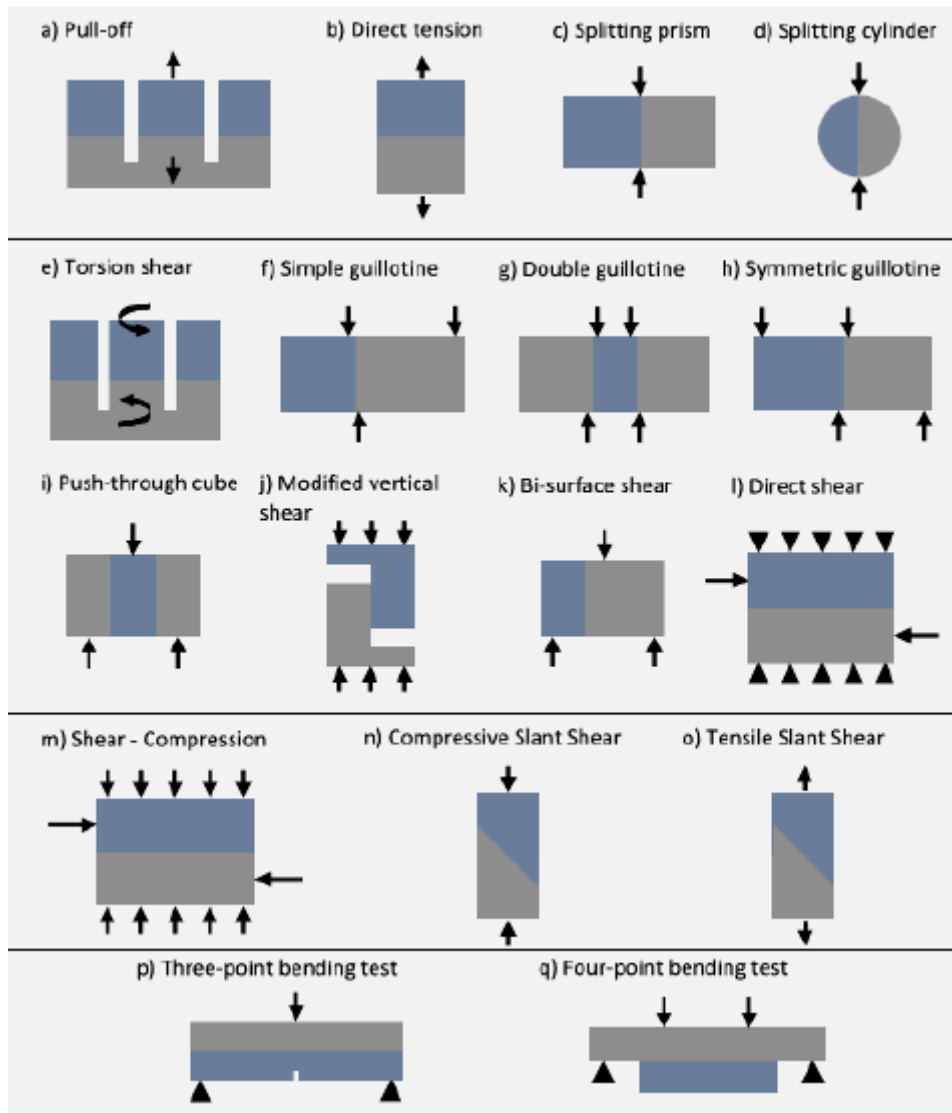


**Figure I.8 :** Effet de la durée de cure sur le développement de la résistance à la compression[19]

#### I.6.4. Méthodes d'essai pour évaluer la force d'adhérence:

De nombreuses méthodes d'essai ont été proposées pour évaluer la force d'adhérence entre le substrat en béton et le matériau de réparation, elles peuvent généralement être classées en quatre principales catégories en fonction de la contrainte mesurée: la traction directe ou

indirecte, le cisaillement pur et un état combiné de contraintes de cisaillement et de compression comme montré dans la figure de ci-dessous



**Figure I.9:** Diverses méthodes d'essai pour évaluer la force de liaison à l'interface[22]

- (1) essai de traction directe et indirecte (a,b,c,d).
- (2) essai de cisaillement pur (e,f,g,h,i,j,k,l).
- (3) essais combiné(m,n,o).
- (4) essai de flexion (p,q).

Les deux méthodes "Pull-off" (a) ou "Slant-shear" (n) sont les plus courantes et largement utilisées pour évaluer l'adhérence matériau de réparation-substrat.[21]

## **I.7. Réhabilitation des structures en béton**

Il est de plus en plus nécessaire de développer de meilleures techniques de réparation qui garantissent le succès de la réhabilitation et réduisent au minimum le nombre d'interventions répétées.

### **I.7.1. Causes de détérioration du béton**

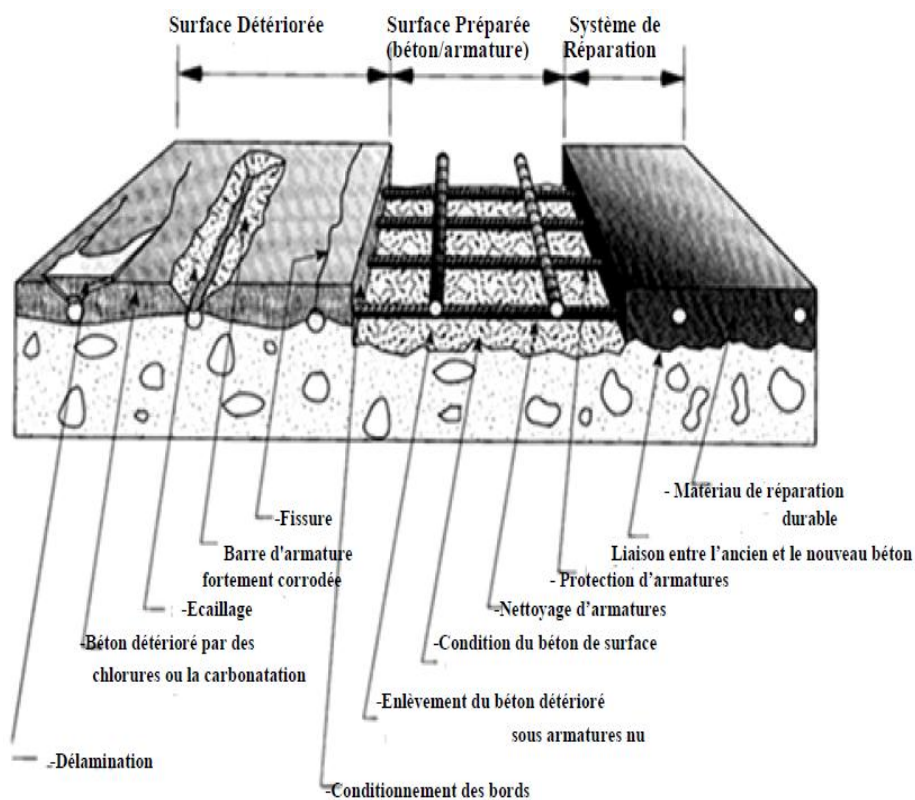
Il convient de rappeler les principales causes pour lesquelles une structure en béton peut avoir besoin d'être réparée. La clé pour augmenter la durée de vie d'un ouvrage est de savoir toutes les causes affectant cet ouvrage. Ces causes peuvent être classées comme suit:

- **Erreurs dans les phases de conception ou de construction:** L'ajout d'une quantité excessive d'eau dans les mélanges de béton, des joints inadéquats ou des défauts de construction sont des exemples typiques qui appartiennent à ce groupe.
- **Détérioration excessive due à une attaque chimique ou à un environnement agressif:** Les causes les plus courantes de détérioration qui font partie de ce groupe sont la réaction alcali-granulats, l'attaque du sulfate, la carbonatation et les cycles de gel-dégel.
- **Corrosion des armatures :**La corrosion se produit généralement lorsque le béton présente des fissures qui permettent la pénétration d'eau ou que la passivation des barres d'acier résulte par l'alcalinité de la zone d'enrobage est endommagée par la carbonatation. La corrosion de l'acier crée des fissures supplémentaires et/ou délaminations qui accélèrent le processus de corrosion.
- **Charges structurelles:** Fatigue causée par des charges élevées continues ou une surcharge par des véhicules lourds.
- **Actions extraordinaires:** Dommages causés par des chocs, des tremblements de terre ou un incendie.
- **Abrasion et érosion:** L'érosion est la désintégration progressive du béton par l'action abrasive ou de cavitation des gaz, fluides ou solides en mouvement, tandis que l'abrasion est l'usure de la surface du béton par frottement [6]

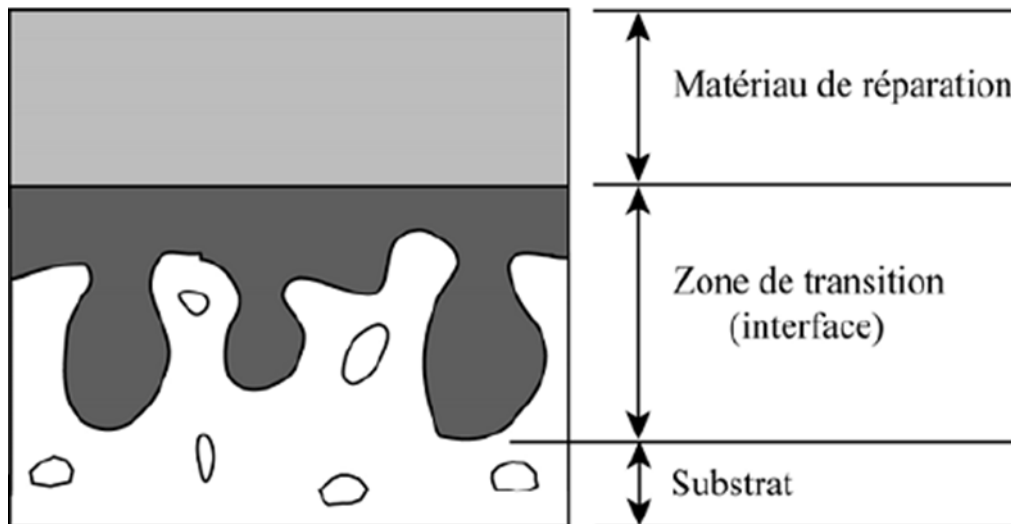
### **I.7.2. Processus d'une réparation**

Le processus d'une réparation doit faire apparaître trois étapes principales indissociables, comme il est illustré par **la Figure I.10**. D'abord, un diagnostic profond des causes de la Détérioration précède nécessairement les suivantes. Il faut bien comprendre

l'origine des dégradations à fin d'éviter qu'elles ne réapparaissent une fois l'ouvrage réparé. Ensuite une préparation de la zone à réparer qui doit être soigneusement effectuée : Enlèvement du béton détérioré avec une précaution particulière, nettoyage et protection du ferrailage ou un ajout supplémentaire est nécessaire par des armatures de renforcement; et enfin une application adéquate du produit de réparation. En effet, le système de réparation rassemble deux matériaux différents : le béton jeune celui de réparation et l'ancien béton, celui du support (le substrat)[22]



**Figure I.10:** Les trois principales étapes d'une bonne réparation[22]



**Figure I.11:** Système de réparation à trois phases[22]

### I.7.3. Types de matériaux de réparation

Une grande variété de matériaux de réparation est maintenant disponible sur le marché des matériaux de construction, qui peuvent être classés en trois catégories: mortiers à base de ciment, mortiers à base de ciment modifiés aux polymères et mortiers résineux[4]

**Tableau I.1:** Propriétés des matériaux de réparation de béton typique

Types de mortier de réparation	Mortier à base de polymères	Mortier cimentaire modifier par des polymères	Mortier cimentaire simple
<b>Propriété</b>			
Résistance à la compression (MPa)	50-100	30-60	20-50
Résistance à la traction (MPa)	10-15	5-10	2-5
Module d'élasticité (GPa)	10-20	15-25	20-30
Coefficient de délatation thermique(déformation par °C)	$25-30 \times 10^{-6}$	$10-20 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$
Température maximale de service (°C)	40-80	100-300	>300

## **I.8. Constituants de mortier hydraulique**

### **I.8.1. Ciment**

Le ciment est une matière pulvérulente se présentant sous l'aspect de poudre très fine formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier. Autrement on peut dire que le ciment est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours son maximum de résistance. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus fréquent est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton et le mortier [23]

### **I.8.2. Le sable**

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 µm et 05 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%. Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" une roche sédimentaire meuble constituée de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre les dimensions 0 à 5mm, non compris les fillers. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables. En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination[24]

#### **I.8.2.1. Sable alluvionnaire**

Le sable alluvionnaire, dit aussi roulé, dont la forme a été acquise par l'érosion. Il est issu de roches meubles des dépôts des alluvions trouvés dans les lits des fleuves ou des rivières. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, le sable utilisé pour le béton est le plus souvent siliceux

Ce sable, plus recommandé à la confection des bétons, doit présenter une granularité telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est

trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Cette granularité est caractérisée

Par le module de finesse (MF). Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin :

- $1.8 \leq MF \leq 2.2$  ; le sable convient bien pour obtenir une bonne ouvrabilité et une résistance satisfaisante.
- $2.2 \leq MF \leq 2.8$  ; le sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations limités.
- $2.8 \leq MF \leq 3.2$  ; le sable convient bien pour obtenir une moins bonne ouvrabilité et une résistance élevée avec des risques de ségrégations[25]

#### **I.8.2.1. Sable de dune**

Le sable de dune est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation de différentes roches suivies d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée à partir du quartz. Il se caractérise par une granulométrie fine et très serrée.[26]

Les sables de dune se trouvent dans les régions sahariennes. Les sables retenus sont ceux originaires des dunes continentales. Ils se définissent par une granulométrie fine et homogène, dont la taille des grains est comprise entre 0,063 et 2 mm. De plus, ils se caractérisent par une propreté admissible. Leur inconvénient est le taux important des fines naturelles qui nécessitent généralement plus d'eau de gâchage.[22]

#### **I.8.2.2. Sable calcaire**

Les matériaux de carrières calcaires sont des granulats concassés anguleux. Il est souvent admis que leur utilisation dans le béton permet d'obtenir des résistances mécaniques plus élevées, par effet de blocage mécanique du système, du moins si leur résistance intrinsèque le permet. Cependant, l'usage montre qu'ils demandent une quantité d'eau (efficace) plus élevée qu'avec des granulats roulés, à cause notamment de la baisse de compacité associée à leur forme, leur angularité et à leur rugosité.[26]

L'utilisation de sable de carrière est déterminée par sa granulométrie et ses caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. En générale, il s'utilise pour des sous-fondations et fondations, des applications liées au ciment, par exemple du béton, et pour la production de mélanges bitumineux.[25]

### **I.8.3. Eau de gâchage**

Joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours, le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442. Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale[23]

## **I.9. L'effet des constituants sur les performances d'un mortier hydraulique :**

### **I.9.1. Résistance mécanique**

**M.Lakhdari et al**[27] ont effectué une étude expérimentale sur la formulation et la caractérisation d'un mortier de réparation à base de sable (alluvionnaire- dunaire). Les résultats trouvés montrent que la résistance à la compression des mortiers de réparation obtenus est de 15,3 ; 18,3 et 37,40 MPA à 28 jours pour les mortiers de sable de dune, de sable alluvionnaire, et sable de (dune-alluvionnaire) que le mortier de sable alluvionnaire présente une amélioration de 20 % de la résistance à la compression par rapport au mortier de sable de dune.

Une étude menée par **B.Benabed et al**[28] sur des mortiers à base des sables dunaire et alluvionnaire, a montré que les propriétés mécaniques du mortier de sable mixte (alluvionnaire- dunaire) sont meilleures que celles des mortiers de dune avec ou sans super plastifiants.

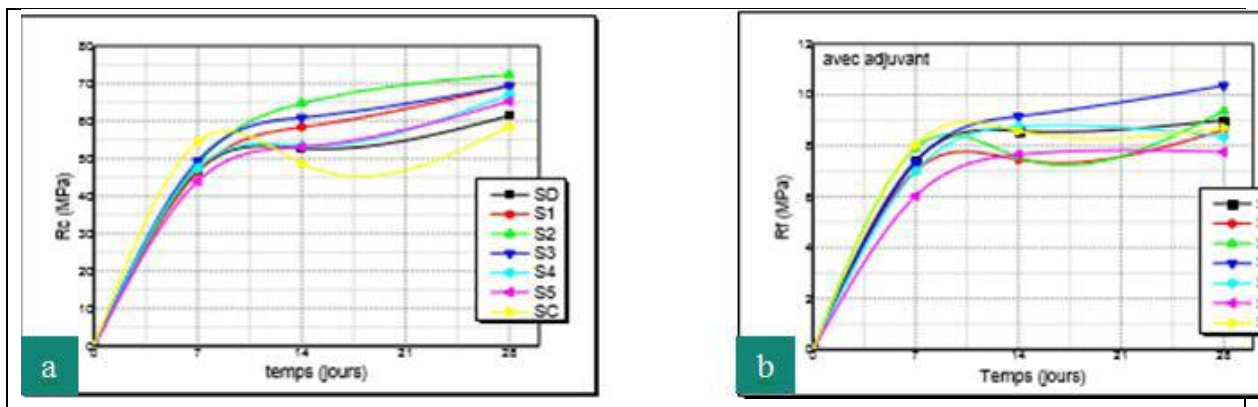
Ils ont constaté que la résistance à la compression du mortier de sable mixte est d'environ 37 MPa à 28 jours.

**Douara Taha-Hocine et al**[29] ont étudié l'effet de la combinaison ternaire de différents sables, sable alluvionnaire SA, Sable de carrière SC et sable de dune SD sur les propriétés d'un mortier autoplaçant MAP. Les résultats trouvés montrent l'effet négatif de SC et SD sur l'ouvrabilité et l'écoulement du MAP vue à ses capacités élevées de l'absorption d'eau et à la forme géométrique de ses grains. La substitution de 40% SA par partie équivalente de

SC et SD peut améliorer la résistance à la compression des mortiers. Par conséquent, il est nécessaire de corriger la quantité d'eau de gâchage et/ou la quantité du superplastifiant SP afin d'obtenir un MAP. La substitution de 40% SA par partie équivalente de SC et SD peut améliorer la résistance à la compression des mortiers.

**Belkhiri H et Derragui A** [30] ont étudié l'effet de la substitution de sable de dune par des fines siliceuses, à différentes teneurs pondérales 5, 10, 15, 20 et 25% sur les propriétés mécaniques des mortiers. Les résultats obtenus montrent que l'introduction de fines siliceuses aux mélanges rend le mortier moins poreux et plus résistant quel que soit en traction ou en compression. L'addition de ces fines avec un pourcentage de 5% résulte une résistance en compression dépasse celle du mélange témoins MSD0 (mortier du sable de dune) de 39%, et celle du mélange MSA0 (mortier du sable alluvionnaire) de 22%. Ce qui reflète l'efficacité des fines utilisées à l'amélioration de la résistance mécaniques des mortiers à base du sable de dune.

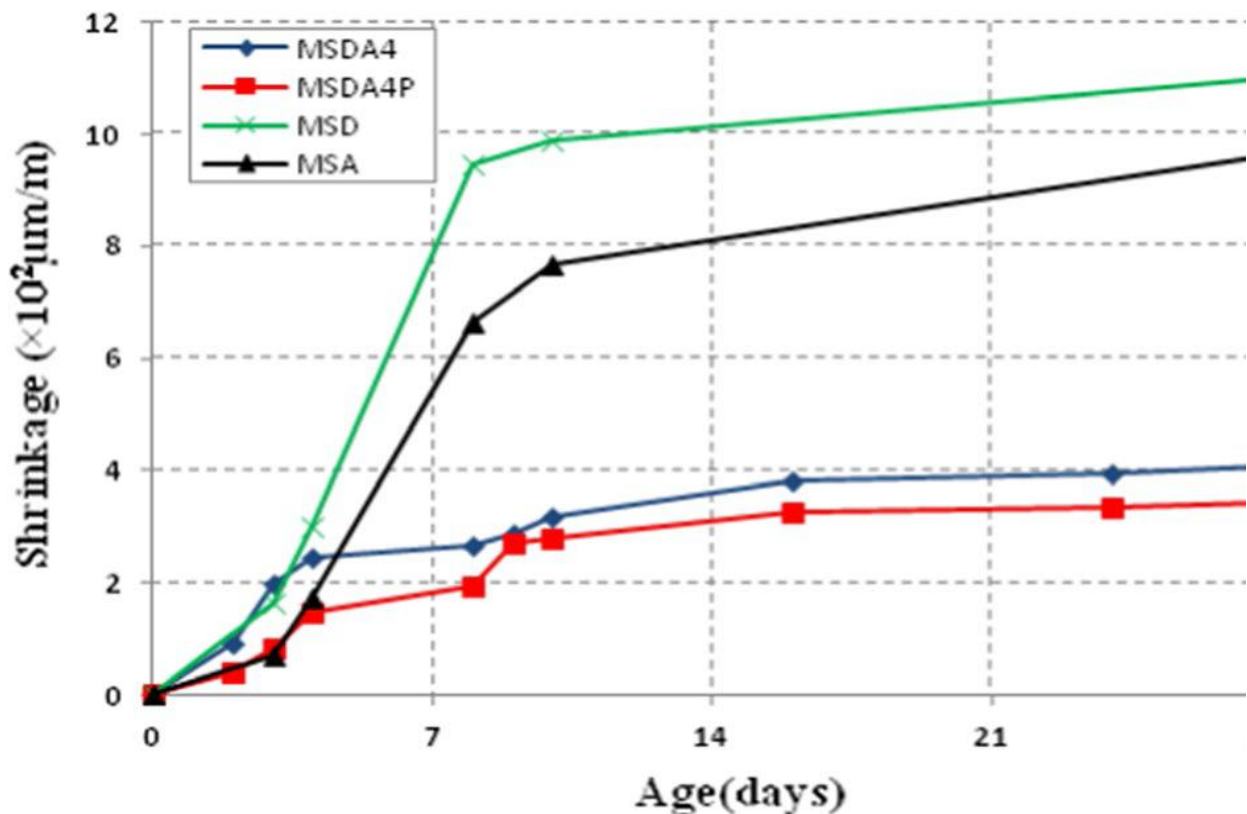
**M.Mekki**[26] a effectué une recherche en 2016 sur l'analyse des propriétés physico-mécaniques du mortier à base de sable mixte (sable de dune et sable concassé), il a Conclu que la substitution du 40% à 50% sable de dune avec sable concassé permet d'améliorer les propriétés physiques du sable mixte (granularité améliorée, faible porosité, compacité élevée, adhérence pate ciment-granulats améliorée,..., etc), ce qui a conduit à une amélioration des résistances mécaniques à la compression et à la flexion du mortier.



**Figure I.12** : Résistance à la compression(a) et à la flexion(b) des mortiers à base de sables mixte avec adjuvant.[26]

### I.9.2. Retrait

**Lakhdari et al** [31] ont effectué une étude expérimentale sur les mortiers de sable alluvionnaires - dunaires soumis à des températures (20 °C et 50 °C) et à des attaques au sulfate de magnésium (10 % MgSO<sub>4</sub>). ont observé que la vitesse d'évolution du retrait est plus élevée pour tous les mortiers (mortier de sable alluvionnaires MSA, mortier de sable de dunes MSD, mortier de sable alluvionnaires - dunaires MSDA4 et mortier de sable alluvionnaires - dunaires avec superplastifiant (MSDA4P) pendant les 10 premiers jours, d'où la stabilisation de la perte de poids des deux mortiers est observée après 28 jours. Comme illustre la figure I.13.

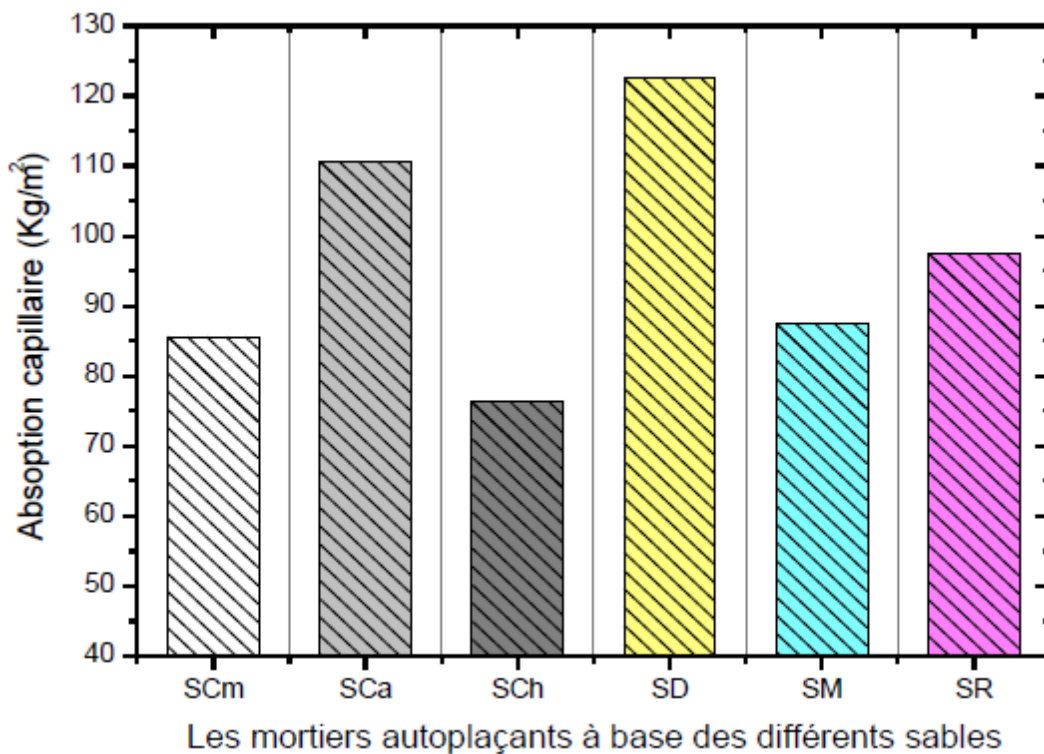


**Figure I.13:** Retrait des différents mortiers étudiés[31]

**Grassl et al** [32] mènent une étude sur l'effet de la taille et du volume des agrégats sur la microfissuration causées par le retrait. Les résultats trouvés, montrent que l'augmentation du diamètre des agrégats (à fraction volumique égale) et fraction volumique décroissante (à diamètre d'agrégat égal), augmente le taux de fissuration due au retrait.

### I.9.3. Absorption d'eau par capillarité

**Beddar A et al** Ont conclu que les mortiers composés de sable SD ou le sable concassé SCa ont une grande absorption capillaire, représentant le double par rapport au sable SCh, et ceci a donc un effet très négatif sur la résistance des mortiers à l'infiltration de l'eau par capillarité. Par contre les sables concassés SCh et SCm ont une faible capacité d'absorption, la forme concassée de ces granulats permet d'avoir un empilement granulaire parfait, ce qui réduit la porosité du squelette granulaire et empêche la remontée d'eau par capillarité.[33]



**Figure I.14:** Influence du type de sable sur l'absorption capillaire a base de différente de sables[33]

Avec

- **SCm:** Sable Concassé de carrière Mezoughi de la région Mascara ;
- **SD:** Sable de Dune de la région Bougtob ;
- **SCh:** Sable Concassé de carrière Hasnaoui de la région Sidi Belabes;
- **SM:** Sable de Mer du littoral Oranais;
- **SR:** Sable d'oued de la région de Dombal à Mascara;
- **SCa:** Sable concassé de la carrière d'AGREMAS de la région Mascara.

#### **I.9.4. Module d'élasticité**

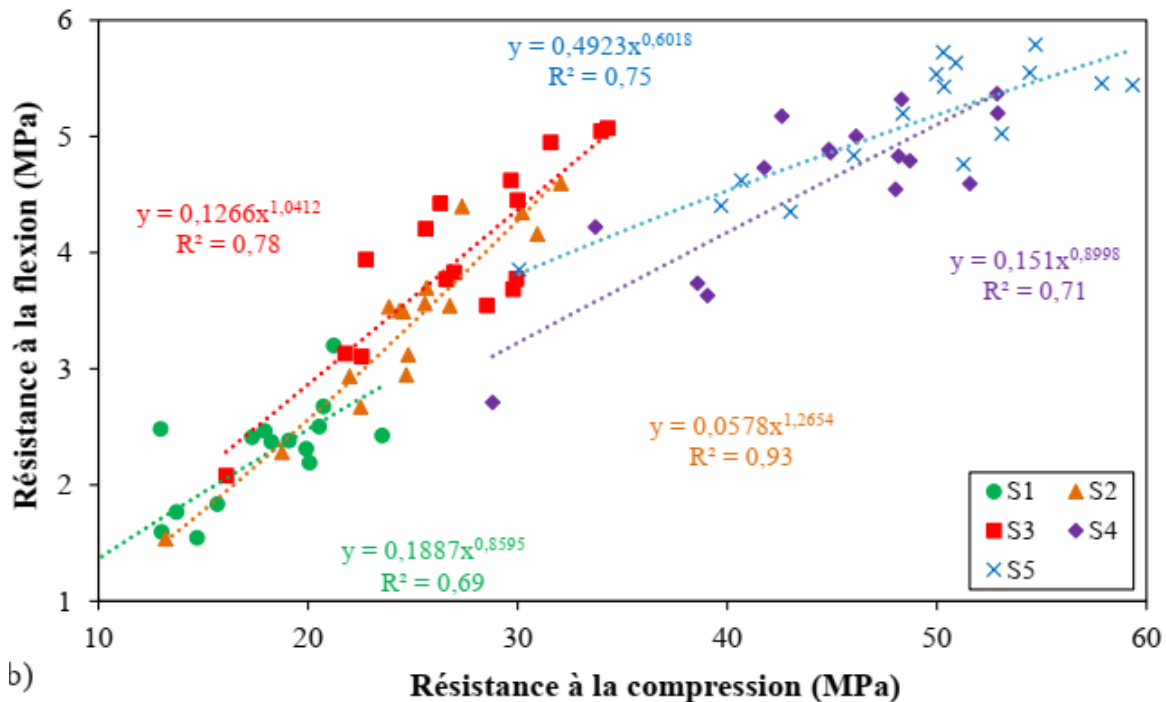
Une recherche a été effectuée par **Krobba B**[21] sur la formulation et la performance d'un mortier de réparation à base de sable dunaire, il a conclu que :

- ✓ Le mortier à base du sable dunaire-calcaire MDC a affiché une augmentation significative de la valeur de module d'élasticité de l'ordre de 46.37% par rapport à celui du mortier témoin MD.
- ✓ Les valeurs du module dynamique sont en moyenne environ 31.50% plus élevé que le module statique obtenu lors des essais de compression

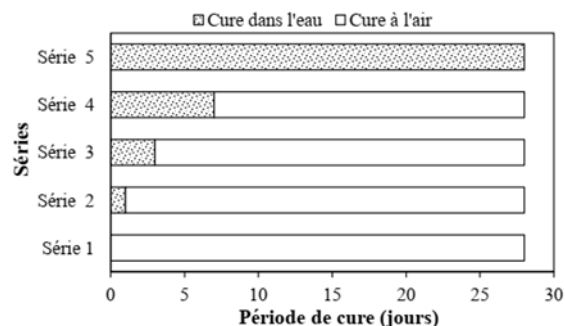
#### **I.10. Corrélation entre les propriétés physico-mécaniques du béton ou du mortier de ciment**

##### **I.10.1. Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion**

Les résistances mécaniques sont les propriétés les plus importantes du mortier de ciment qui décrivent sa qualité et ses performances pour les travaux de construction. Plusieurs recherches ont été menées pour comprendre la relation entre eux tel que la résistance à la flexion qui est améliorée parallèlement avec l'augmentation de la résistance à la compression. D'après une étude réalisée par **Boukhalkhal A**[34] les différentes corrélations établies entre les propriétés du MAP à l'état durci révèlent que les relations entre la résistance à la compression et les résistances à la flexion, sont plus affectées par la période de cure dans l'eau, et moins affectées par la composition du liant. L'analyse des résultats présentés dans **la figure I.15** montre qu'il existe des corrélations non linéaires de bonnes à excellentes entre  $R_f$  et  $R_c$  avec un coefficient de corrélation  $R^2$  variant entre 0,75 et 0,91.



**Figure I.15:** Corrélation entre les propriétés mécaniques des MAP en fonction de la période de cure initiale dans l'eau : (a) la résistance à la compression en fonction de VAS, (b) la Résistance à la flexion en fonction de la résistance à la compression[34]



**Figure I.16:** Conditions de cure pour le deuxième groupe d'éprouvettes[34]

shraddhu[35] Sur la base des données d'essai de son étude, le CRRI a suggéré la relation suivante entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression du béton:

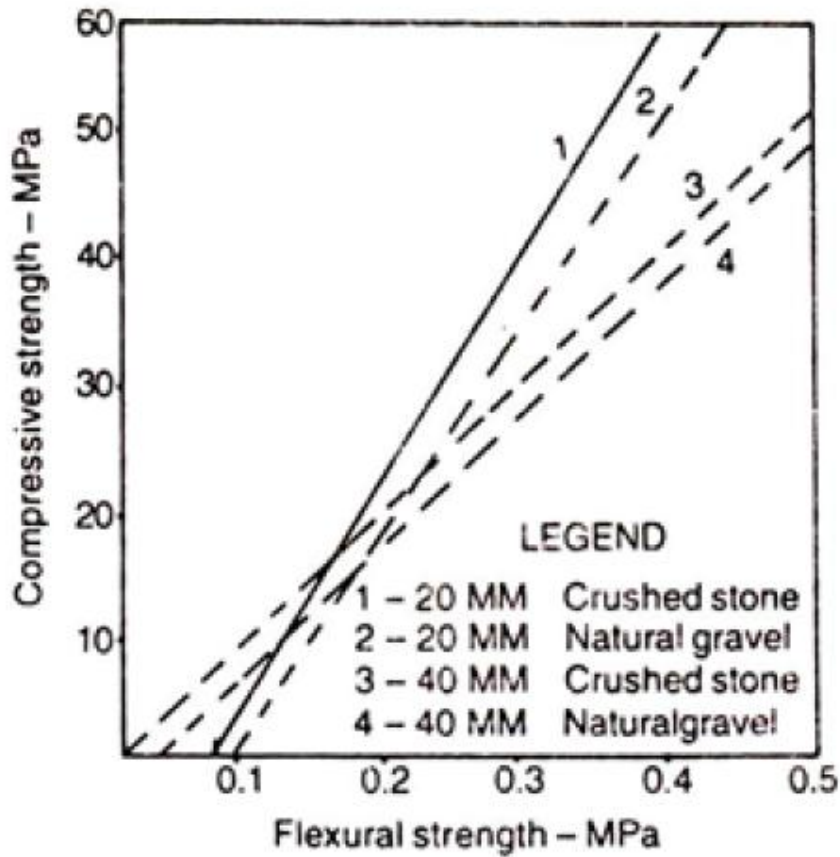
$$y = 11x - 3$$

Où :

y: est la résistance à la compression du béton en MPa

x: sa résistance à la flexion.

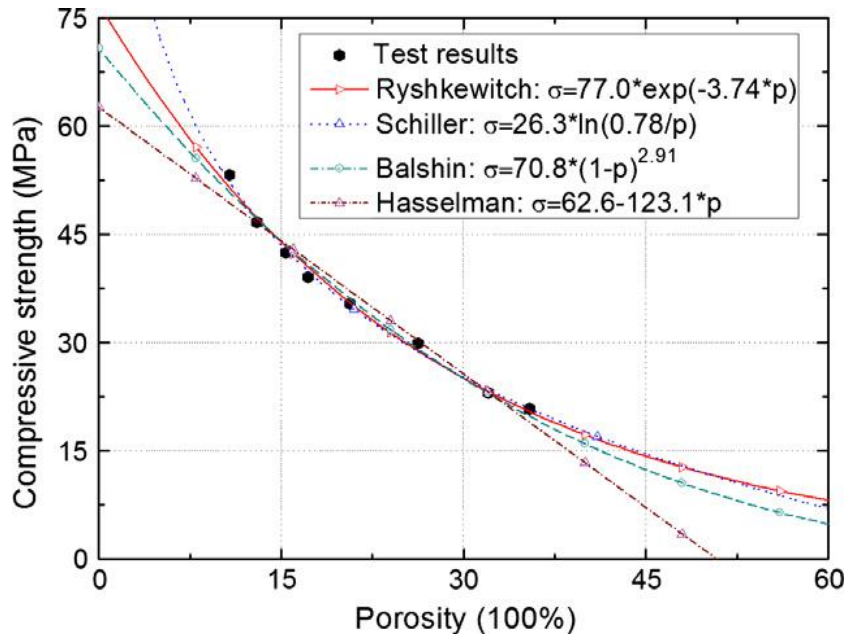
Cette relation dépend de la taille de l'agrégat grossier. et que la résistance varie avec la nature et la taille de l'agrégat.



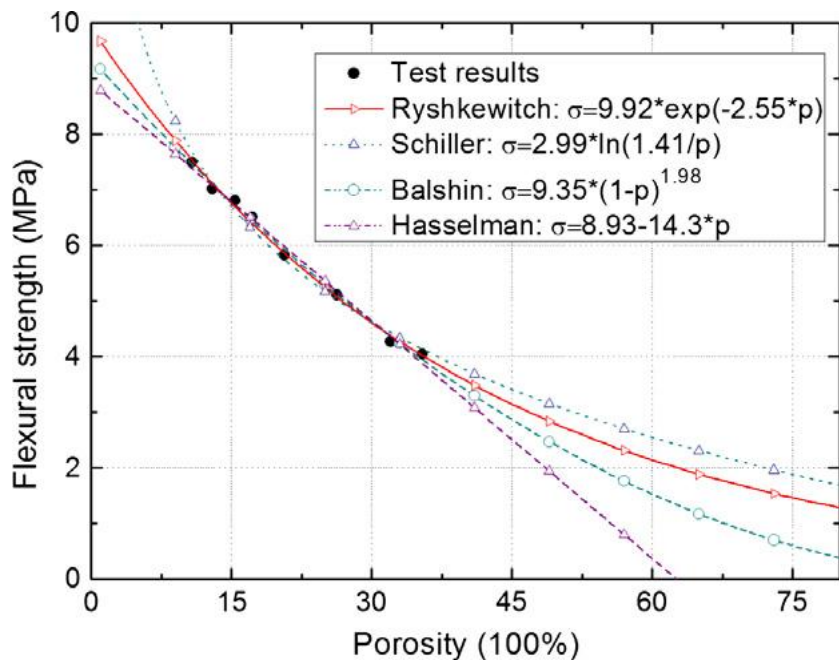
**Figure I.17:** Relation entre la résistance à la compression et à la flexion[35]

### **I.10.2. Relation entre la porosité et les résistances mécaniques**

Plusieurs travaux de recherche ont mis en évidence l'existence d'une relation entre la porosité et la résistance mécanique. **Chenet al**[36] ont étudié l'influence de la porosité sur la résistance à la compression et à la flexion du mortier de ciment. Dans cette recherche, les auteurs ont examiné les relations linéaire et exponentielle entre la porosité et les résistances existantes par les modèles de Ryshkewitch, Schiller, Balshin et Hasselman) comme le montre (**figures I.18 et I.19**).

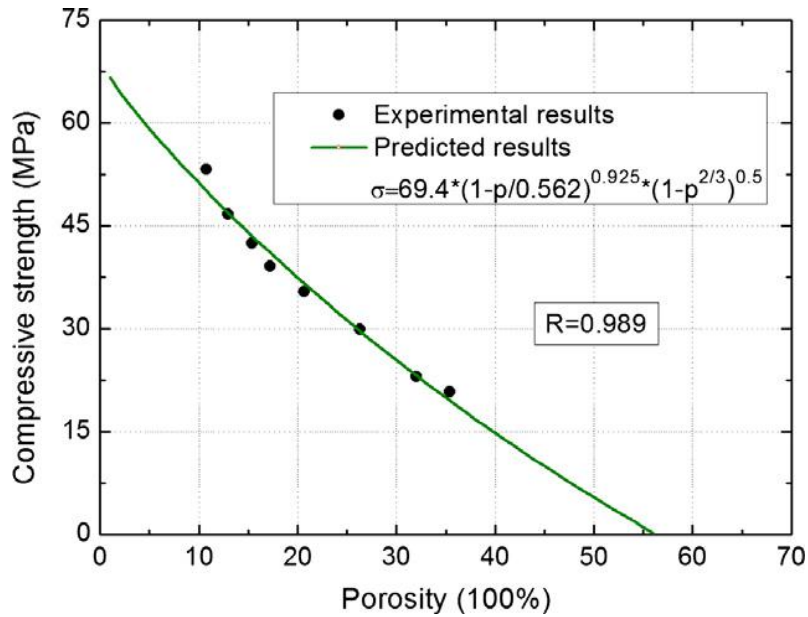


**Figure I.18 :** Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité par différents modèles[36]

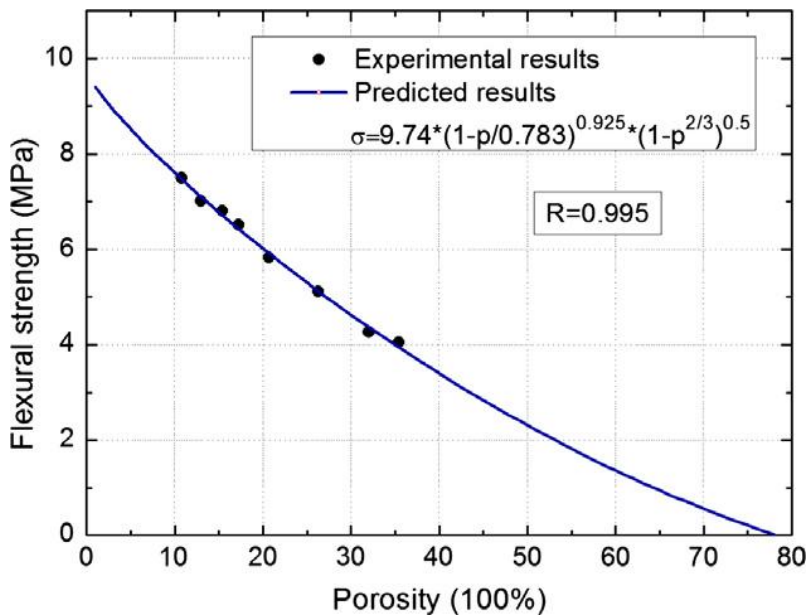


**Figure I.19:** Corrélation entre la résistance à la flexion et la porosité.[36]

Un autre modèle (modèle de Zheng) a été utilisé pour évaluer la relation porosité - résistance du mortier de ciment. Sur les plages de porosité examinées, le modèle de Zheng est une bonne représentation des données expérimentales (résistance – porosité) comme le montre les **figure I.20 et I.21**.



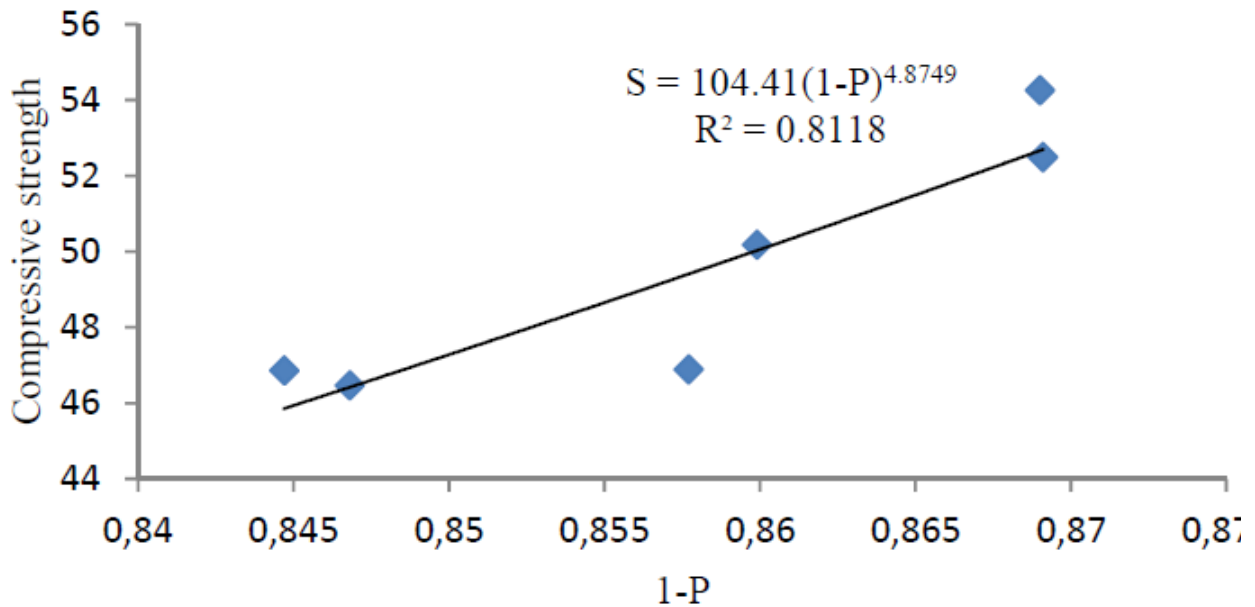
**Figure I.20:** Relation entre la résistance à la flexion prévue et observée. [36]



**Figure I.21:** Relation entre la résistance à la flexion et à la compression [36] .

Usman et al [37] ont effectué une étude expérimentale pour évaluer l'effet du métakaolin (MK) sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la porosité du mortier de ciment. Le ciment a été partiellement remplacé par 0,10, 15, 20, 25 et 30% du MK. Les résultats trouvés montrent l'existence d'une valeur optimale de MK = 20 % correspondante à une résistance à la compression maximale et une porosité minimale. L'application théorique du modèle de Balshin qui exprime la relation entre la résistance à la compression et la porosité des matériaux à base de ciment dans la plage des résultats expérimentaux trouvés indiquent l'existence d'une relation non linéaire entre la

résistance à la compression et la porosité des échantillons comme le montre la figure 21 avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,8118$



**Figure I.22:** Relation entre la résistance à la compression et la porosité[37]

Un travail expérimental a été réalisé par **BU Jingwu1 et al**[38]et al pour étudier l'effet de la teneur en sable sur les résistances mécaniques et la porosité du mortier de ciment. Les résultats trouvés montrent que les résistances à la compression et à la traction par flexion du mortier de ciment augmentent avec l'augmentation du rapport Sable/Ciment de 0,5 à 2. **Les figures I.23 et I.24** illustrent la relation entre les résistances mécaniques et la porosité. L'expression proposée à ces relations est une relation de forme non linéaire (Modèle de Balshin). Les coefficients de corrélation entre les valeurs observées et prédites étaient de 0,957 et 0,882 pour la résistance à la compression et à la flexion respectivement.



d'élasticité en fonction de la résistance à la compression.[21]Des modèles donnés par l'Eurocode 2, le BS 8110 et l'ACI 318R-02 proposent des relations entre le module d'élasticité d'un béton normal et la racine carrée ou cubique de la résistance à la compression comme le montre le tableau suivant.

**Tableau I.2 :** Exemples de quelques modèles de prédiction du module d'élasticité[21]

<b>Codes</b>	<b>Equation</b>	<b>Unités</b>
<b>ACI318-08</b>	$E_s = 0.043\rho^{1.5}(R_c)^{0.5}$	$14800\text{kg/m}^3 \leq \rho \leq 2480$ $\text{kg/m}^3$ $R_c(\text{MPa}); E_s(\text{MPa})$
<b>Eurocode 2</b>	$E_s = 22(R_c/10)^{0.3}$	$R_c(\text{MPa}); E_s(\text{MPa})$
<b>BS 8110</b>	$E_s = 9100(R_c)^{0.33}$	$R_c(\text{MPa}); E_s(\text{MPa})$
<b>ACI 318R-02</b>	$E_s = 4.73(R_c)^{0.5}$	$R_c(\text{MPa}); E_s(\text{MPa})$

## **I.11. Conclusion**

La synthèse bibliographique a montré que pour réussir une réparation, il est nécessaire de comprendre l'origine et les causes des désordres, réaliser une bonne préparation de la surface et appliquer un produit de réparation qui doit satisfaire les conditions de compatibilité avec le béton existant. Les principaux aspects de la compatibilité incluent la stabilité dimensionnelle, les propriétés chimiques, électrochimiques et de perméabilité du matériau de réparation et du substrat en béton. Le paramètre le plus important est la compatibilité dimensionnelle du matériau de réparation avec le béton du substrat qui dépend de la composition du matériau de réparation. Le sable est l'un des composants qui influe sur les performances des mortiers tel que les résistances mécaniques, le module d'élasticité, la porosité, le retrait.



# *Chapitre II :*

## *Méthode de plan de mélange*

## II.1. Introduction

La méthode des plans d'expériences est une méthodologie puissante indispensable pour conduire une étude de façon optimale. Elle est applicable à de nombreux domaines industriels ou de recherche et s'appliquent notamment aux cas des simulations numériques, dès lors que l'on cherche à analyser le lien entre une donnée de sortie  $Y$  et des variables d'entrée  $X$  supposées influentes. On recherche une fonction du type  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . C'est une approche structurée permettant d'étudier les effets de la modification simultanée des facteurs en limitant le nombre d'essais. Elle permet de mieux organiser les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles dans le but d'obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Non seulement on détermine quels facteurs  $X$  influencent la réponse  $Y$ , mais on met également en évidence d'éventuelles interactions (par exemple l'effet combiné de trois types d'ajouts sur les performances du béton).

Nous allons dans un premier temps effectuer une étude bibliographique sur la méthode des plans d'expériences afin de présenter la théorie des principaux plans d'expériences, puis en seconde partie, des exemples dans le domaine de génie civil résolus par le plan d'expérience.

## II.2. Plan de mélange

Dans les plans d'expériences classiques (plans factoriels, plans pour surfaces de réponse) les facteurs sont indépendants. Cela signifie que l'on peut choisir en toute liberté le niveau d'un facteur quels que soient les niveaux déjà attribués aux autres facteurs. Par exemple, si, pour un plan  $2^4$ , on a choisi les niveaux des trois premiers facteurs, on pourra encore choisir librement les niveaux du quatrième facteur. Cette liberté n'existe pas lorsque l'on étudie des mélanges car, en général, on étudie les réponses en fonction des proportions des constituants du mélange.

Dans ce cas les facteurs d'étude sont les proportions des constituants du mélange. Comme la somme de ces proportions est toujours égale à 100 %, le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers constituants du mélange. Dans cette situation les facteurs ne sont pas indépendants et cela entraîne des problèmes particuliers. Il faut bien se rendre compte qu'il y a plan de mélanges lorsque la réponse

étudiée dépend des proportions des constituants du mélange et non des quantités de mélange utilisées. Par exemple, la composition d'un mélange est une indication de la proportion des différents constituants. La mise au point du mélange en faisant varier les proportions des constituants est la réalisation d'un plan de mélanges.[39]

### II.3. Contrainte fondamentale des mélanges

Soit un mélange ayant  $n$  constituants. Le premier constituant représente un certain pourcentage du mélange, le second constituant un autre pourcentage du mélange, etc. Ainsi, chaque constituant participe pour une certaine part au mélange total. Mais, l'ensemble des constituants du mélange forme un tout et la somme de leurs teneurs est égale à 100 %. Lorsque l'on a défini les proportions des  $n-1$  premiers constituants, la proportion du dernier ne peut plus être choisie, elle est déjà déterminée.

Si l'on note  $x_i$  la teneur en constituant  $i$ , la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait à la relation :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 100\% \quad (\text{II. 1})$$

La teneur de chaque constituant reste comprise entre 0 et 100 %. Lorsqu'on augmente la teneur de l'un des constituants, la teneur des autres est automatiquement diminuée pour que la somme de toutes les teneurs reste égale à 100 %.

Si, au lieu d'utiliser les pourcentages, on ramène la somme des teneurs des différents constituants à l'unité, on écrira :

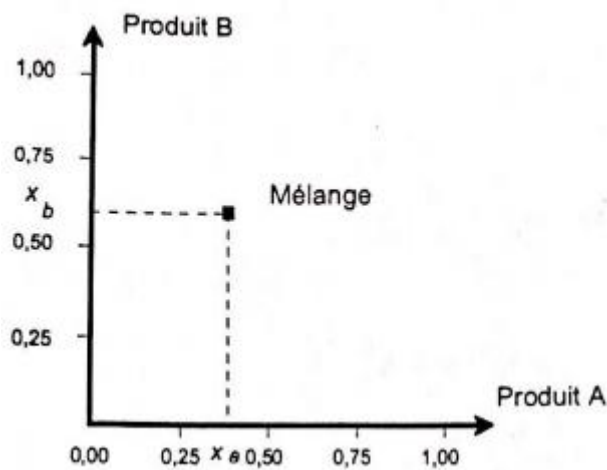
$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 1 \quad (\text{II. 2})$$

Cette relation s'appelle la contrainte fondamentale des mélanges. C'est à cause de cette contrainte que les mélanges doivent être étudiés à part car les représentations géométriques des plans de mélanges sont différentes des représentations utilisées pour les plans d'expériences classiques et les modèles mathématiques sont eux aussi profondément modifiés.

## II.4. Représentation géométrique des mélanges

### II.4.1. Mélange à deux constituants

Soit  $x_1$  la teneur du premier constituant et  $x_2$  la teneur du second. Adoptons la représentation cartésienne : l'axe  $Ox_1$  est orthogonal à l'axe  $Ox_2$ . Les axes sont gradués en proportions variant de 0 à 1. un mélange quelconque contenant  $x_a$  de A et  $x_b$  de B est représenté par un point situé à l'intersection des coordonnées  $x_a$  et  $x_b$  (**figure II.1**) ce point qui représente un mélange est appelé soit point de composition, soit point de mélange, soit tout simplement point.



**Figure II.1:** Représentation d'un mélange dans un système d'axes cartésiens

La contrainte des mélanges introduit une relation entre  $x_a$  et  $x_b$ :

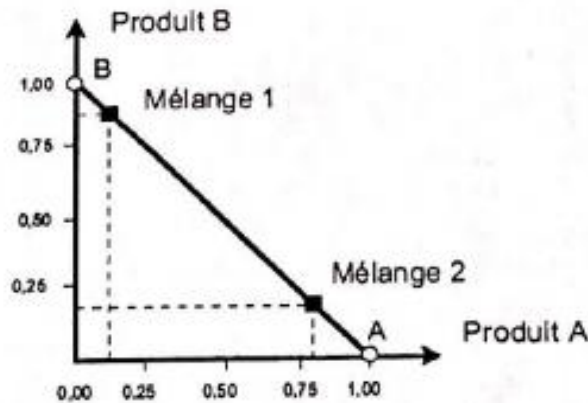
$$x_a + x_b = 1$$

Que l'on peut écrire :

$$x_b = -x_a + 1$$

Cette dernière relation exprime que les points de coordonnées  $x_a$  et  $x_b$  sont sur une droite de pente -1, coupant l'axe du produit A au point d'abscisse 1.00 (point A sur la **figure II.2**) et l'axe de produit B au point d'ordonnées 1.00 (point B sur la figure II.2). les compositions  $x_a$  et  $x_b$  varient entre 0 et 1 ,

Il n'y a que le segment AB qui soit utile. Toutes les compositions possibles des mélanges des deux produits A et B sont représenté par les points de ce segment de droite

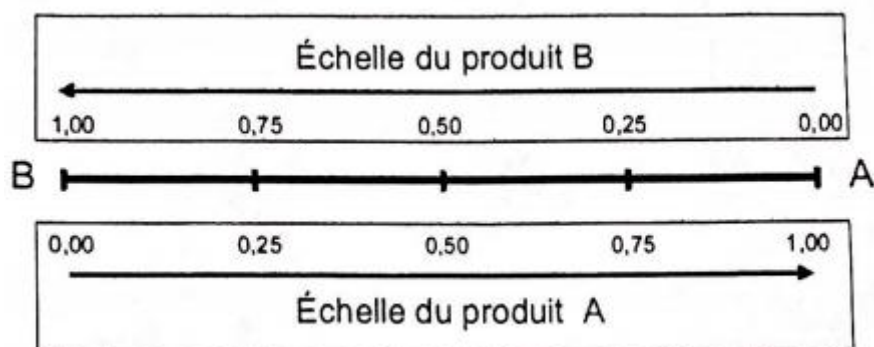


**Figure II.2:** les compositions des mélanges à deux constituants

On peut donc ne conserver ce segment de droite et abandonner les axes  $Ox_1$  et  $Ox_2$ . Le produit pur A est représenté par l'une des extrémités du segment AB. Le produit B est représenté par l'autre extrémité. Ce segment porte une double graduation (**figure II.3**), celle des teneurs du premier produit et celle des teneurs de second produit. la lecture de la composition des mélange sur ce segment demande un certain apprentissage .elle se lit à la fois de droite à gauche et de gauche à droite.

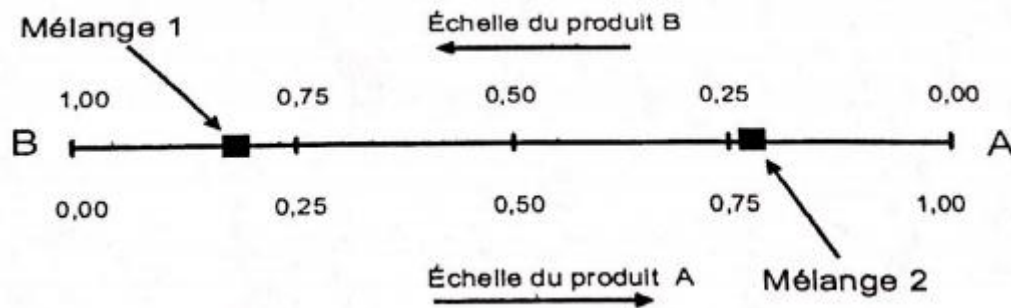
#### II.4.2. Lecture du diagramme des mélanges binaires

Le segment de la (**figure II.3**) représente les mélanges des deux constituants A et B. Le produit est à droite et le produite B est à gauche. La graduation inférieur est celle du produit A .Elle varie de 0à gauche à 1 à droite. La graduation supérieure est celle du produit B. Elle varie de 0 à droite à 1 à gauche.



**Figure II.3:** Représentation des mélanges à deux constituants sur un segment de droite

Les échelles se lisent, l'une dans un sens, l'autre dans l'autre sens.la somme des teneurs, en un point de l'échelle, est égal l'unité.



**Figure II.4:** Le mélange 1 contient 20% de A et 80% de B le mélange 2 contient 77% de A et 23% de B (Exemple de représentation des mélanges à deux constituants)

Un premier mélange (mélange 1) est illustré par un point situé à 20% de A et 80% de B. Ce point est près de B et loin de A, ce qui est normal puisqu'il y'a plus de B que de A dans le mélange (**figure II.4**). Un second mélange (mélange 2) est illustré par un point situé à 77% de A et 23% de B.

Ce point est près de A puisque c'est le constituant le plus important. On peut supprimer l'une des deux échelles puisque la somme des teneurs en un point est toujours égale à 1. Connaissant l'une des teneurs, une simple soustraction donne la teneur complémentaire. C'est en général ce qui est fait.

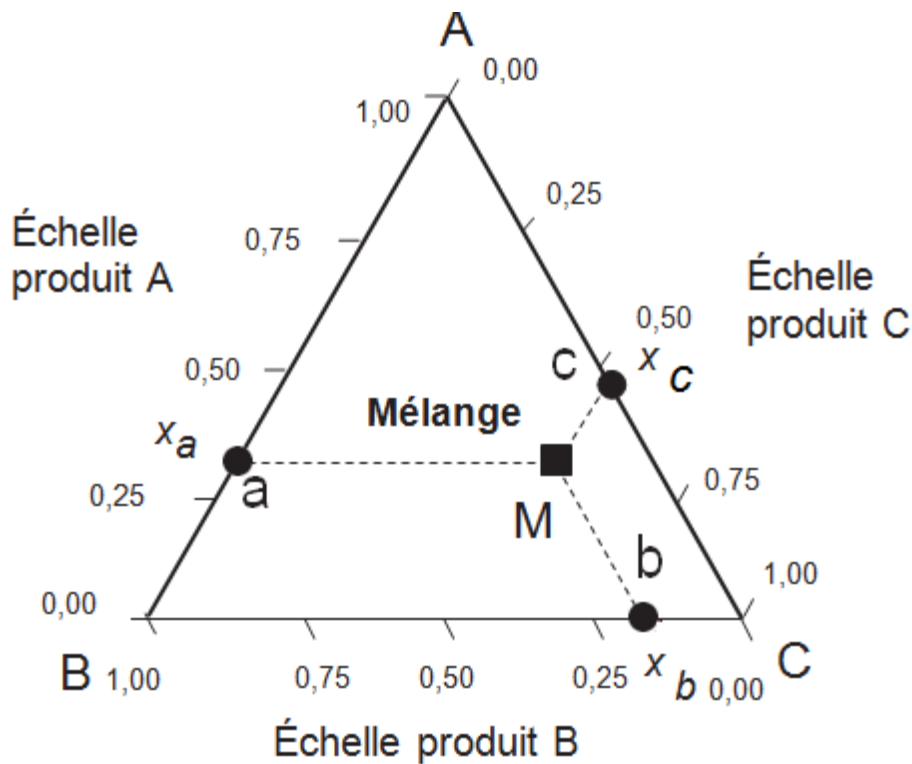
### II.4.3. Lecture du diagramme des mélanges ternaires

Un raisonnement semblable à celui que nous avons tenu pour deux constituants montre que l'on peut représenter les mélanges ternaires à l'aide d'un triangle équilatéral. Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral. Les mélanges binaires sont représentés par les côtés du triangle. Par exemple le côté gauche AB du triangle (**Figure II.5**) représente les compositions des mélanges des seuls produits A et B, et ces mélanges ne contiennent pas de produit C.

Chaque côté du triangle équilatéral est gradué de 0 à 100. On n'a laissé que l'échelle d'un seul produit sur chaque côté. L'échelle de l'autre produit se déduit par complément à 100. Le côté AB est gradué pour le produit A: 100 est au point A et 0 au point B. C'est l'échelle du produit A. Le côté BC est gradué pour le produit B: 100 est au point B et 0 est au point C. Le côté CA est gradué pour le produit C: 100 est au point C et 0 est au point A.

Un point de la surface intérieure du triangle équilatéral représente un mélange ternaire. Les compositions de chaque produit se lisent sur les côtés du triangle. La teneur en produit A se lit sur le côté AB qui est l'échelle du produit A. On projette le point M sur AB parallèlement à BC (côté

opposé à A). De même la teneur en B se lit sur l'échelle de B (côté BC) en projetant le point M sur BC parallèlement à AC (côté opposé à B). Enfin la teneur en C se lit sur l'échelle de C (côté AC) en projetant le point M sur à AC parallèlement à AB (côté opposé à C).



**Figure II.5:** Représentation des mélanges à trois constituants à l'aide d'un triangle équilatéral.

Les teneurs respectives des trois constituants dans le mélange sont données par les relations :

$$b_M = B_a = \text{teneur en A dans le mélange M}$$

$$c_M = C_b = \text{teneur en B dans le mélange M}$$

$$a_M = A_c = \text{teneur en C dans le mélange M}$$

les propriétés géométriques du triangle équilatéral assurent le respect de la contrainte fondamentale des mélanges :

$$M_a + M_b + M_c = A_c + B_a + C_b = AB = AC = BC = 1$$

### II.5. Domaine expérimental et domaine d'étude

Afin de mieux comprendre la construction du plan de mélange et de mieux interpréter les résultats, une explication géométrique de la relation facteur-réponse est donnée. Sous forme mathématique, cette relation peut s'écrire sous la forme:

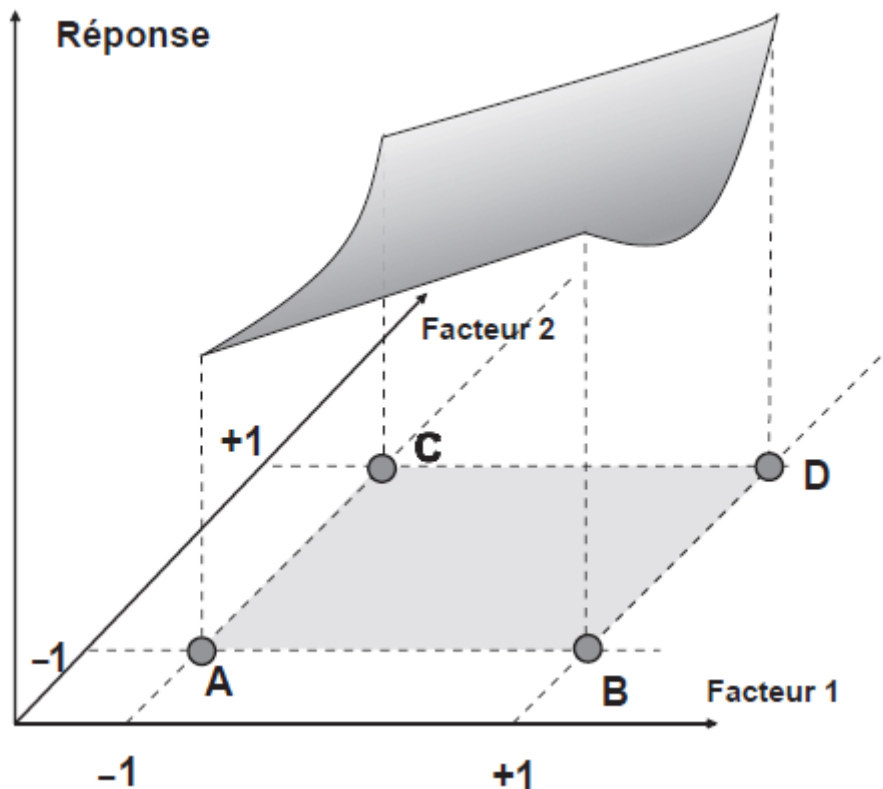
$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ (II.3)}$$

Avec

Y : réponse ou grandeur d'intérêt.

$x_i$  : variables ou facteurs.

f : fonction ou modèle mathématique qui explique le mieux les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux  $x_i$ . Cette fonction est souvent un polynôme.



**Figure II.6 :** L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'étude forme la surface de réponse[39]

En général, on ne connaît que quelques réponses, celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur. On interpole à l'aide d'un modèle mathématique, les réponses inconnues pour obtenir la surface de réponse. Les points

d'expériences retenus par la théorie des plans d'expériences assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface de réponse.

### II.6. Modèles mathématiques

Les propriétés d'une réponse (Y) dépendent de celles des facteurs (Xi), pour cela, le choix de la fonction est primordial. Cette fonction peut être représentée par un modèle mathématique judicieusement choisi. Selon la complexité du phénomène dans le domaine expérimental, l'expérimentateur peut postuler des modèles polynomiaux de *Scheffé* de différents degrés, dont les plus fréquemment utilisés sont les suivants :

Modèle polynomial du premier degré à n coefficients.

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (\text{II.4})$$

Modèle polynomial du second degré (quadratique) à  $[n + n(n-1)/2]$  coefficients.

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{23} X_2 X_3 + \dots + \beta_{n-1,n} X_{n-1} X_n \quad (\text{II.5})$$

Modèle polynomial du troisième degré (cubique réduit) à  $[n + n(n-1)(n-2)/6]$  Coefficients.

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{23} X_2 X_3 + \dots + \beta_{n-1,n} X_{n-1} X_n + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 + \dots + \beta_{n-2,n-1,n} X_{n-2} X_{n-1} X_n \quad (\text{II.6})$$

Pour ces types de modèles, les termes de chaque équation auraient une signification physique. Il faut donc noter que :

- le modèle ne comporte aucun terme constant  $\beta_0$ , qui n'aurait pas de signification: il correspondrait à la réponse expérimentale lorsque les proportions de tous les composants sont nulles.
- Même pour un degré supérieur ou égal à 2, le modèle mathématique postulé ne comporte aucun terme carré ou cubique.
- Le modèle est symétrique par rapport à tous les composants du mélange.
- Les coefficients  $\beta_i$  peuvent être interprétés comme la valeur que prendrait la réponse si le ième composant était pur ( $x_i = 1, x_j = 0$  pour  $j \neq i$ ).

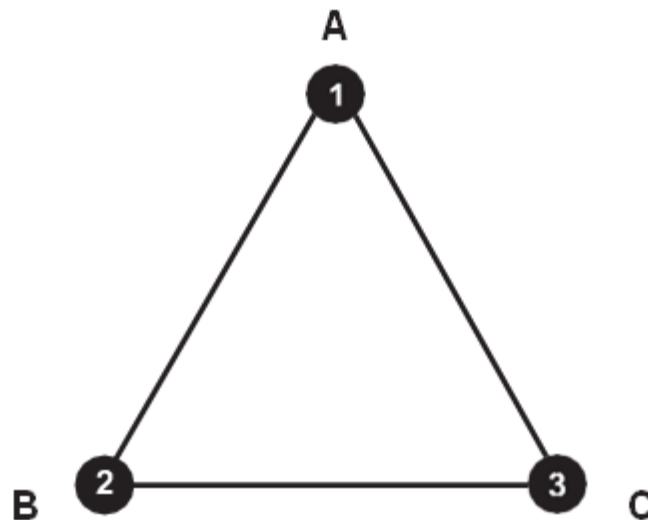
### II.6.1. Plans de mélanges classiques

Les plans de mélanges classiques supposent que les produits purs ont la propriété d'usage recherchée et qu'il n'y a aucune contrainte qui pèse sur eux. L'usage est de classer les principaux types de plans de mélanges suivant l'emplacement des points représentatifs des compositions. On distingue :

- ✓ Les plans en réseaux,
- ✓ Les plans de mélanges centrés,
- ✓ Les plans de mélanges centrés augmentés.

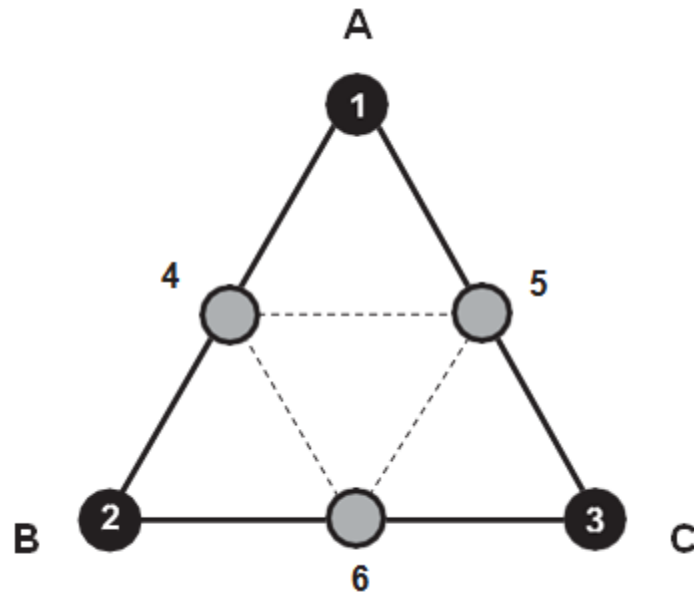
### II.6.2. Plans en réseaux

Les plans en réseaux (Simplex lattice designs dans la littérature anglo-saxonne) sont les premiers plans de mélanges qui ont été introduits. Ils ont été présentés par Scheffé . Les points de composition sont régulièrement repartis dans l'espace d'étude. Pour les mélanges à trois constituants, le plus simple des plans de mélanges en réseaux ne contient que les trois produits purs. Les points représentatifs de ces produits sont aux sommets du triangle équilatéral (**Figure II.7**). Les coordonnées de ces points sont 0 et 1.



**Figure II.7:** Plan de mélanges de trois produits purs.

Le plan qui ne fait intervenir que les produits purs peut être enrichi par les points de composition moyenne, c'est-à-dire par les mélanges contenant 50 % de chacun des produits. Ces points de composition moyenne se situent au milieu des côtés du triangle. Leurs coordonnées sont 0 et 1/2.



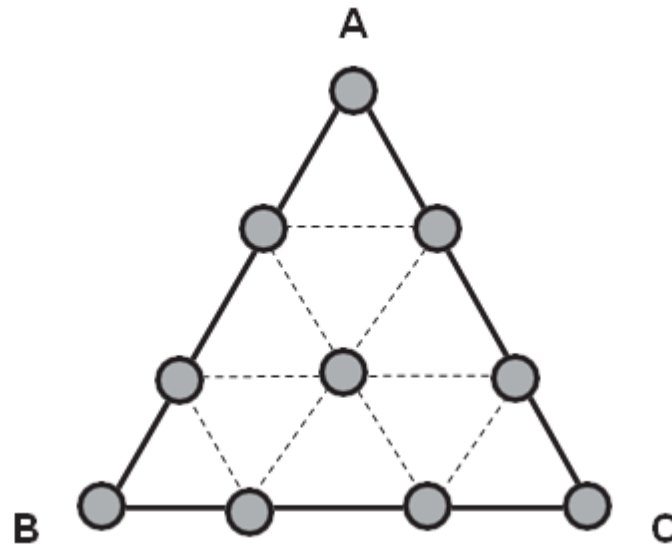
**Figure II.8:** Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges moitié-moitié.

Les points n° 4, 5 et 6 forment un réseau. La longueur unité des côtés du triangle a été divisée par 2 et les coordonnées de ces points sont égales à  $1/2$ . Si l'on désire un réseau de points plus serré, il faut diviser la longueur des côtés par trois. Le pas de ce nouveau réseau est  $1/3$ . On peut continuer à construire ainsi des réseaux de plus en plus serrés en divisant l'unité par  $m$ . Le pas du réseau est de  $1/m$  et les coordonnées des points expérimentaux sont  $0, 1/m, 2/m, 3/m$  jusqu'à  $m/m = 1$ .

Pour nommer ces plans on adopte la convention suivante : on utilise deux chiffres, le premier correspond au nombre de constituants du mélange et le second correspond au diviseur utilisé pour établir le pas du réseau. Ces deux chiffres sont séparés par une virgule et mis entre deux accolades. Ici, le plan de la (Figure II.8) est un plan  $\{3, 2\}$ , soit 3 constituants et un pas de  $1/2$ . Le plan de la (Figure II.9) est un plan  $\{3, 3\}$ , soit 3 constituants et un pas de  $1/3$ .

Cette notation permet de calculer très rapidement le nombre de compositions à préparer et à étudier connaissant le nombre de constituants du mélange et le nombre  $m$ . Pour un plan  $\{q, m\}$ , le nombre total de compositions différentes est égal à :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{m!(q-1)!} \quad (\text{II.7})$$



**Figure II.9:** Plan de mélanges en réseaux (Simplex lattice designs) comportant les trois produits purs et les mélanges  $1/3$ - $2/3$  et  $1/3$ - $1/3$ - $1/3$ .

## II.7. Applications de plan de mélange

### A. Exemple 1 : effet de différents types de sable sur les propriétés à l'état frais du béton autoplaçant (BAP)

**Bouziari et al** [40] ont fourni une modélisation de conception de mélange pour évaluer l'effet de différents types de sable sur les propriétés à l'état frais du béton autoplaçant (BAP). Une approche statistique a été utilisée pour mettre en évidence l'effet du sable de rivière (SR), du sable concassé (SC) et du sable des dunes (SD) en tant que proportions dans les systèmes binaires et ternaires dans la composition du BAP. Les réponses des modèles statistiques dérivés sont la densité de compactage du sable (SPD), T500 et J-ring. Les modèles mathématiques résultants sont utilisés pour illustrer la variation de différentes réponses dans des tracés de contours ternaires par rapport aux proportions de SR, SC et SD. Cela offre une flexibilité pour optimiser les mélanges SR, SC et SD avec une propriété sur mesure adaptée à des recommandations particulières. Les résultats des essais de 21 mélanges BAP sont utilisés pour établir des modèles statistiques pouvant décrire les effets des proportions SR, SC et SD ainsi que toutes les interactions possibles dans les systèmes binaires et ternaires, sur la variation de chaque réponse. Les coefficients des modèles proposés sont évalués sur la base de la (student's distribution), afin d'éliminer les termes non significatifs (N-S). Dans cette étude, la probabilité d'acceptation des coefficients est fixée à une valeur  $p$  inférieure à 0,05.

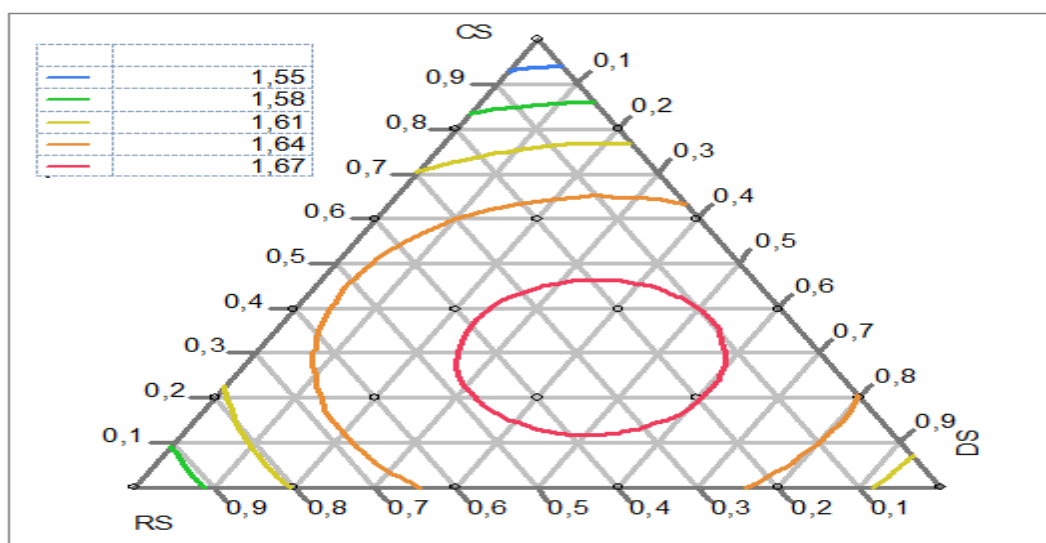
Les coefficients des modèles dérivés (Coeff.), les coefficients de corrélation (R2) et les valeurs p pour les réponses des propriétés à l'état frais sont présentés dans les tableaux. Les modèles finaux de SPD, T500 et J-ring peuvent être écrits comme :

**Tableau II.1:** Modèles obtenus

Modèles obtenus	
<b>SPD</b>	
$1.5 \times RS + 1.5 \times SC + 1.6 \times SD + 0.33 \times (SR.SD) + 0.37 \times (SR.SC) + 0.4(SC.SD)$	
<b>T500</b>	
$4.7 \times SR + 3.9 \times SC + 19.2 \times SD - 25 \times (SR.SD)$	
<b>J-ring</b>	
$72.5 \times SR + 64.4 \times SC + 43 \times SD + 48.5 \times (SR.SD)$	

**Tableau II :2** Estimations des paramètres du modèle des réponses des propriétés à l'état frais

Coefficient de réponse des propriétés mesurées			
	SPD	T500	J-ring
Coefficient de corrélation R <sup>2</sup>	0.52	0.73	0,86
Coefficients des modèles dérivés			
	SPD	T500	J-ring
SR(Mélange)	1.5	4.7	72.5
SC(Mélange)	1.5	3.9	64.4
SD(Mélange)	1.6	19.2	43
SR*SD	0.33	-25	-48.5
SR*SC	0,37	/	N-S-
SC*SD	0,4	/	N-S



**Figure II.10:** Diagramme ternaire de SPD en fonction des proportions SR, SC et SD.[40]

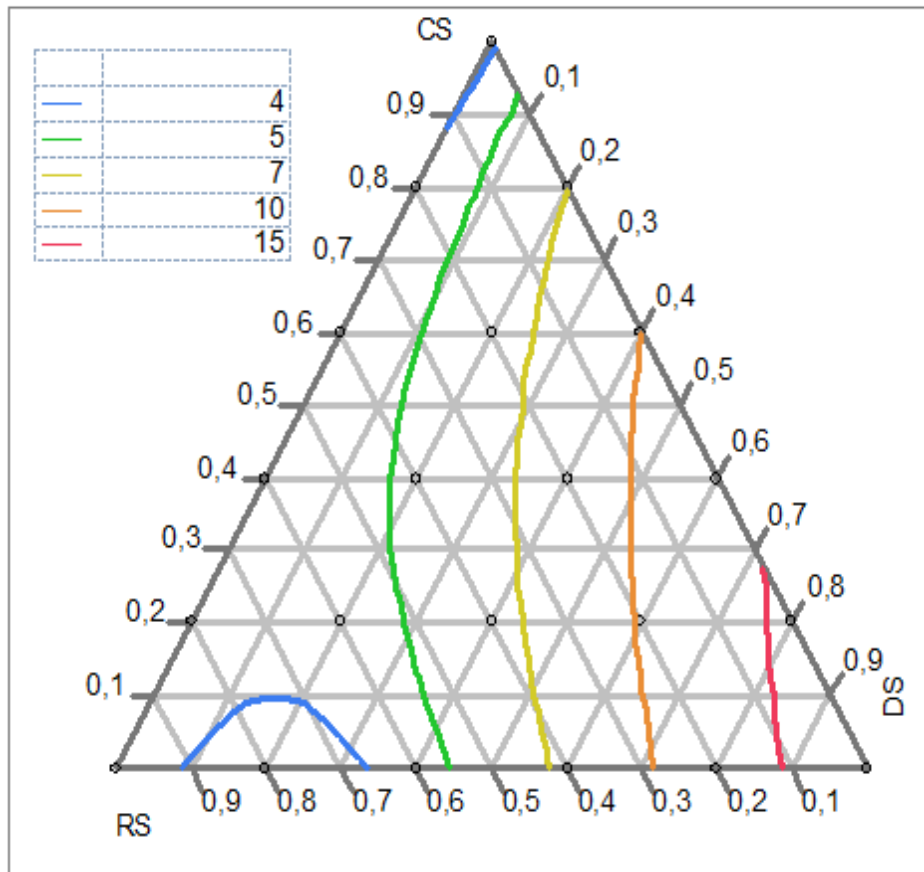


Figure II.11: Diagramme ternaire de T500 en fonction des proportions SR, SC et SD.[40]

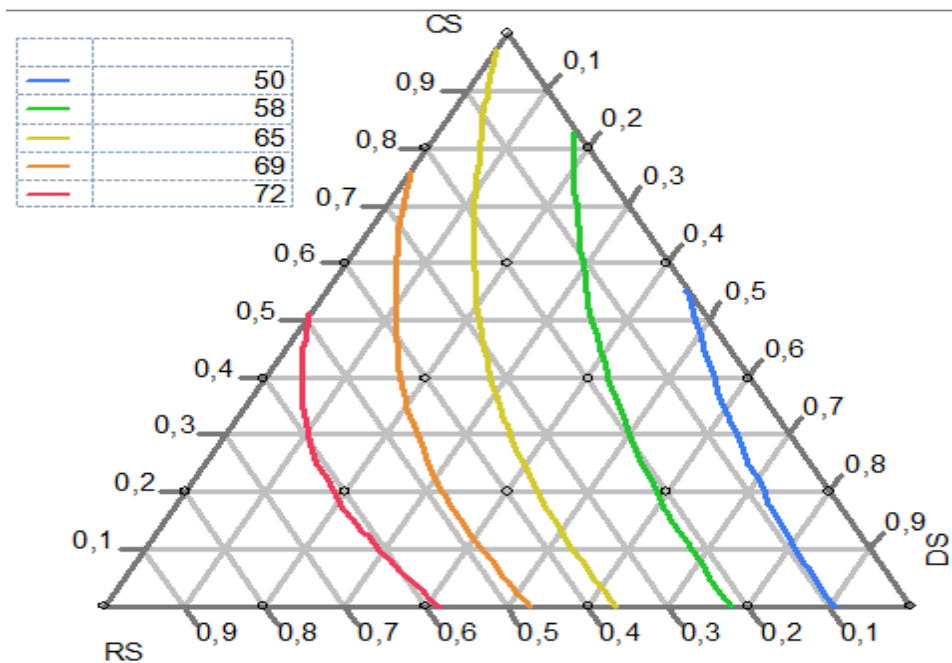
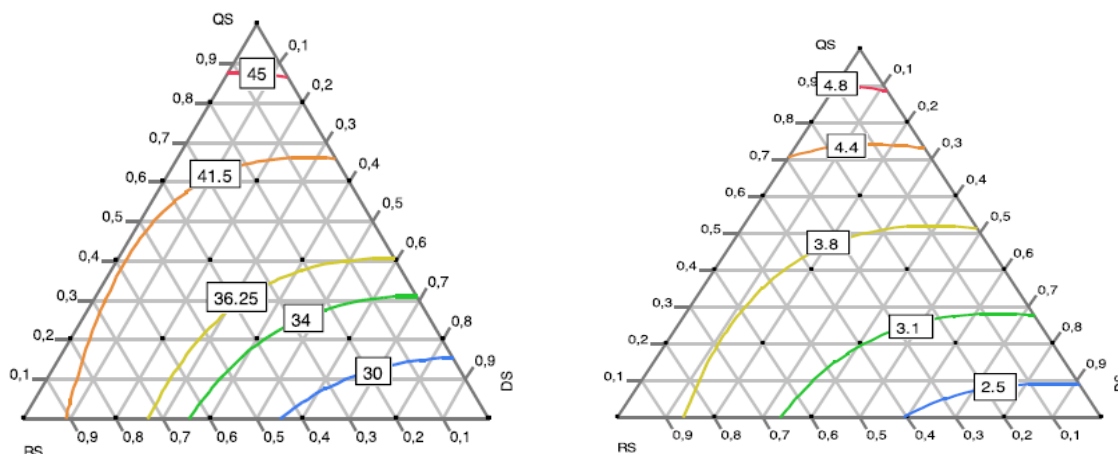


Figure II.12: Diagramme ternaire de J-ring en fonction des proportions SR, SC et SD.[40]

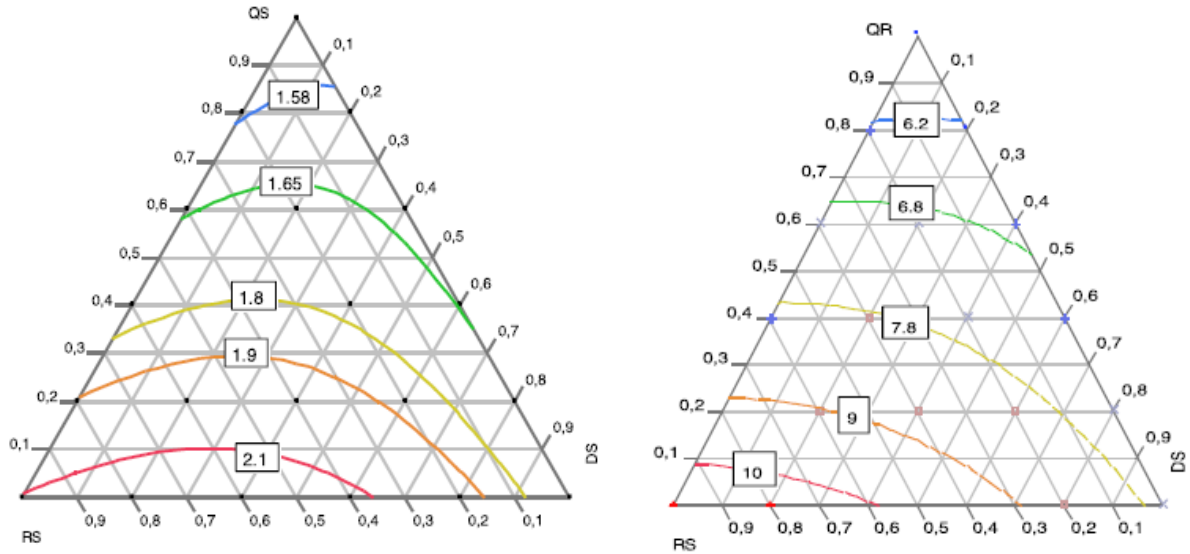
- ✓ La densité de tassement du sable (SPD) a augmenté avec l'augmentation des proportions de CS et DS dans les systèmes binaires et ternaire. Un mélange de sable composé d'environ 30 % de SD, 40 % de SC et 30 % de proportions de SR, a donné des mélanges de BAP avec une densité de tassement élevée.
- ✓ La capacité de passage, exprimée par le temps d'écoulement T500, augmente avec l'augmentation de la proportion SC dans le mélange binaire SR-SD et diminue avec l'augmentation de la proportion SD dans le système binaire SR-SC
- ✓ L'augmentation des proportions SD et SC avec SR comme systèmes binaires ou ternaires, une fluidité et une capacité de passage améliorées à travers les barres J-ring.

### B. Exemple 2 : Effet de différents types des sables sur les propriétés d'un mortier autoplaçant à haute performances

Nécira et al[41] ont mené un travail pour le but de trouver une composition optimale de MAHP avec trois types de sable (carrière, rivière et dune). L'optimisation de la composition a été réalisée en mettant en œuvre un plan expérimental mixte de type plan de mélange. Pour obtenir les propriétés rhéologiques et mécaniques qui donneront aux mélanges de mortier de sable les plus ternaires en utilisant la méthode des conceptions expérimentales, l'approche de conception de mélange peut être classée en compacité lâche et serrée des combinaisons de sable, l'affaissement et de l'entonnoir en V du mortier frais ainsi que les résistances à la flexion et à la compression du mortier durci. Les résultats ont montré que les mélanges les plus élevés aux propriétés mécaniques et rhéologiques sont ceux préparés avec 100% de sable de carrière SC.



**Figure II.13:** Diagrammes ternaires des résistances mécaniques à la compression et la résistance à la flexion[41]



**Figure II.14:** Diagrammes ternaires de l'écoulement en v-funnel vitesse relative des entonnoirs et l'écoulement d'affaissement relatif[41]

**Benabed et al** [42] ont effectué une étude sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du mortier autoplaçant (MAP) à base de différents types de sable (sable concassé, sable de rivière, sable de dunes) en utilisant les essais rhéologiques pour mesurer la viscosité. Les résultats expérimentaux indiquent que la propriété rhéologique et la résistance s'améliorent avec les mélanges de sables concassés et de rivière, mais diminuent avec les mélanges de sables concassés et de dunes, en particulier pour les teneurs en sable plus élevées. Le sable concassé avec (10 à 15 %) de fines calcaires peut être utilisé avec succès dans la production du mortier autoplaçant avec de bonnes propriétés rhéologiques et de résistance. Cependant, une réduction de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en sable dunaire (jusqu'à 50 %) dans le mortier avec des sables binaires et ternaires

### II.8. Conclusion:

la méthode de plans d'expériences pour but conduire des recherches et organiser des essais apporte souplesse, précision, sûreté, gain de temps et économie d'argent dans toute expérimentation. Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles



# *Chapitre III :*

Résultats et discussions

### III.1. Introduction

La compatibilité entre le mortier de réparation et le substrat est principalement influencée par plusieurs facteurs comprenant des propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion, module d'élasticité, etc.) et des caractéristiques de durabilité (porosité et absorption capillaire). Par conséquent, la compatibilité est le critère principal considéré dans le choix du matériau de réparation.

Dans cette partie, nous présentons la modélisation des résultats des caractéristiques des mortiers de réparation autoplacant à base de différents types de sables trouvés dans le cadre du projet de fin d'étude de master proposé et dirigé par Dr Krobba Benharzallah au cours de l'année universitaire 2019/2020 qui sont regroupés dans le **tableau III.1**, en appliquant la méthode de plan de mélanges basée sur les plans d'expériences et la discussion de ces résultats. La modélisation a été réalisée par un logiciel d'analyse statistique JMP édité par SAS-Institute (Statistical American Systems). Il permet de réaliser les calculs et de tracer les diagrammes des résultats expérimentaux trouvés.

L'influence de 15 mélanges de différents types de sable (sable alluvionnaire, sable de dune et sable calcaire) sur les propriétés physico-mécaniques à l'état durci de mortiers de réparation autoplacant MRAP tel que la résistance mécanique à la flexion  $R_f$ , la résistance mécanique à la compression  $R_C$ , le module d'élasticité  $E$  et la porosité totale  $P$  ont été étudiés.

### III.2. Modélisation des résultats trouvés par le plan de mélanges

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$ . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$y = f(x_i) \quad \text{(III.1)}$$

Les facteurs étudiés  $x_i$  (variables), qui seront utilisés dans les modèles mathématiques des réponses ( $y$ ) sont:

- Sable alluvionnaire (SA).
- Sable de dune (SD).
- Sable calcaire (SC).

Tableau III.1 : Propriétés physico-mécaniques des mortiers étudiés[43]

N	Proportions des sables			Propriétés											
	SA	SD	SC	RC7 (MPa)	RC28 (MPa)	RC90 (MPa)	RF7 (MPa)	RF28 (MPa)	RF90 (MPa)	E7 (GPa)	E28 (GPa)	E90 (GPa)	P7 (%)	P28 (%)	P90 (%)
1	0	0	1	43,65	47,62	52,64	5,87	6,43	9,47	29,59	31,11	33,58	19,4	15,71	13,75
2	0	0,25	0,75	48,63	52,78	58,79	6,54	7,19	10,29	30,62	34,23	37,14	18,80	16,96	14,23
3	0	0,5	0,5	46,89	51,57	55,83	6,26	6,74	9,95	30,59	33,83	37,15	18,88	16,88	13,90
4	0	0,75	0,25	47,24	58,82	67,53	6,19	6,55	10,11	30,16	35,81	38,78	15,71	14,69	13,29
5	0	1	0	49,95	58,65	64,40	4,89	6,82	10,57	28,80	35,10	38,18	16,85	15,92	13,36
6	0,25	0	0,75	47,80	59,10	64,66	6,99	8,05	10,94	29,70	35,30	37,72	19,08	15,03	13,85
7	0,25	0,25	0,5	52,03	60,06	64,89	7,04	7,94	10,95	31,62	34,46	39,04	16,04	13,85	12,17
8	0,25	0,5	0,25	54,68	60,90	69,73	5,86	6,72	9,85	31,96	35,14	39,78	16,93	14,79	12,44
9	0,25	0,75	0	51,25	61,07	68,86	5,66	6,44	10,02	30,83	35,74	40,60	12,99	11,98	10,83
10	0,5	0	0,5	52,55	59,40	64,20	6,99	8,15	12,18	30,00	34,77	37,55	18,15	13,67	12,23
11	0,5	0,25	0,25	52,08	57,84	64,77	6,51	7,35	10,73	31,81	35,55	38,5	15,32	12,84	11,30
12	0,5	0,5	0	49,07	59,89	66,48	6,39	7,15	9,77	30,42	36,85	40,97	14,90	13,25	11,15
13	0,75	0	0,25	51,50	61,91	67,21	6,62	7,81	10,41	30,82	36,4	40,44	17,52	15,68	13,46
14	0,75	0,25	0	48,68	58,43	65,65	5,73	6,79	10,29	30,71	34,89	39,70	13,86	11,91	10,76
15	1	0	0	45,12	57,00	61,82	5,92	6,76	9,48	30,85	34,1	37,63	16,96	14,70	13,04

### III.3. Résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques les plus importantes des mortiers de réparation structurale. Les résultats de l'essai de compression à 7, 28 et 90 jours ont été obtenus selon la norme EN 1015-11.

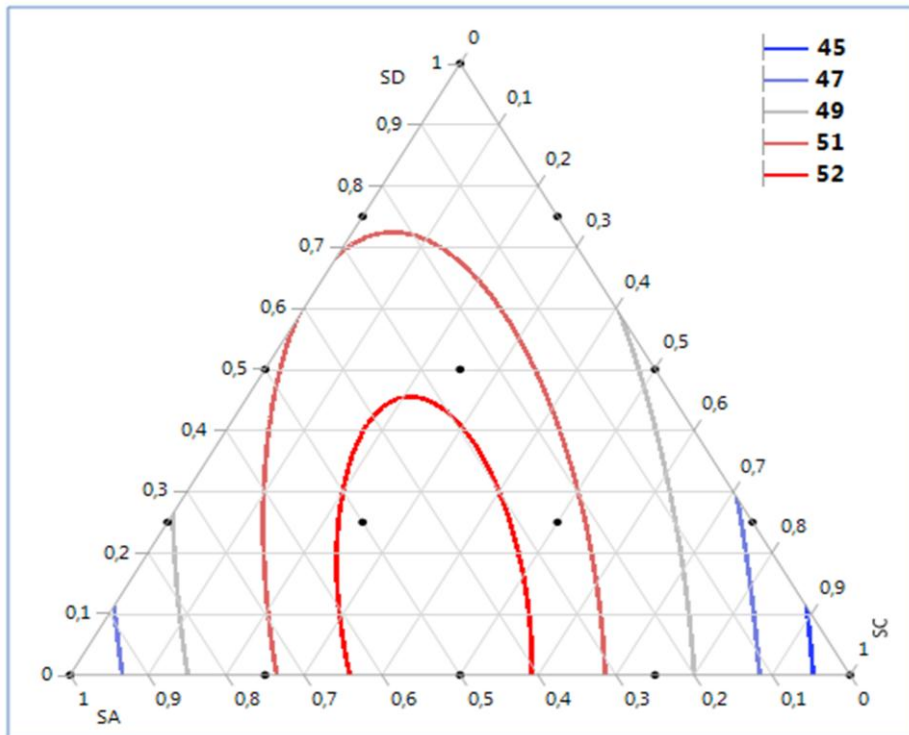
Les modèles statistiques issus du plan de mélanges pour la résistance à la compression des mortiers de réparation autoplaçant confectionnés avec les différents types de sables à 7, 28 et 90 jours sont résumés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau III.2:** Modèles obtenus de la résistance à la compression

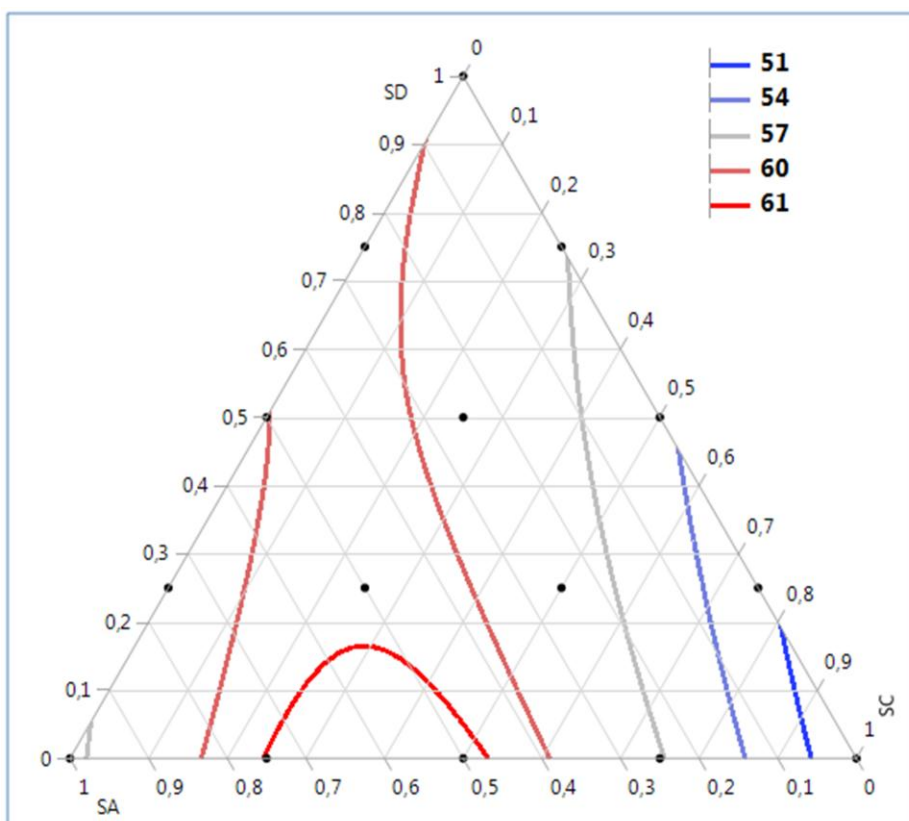
Modèles obtenus
<b>Résistances à la compression à 7 jours RC7</b>
$45,085.SA + 43,428.SC + 49,012.SD + 32,680.SA.SC + 14,991.SA.SD + 9,392.SC.SD$
<b>Résistances à la compression à 28 jours RC28</b>
$56,475.SA + 48,635.SC + 59,615.SD + 34,891.SA.SC + 7,749.SA.SD + 1,531.SC.SD$
<b>Résistances à la compression à 90 jours RC90</b>
$61,395.SA + 53,416.SC + 66,243.SD + 36,246.SA * SC + 15,463.SA.SD + 3,960.SC.SD$

Les modèles trouvés reflètent la signification relative de chaque paramètre (sable) sur la réponse étudiée (la résistance à la compression). Ces modèles ont facilité la visualisation de l'effet de chaque type de sable séparément et en combinaison avec d'autres types de sable sur les propriétés des mortiers de réparation autoplaçant, par des diagrammes ternaires avec des courbes iso-réponses présentés par les figures III.1, III.2 et III.3.

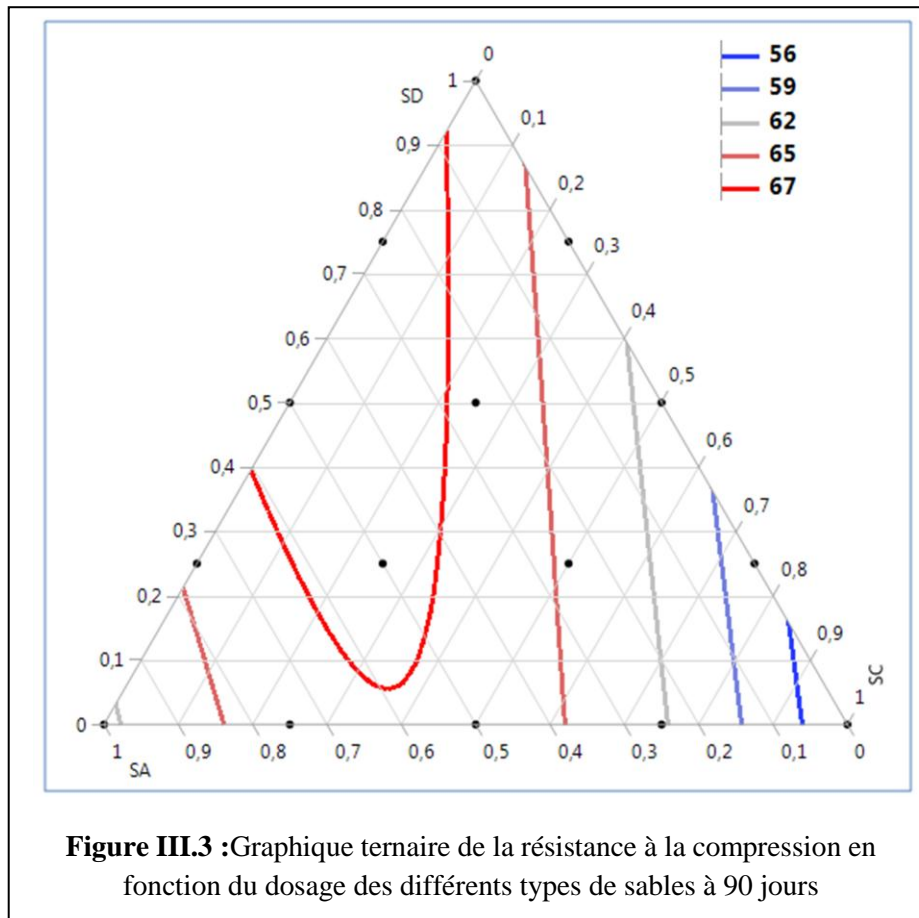
A partir du modèle dérivé de résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours, on constate que la résistance à la compression est conditionnée d'abord par l'accroissement de la teneur en sable de dunes, suivie par la teneur en sable alluvionnaire et de sable calcaire, ensuite l'effet couplé de sable alluvionnaire et de sable calcaire et puis l'effet couplé de sable alluvionnaire et de sable des dunes. En outre, une augmentation à 28 et à 90 jours des coefficients du modèle associés aux SA, SC et SD par rapport à 7 jours a été observée. Ce qui conduit automatiquement à l'augmentation de la résistance à la compression en fonction de l'âge. Cette augmentation, peut être attribuée à la cure humide des mortiers, et par voie de conséquence, l'hydratation se déroule, ce qui conduit à une meilleure densification du système poreux, d'où une augmentation de la compacité ainsi de la résistance. Il est aussi à constater que la résistance à la compression est affectée par la compacité du squelette granulaire (l'effet combiné des sables).



**Figure III.1 :** Graphique ternaire de la résistance à la compression en fonction du dosage des différents types de sables à 7 jours



**Figure III.2 :** Graphique ternaire de la résistance à la compression en fonction du dosage des différents types de sables à 28 jours



Les paramètres et les coefficients des modèles utilisés dans cette étude sont présentés dans le **tableau III.3**. Trois paramètres statistiques différents ont été utilisés pour juger la performance des données réelles et prévues, notamment : le coefficient de corrélation  $R^2$ , l'erreur quadratique moyenne RMSE et la probabilité d'acceptation du modèle P-value.

**Tableau III.3:**Paramètres des modèles des réponses étudiées (résistance à la compression)

Coefficients des réponses des propriétés mesurées			
	RC7	RC28	RC90
Coefficient de corrélation $R^2$	0,7622	0,8326	0,7586
Racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE	1,8257	2,0281	2,9177
Moyenne de réponse	49,408	57,669	63,831
P-value	<b>0,0117</b>	<b>0,0027</b>	<b>0,0124</b>
Coefficients des modèles dérivés			
	RC7	RC28	RC90
SA(Mélange)	45,085	59,615	66,243
SD(Mélange)	49,012	56,475	61,395
SC(Mélange)	43,428	48,635	53,416
SA*SD	14,991	34,891	36,246
SD*SC	32,680	7,749	15,463
SA*SC	9,391	1,531	3,960

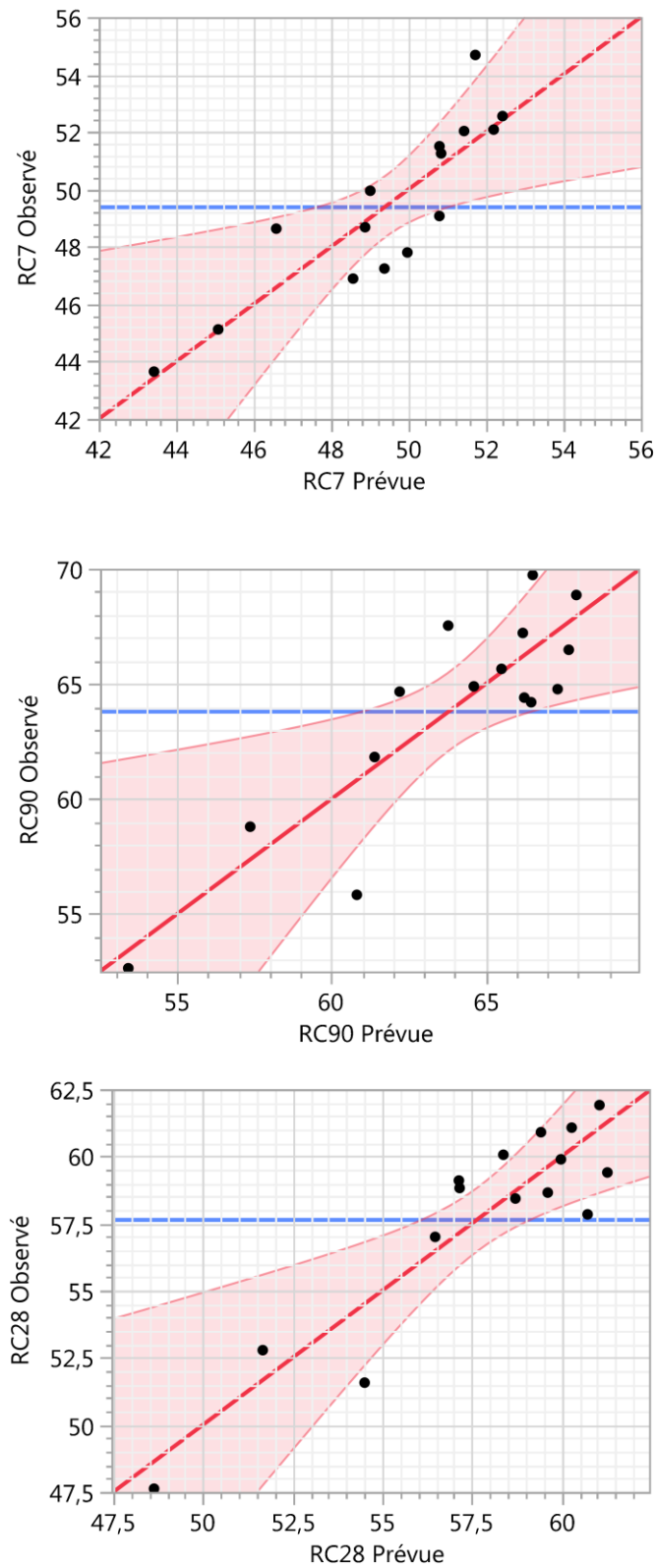
La signifiante d'une réponse est considérée dans le cas où la probabilité est inférieure ou égale à 0,05 (ce qui correspond à un intervalle de confiance de 95% pour qu'une réponse soit représentée par le modèle correspondant). Dans cette étude, la probabilité d'acceptation est fixée à une valeur P inférieure à 0,05.

À partir de ces résultats, on peut voir que les modèles dérivés ont des coefficients de corrélation relativement bons ( $R^2 > 0,75$ ) pour toutes les réponses. On peut également voir que les probabilités (P-value), sont acceptables pour toutes les réponses ( $<0,05$ ). Les modèles ont été établis pour évaluer les effets de SA, SD et SC sur les réponses étudiées. A cet effet, il est à noter que ces modèles ne prennent en compte que l'effet mélange des sables alors que le dosage en ciment et le rapport E/C ont été maintenus constants.

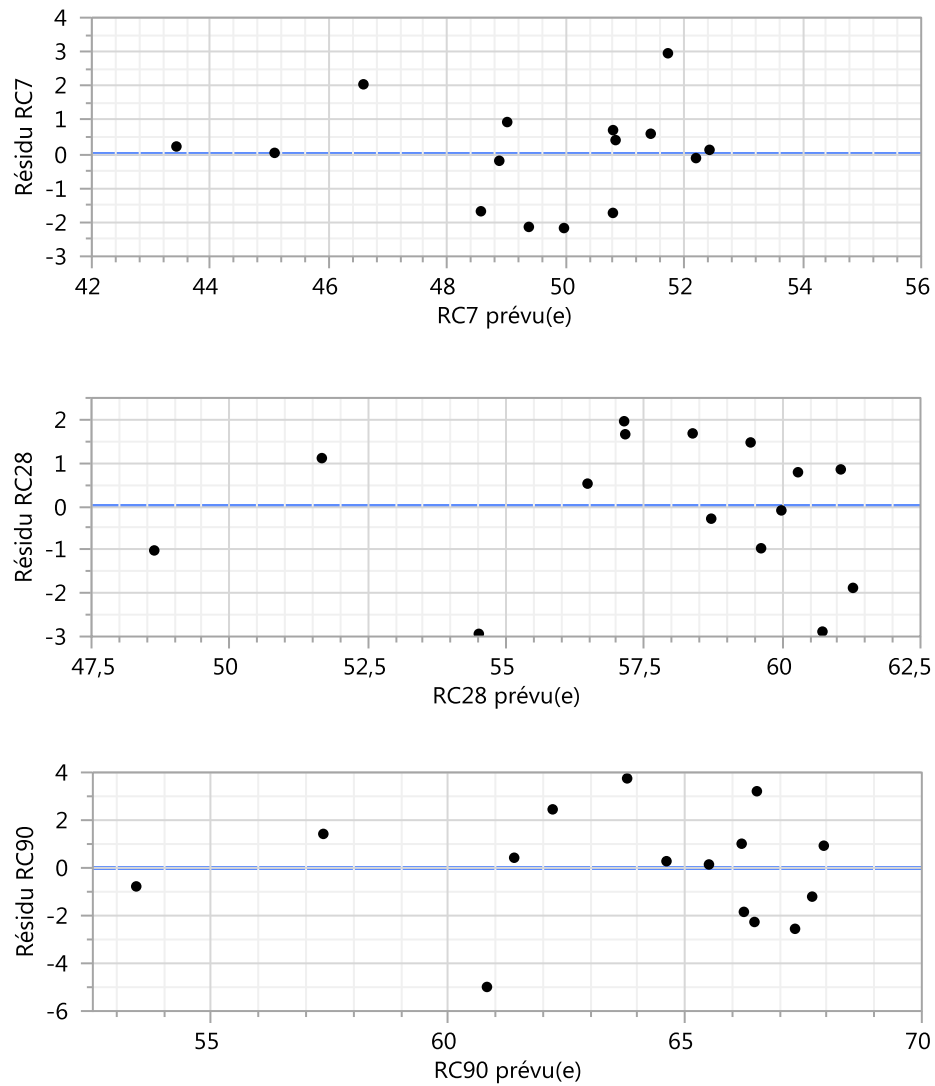
L'erreur quadratique moyenne RMSE (Root Mean Squared Error) est la moyenne des carrés des différences entre les valeurs prédites et les vraies valeurs. Elle est toujours positive et une valeur de 0 (presque jamais atteinte en pratique) indiquerait un ajustement parfait aux données. En général, une valeur de RMSE plus petite indique une meilleure précision qu'une valeur de RMSE plus élevée. Des valeurs entre 1,83 et 2,92 de RMSE ont été obtenues, ce qui indique les bonnes performances de prédiction des modèles obtenus.

Les valeurs expérimentales (observées) en fonction des valeurs prévues obtenues à partir des modèles des résistances à la compression à 7,28 et 90 jours sont présentées dans **la figure III.4**. À partir de cette figure, on peut voir que la majorité des points sont distribués à l'intérieur des limites des courbes de confiance. Cela confirme que les modèles obtenus ont pu reproduire les résultats expérimentaux avec une précision acceptable.

Les graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de tous les modèles sont présentés dans **la figure III.5**. Cette figure montre les résidus des résistances RC7, RC28 et RC90 sont dispersés d'une manière aléatoire autour de l'axe horizontal et peuvent être classés comme très bons avec une erreur aléatoire, ce qui constitue une justification supplémentaire des résultats précédents.



**Figures III.4 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues de la résistance à la compression



**Figures III.5 :** Graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de la résistance à la compression

### III.4. Résistance à la traction par flexion

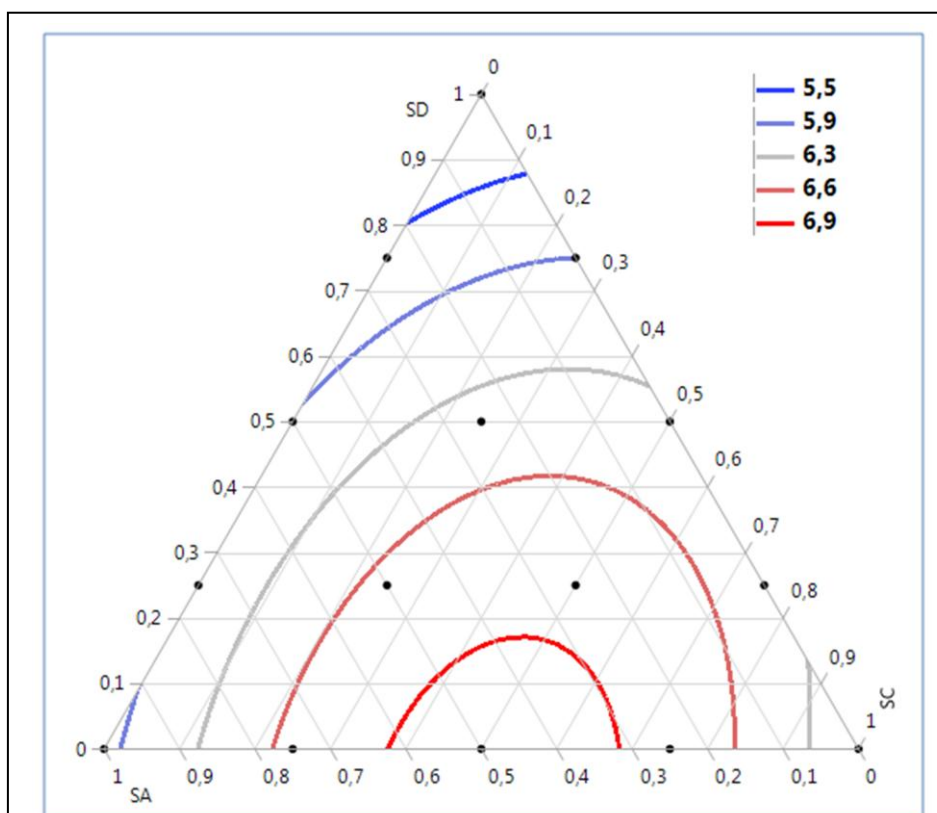
La Résistances à la traction par flexion est l'une des propriétés mécaniques de mortier de réparation structurale qui est en forte relation avec la contrainte d'adhérence mortier de réparation-béton. La valeur de cette résistance est relativement faible (notamment par rapport à la résistance à la compression). Les résultats de l'essai de traction par flexion ont été obtenus selon la norme EN 1015-11.

Comme pour le modèle de la résistance à la compression, les modèles statistiques issus du plan de mélanges des mortiers de réparation autoplaçant confectionnés avec les différents types de sables à 7, 28 et 90 jours sont résumés dans le tableau suivant

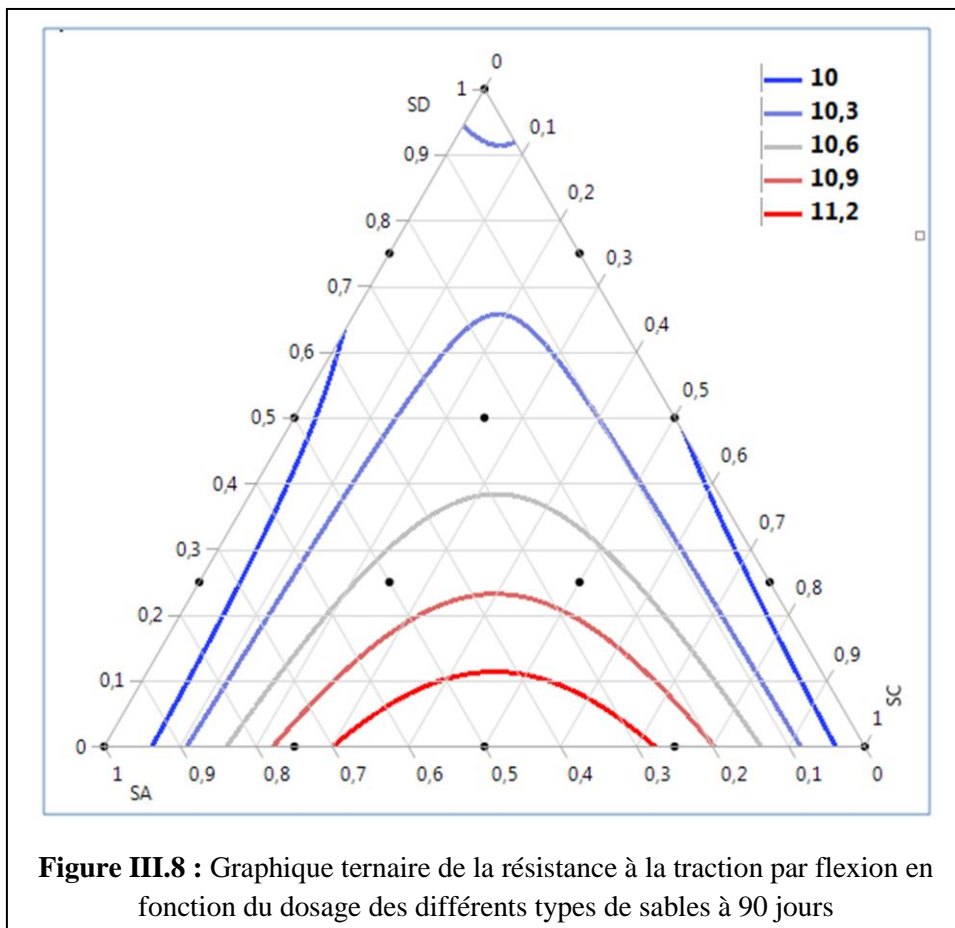
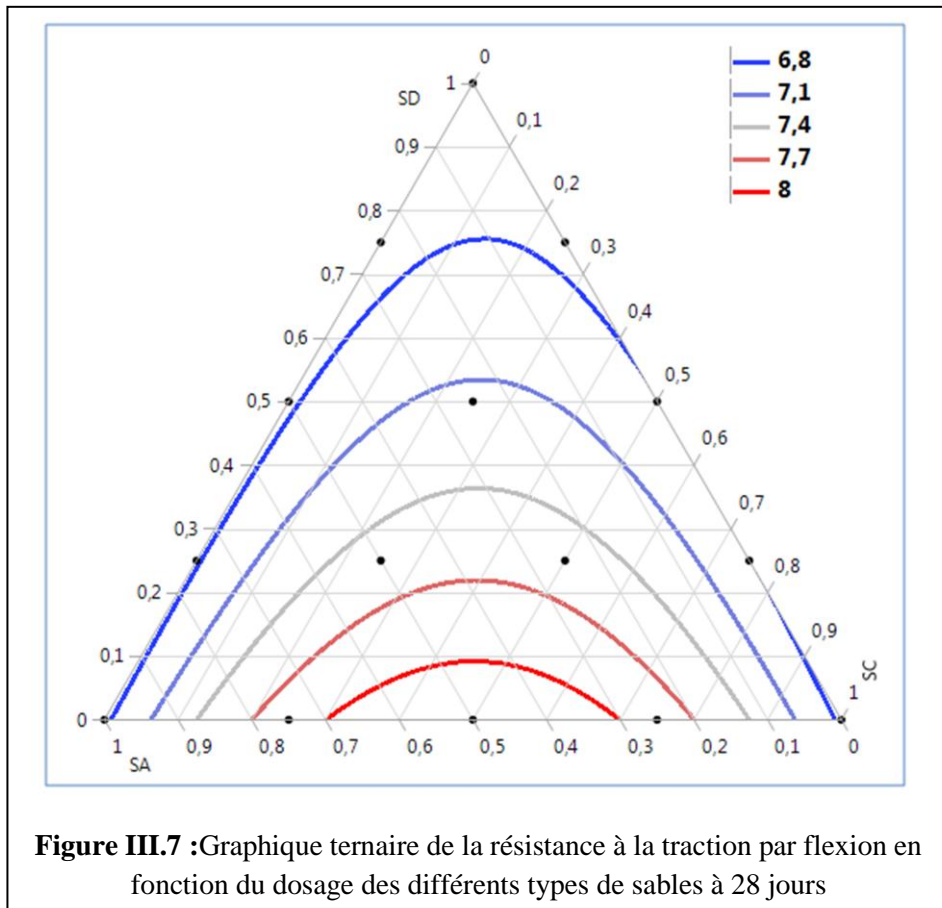
**Tableau III.4 :** Modèles obtenus de la résistance à la traction par flexion

Modèles obtenus
<b>Résistances à la traction par flexion à 7 jours Rf7</b>
$5,810.SA + 6,051.SC + 5,027.SD + 2,046.SA.SD + 4,269 .SA.SC + 3,309.SD .SC$
<b>Résistances à la traction par flexion à 28 jours Rf28</b>
$6,756 SA + 6,75 SC + 6,58 SD + 5,95 SA.SC + 0,35 SA.SD + 0,59 SC .SD$
<b>Résistances à la traction par flexion à 90 jours Rf90</b>
$9,55.SA + 9,72.SC + 10,35.SD +7,631.SA.SC + 0,23.SA.SD -0,09.SC.SD$

Le modèle statistique dérivé de la résistance à la flexion montre clairement qu'elle est régie par la teneur en sable calcaire qui mènent de manière significative à une augmentation de la résistance à la flexion, suivi par la teneur des sable alluvionnaire et sable dunaires , ensuite par l'effet couplé de sable alluvionnaire et de sable calcaire, puis l'effet couplé de sable alluvionnaire - dunaire et de sable calcaire-dunaire. Il montre ainsi que les couples SA.SC ont une grande influence sur la résistance à long terme (28 et 90 jours) en comparaison avec les couples SA.SD.



**Figure III.6 :** Graphique ternaire de la résistance à la traction par flexion en fonction du dosage des différents types de sables à 7 jours



Les paramètres et les coefficients des modèles utilisés dans cette étude sont présentés dans le **tableau III.5**

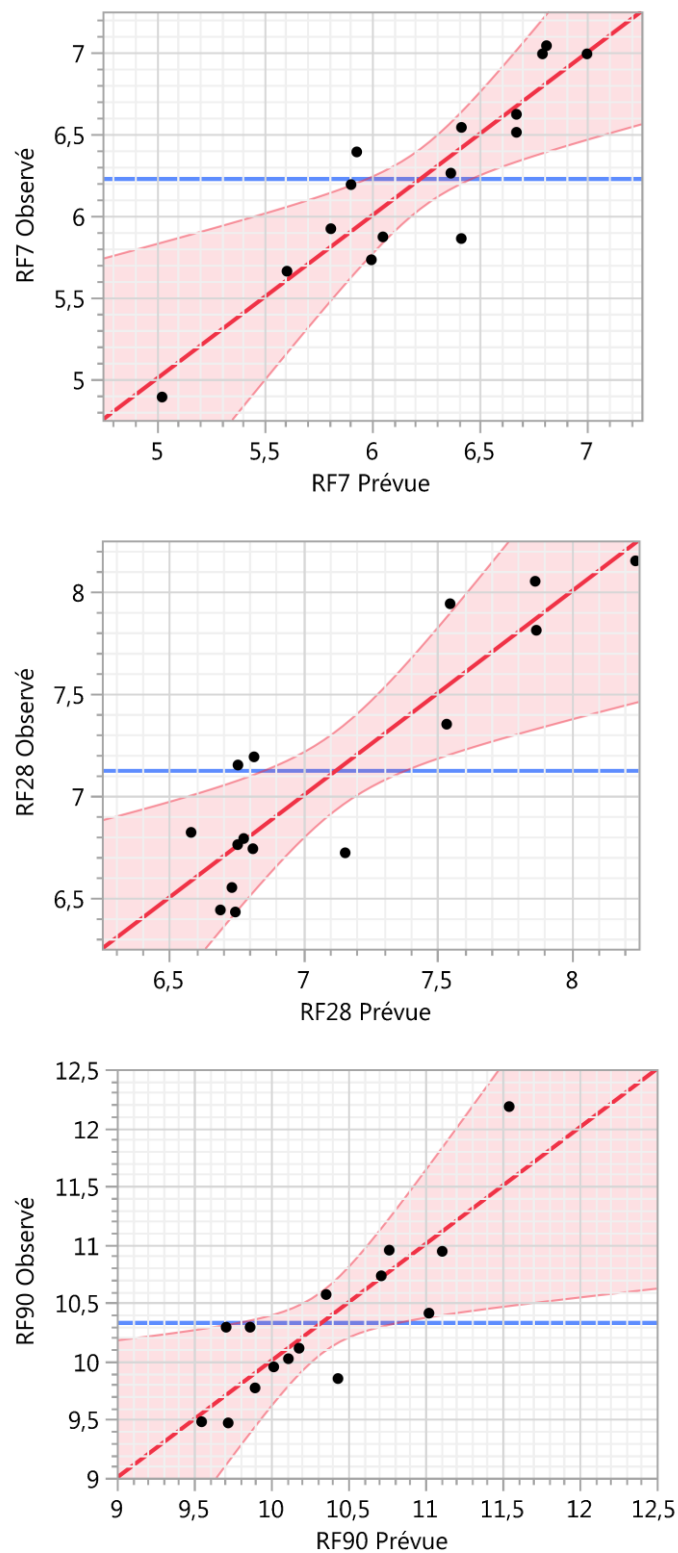
**Tableau III.5** : Paramètres des modèles des réponses étudiées (Résistance à la flexion)

Coefficients des réponses des propriétés mesurées			
	Rf7	Rf28	Rf90
Coefficient de corrélation R <sup>2</sup>	0,820	0,810	0,724
Racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE	0,314	0,3296	0,454
Moyenne de réponse	6,231	7,126	10,334
P-value	0,0037	0,0050	0,0216
Coefficients des modèles dérivés			
	Rf7	Rf28	Rf90
SA(Mélange)	5,810	6,756	9,55
SD(Mélange)	5,027	6,58	10,35
SC(Mélange)	6,051	6,75	9,72
SA*SD	2,046	0,35	0,23
SD*SC	3,309	0,59	-0,09
SA*SC	4,269	5,95	7,631

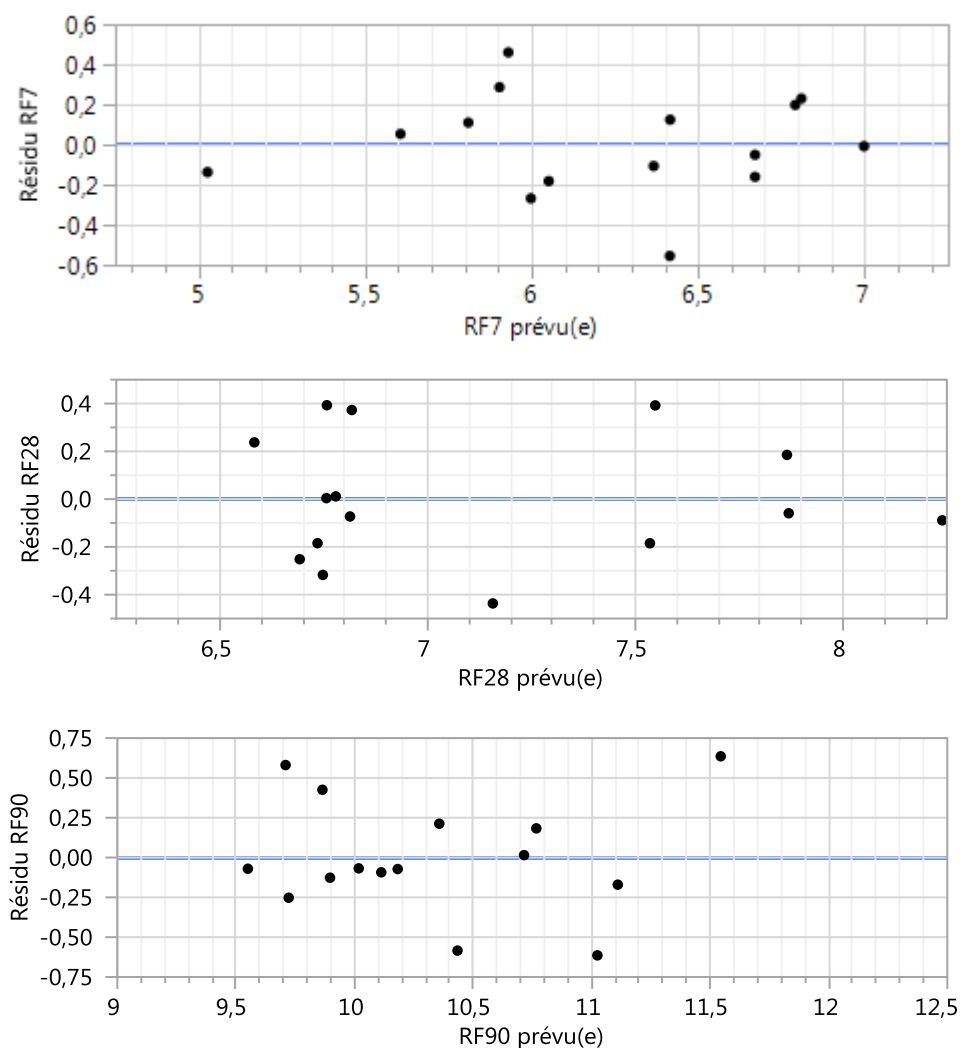
À partir de ces résultats, on peut voir que les modèles dérivés ont des coefficients de corrélation relativement bons ( $R^2 > 0,72$ ) pour toutes les réponses. On peut également voir que les probabilités (P-value), sont significatifs pour toutes les réponses ( $< 0,05$ ). Les modèles ont été établis pour évaluer les effets de SA, SD et SC sur les réponses étudiées. Des valeurs entre 0.31 et 0.45 de RMSE ont été obtenues, ce qui indique des excellentes performances de prédiction des modèles obtenus.

Les valeurs expérimentales (observé) en fonction valeurs prévues obtenus à partir des modèles des résistances à la traction par flexion à 7,28 et 90 sont présentés dans **la figure III.9**. À partir de cette figure, on peut voir que la majorité des points sont distribués à l'intérieur des limites des courbes de confiance. Cela confirme que les modèles obtenus ont pu reproduire les résultats expérimentaux avec une bonne précision.

Les graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de tous les modèles sont présentés dans **la figure III.10**. Cette figure montre les résidus des résistances Rf7, Rf28 et Rf90 sont dispersés d'une manière aléatoire autour de l'axe horizontal et peuvent être classés comme très bons avec une erreur aléatoire, ce qui constitue une justification supplémentaire des résultats précédents.



**Figures III.9 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévue de la résistance à la traction par flexion



**Figures III.10 :** Graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de la résistance à la traction par flexion

### III.5. Module d'élasticité

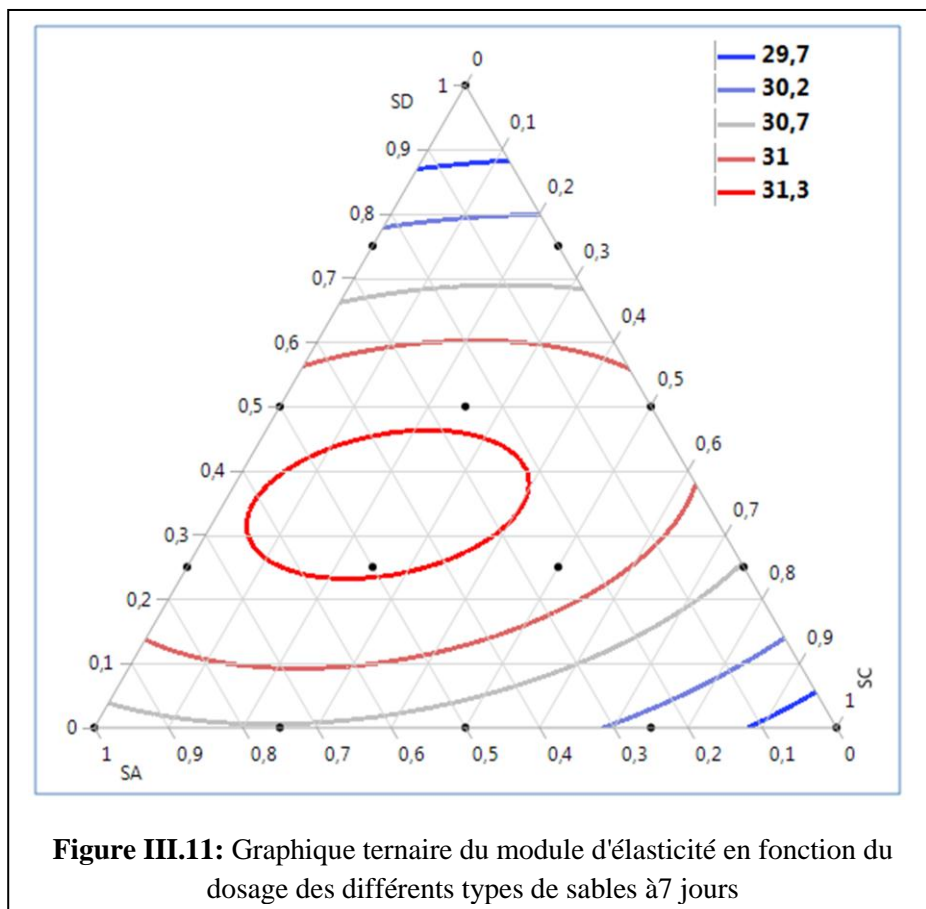
Le module d'élasticité est l'un des facteurs le plus important de la compatibilité dimensionnelle entre le béton substrat et le mortier de réparation. L'essai d'auscultation sonore permet de calculer la vitesse d'auscultation sonore et d'estimer le module d'élasticité dynamique.

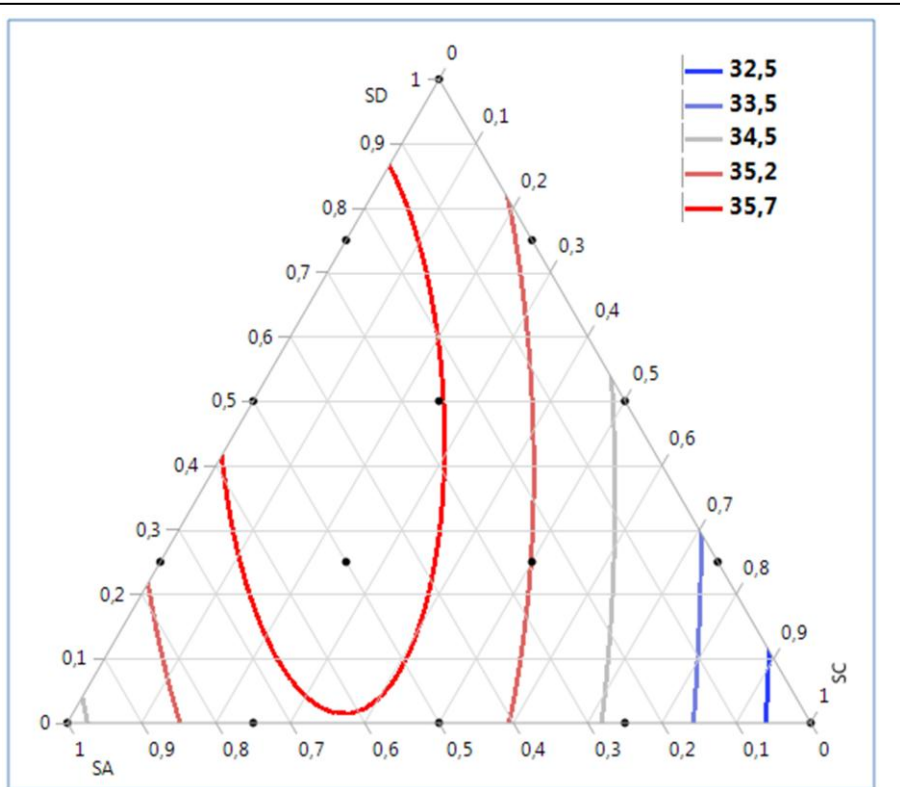
Le tableau ci-dessous indique les modèles statistiques du plan de mélanges pour le module d'élasticité des mortiers de réparation confectionnés avec les différents types de sables à 7, 28 et 90 jours.

**Tableau III.6:** Modèles obtenus du module d'élasticité

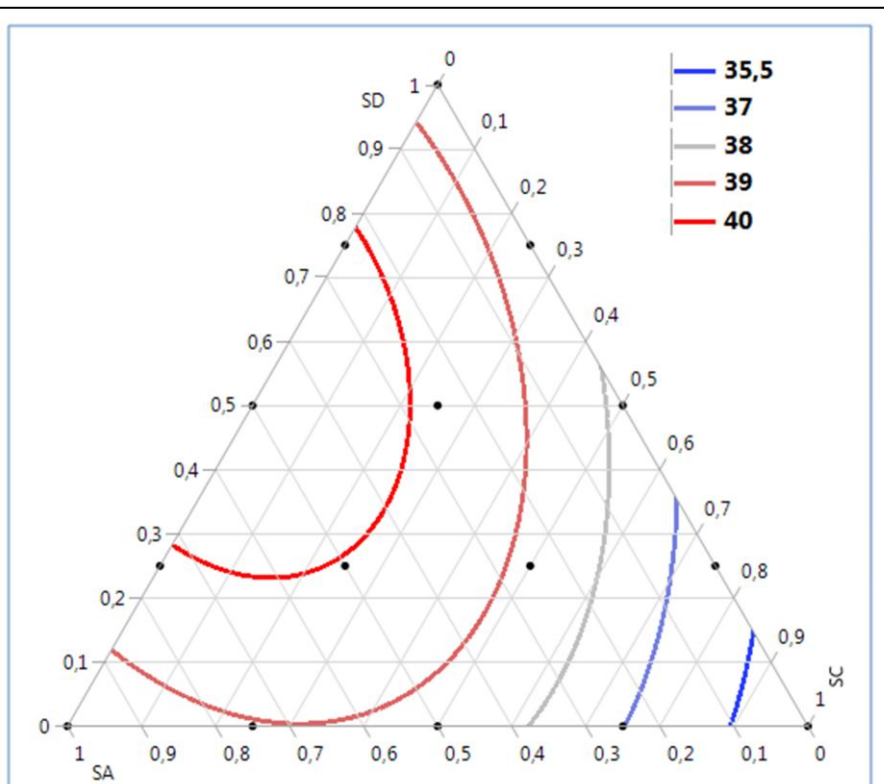
Modèles obtenus
<b>Module d'élasticité à 7 jours Ed7</b>
$30,552 SA + 29,303 SC + 28,826 SD + 2,323 SA.SC + 5,789 SA.SD + 7,969 SC.SD$
<b>Module d'élasticité à 28 jours Ed28</b>
$34,313 SA + 31,771 SC + 35,396.SD + 9,923 SA.SC + 3,871 SA.SD + 3,143 SC.SD$
<b>Module d'élasticité à 90 jours Ed90</b>
$37,963 SA + 34,121 SC + 38,524 SD + 10,303 SA.SD + 9,263 SA.SD + 5,737 SC.SD$

D'après le modèle dérivé de module d'élasticité a 7 jours , on observe que le module d'élasticité est déterminé d'abord par l'augmentation de la teneur de sable alluvionnaires, suivi par la teneur de sable calcaire et de sable de dune, ensuite l'effet couplé de sable calcaire-dunaire et puis l'effet couplé de sable alluvionnaires-dunaires et alluvionnaires-calcaires. En outre, à 28 et à 90 jours on constate une augmentation du module d'élasticité engendré par l'augmentation de taux de sable dunaire et le mélange de sable alluvionnaires et de sable calcaire.





**Figure III.12:** Graphique ternaire du module d'élasticité en fonction du dosage des différents types de sables à 28 jours



**Figure III.13:** Graphique ternaire du module d'élasticité en fonction du dosage des différents types de sables à 90 jours

Le **tableau III.7** présente les paramètres et les coefficients des modèles utilisés dans cette étude

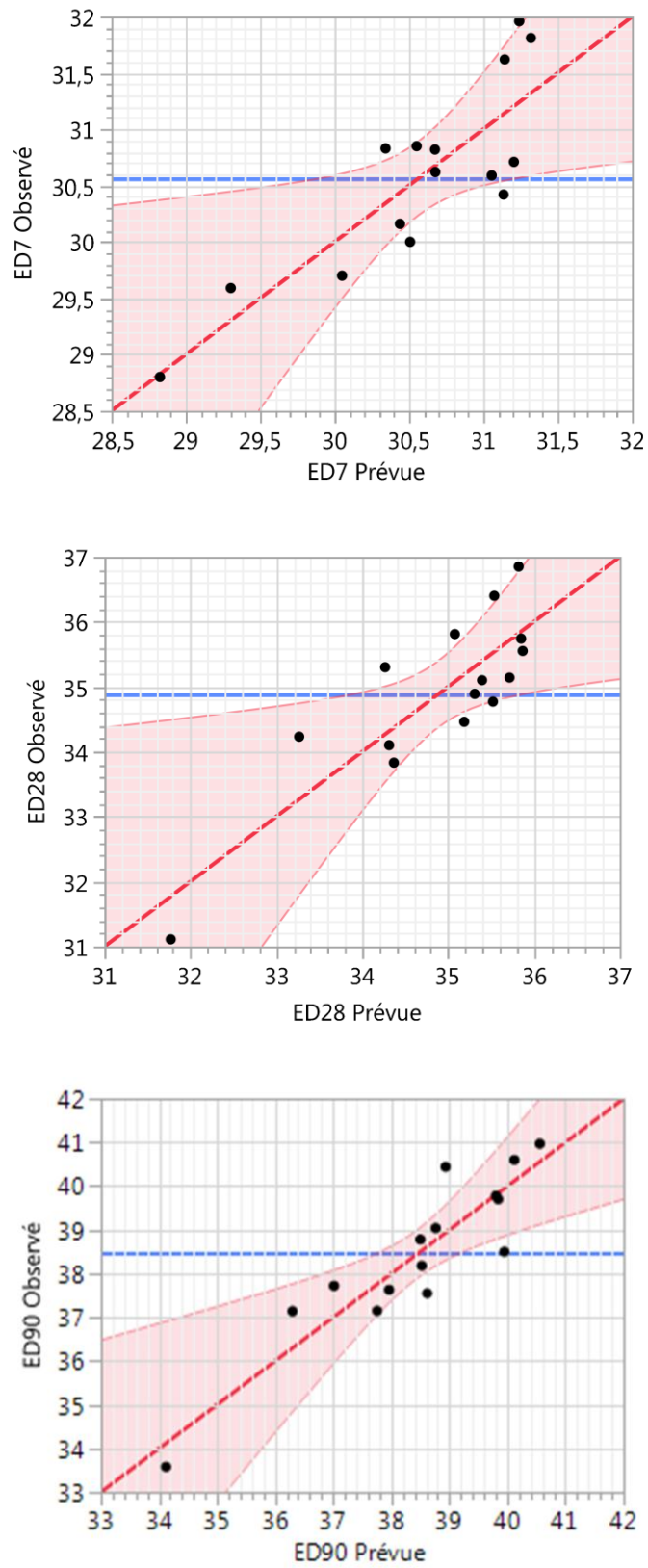
**Tableau III.7:** Paramètres des modèles des réponses étudiées (Module d'élasticité)

<b>Coefficients des réponses des propriétés mesurées</b>			
	<b>Ed7</b>	<b>Ed 28</b>	<b>Ed 90</b>
Coefficient de corrélation $R^2$	0,720	0,7250	0,830
Racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE	0,5629	0,8761	0,9530
Moyenne de réponse	30,57	34,89	38,45
P-value	0,023	0,0214	0,0029
<b>Coefficients des modèles dérivés</b>			
	<b>Ed 7</b>	<b>Ed 28</b>	<b>Ed 90</b>
SA(Mélange)	30,552	34,313	37,963
SD(Mélange)	28,826	35,396	38,524
SC(Mélange)	29,303	31,771	34,121
SA*SD	5,789	3,871	9,263
SD*SC	7,969	3,143	5,737
SA*SC	2,323	9,923	10,303

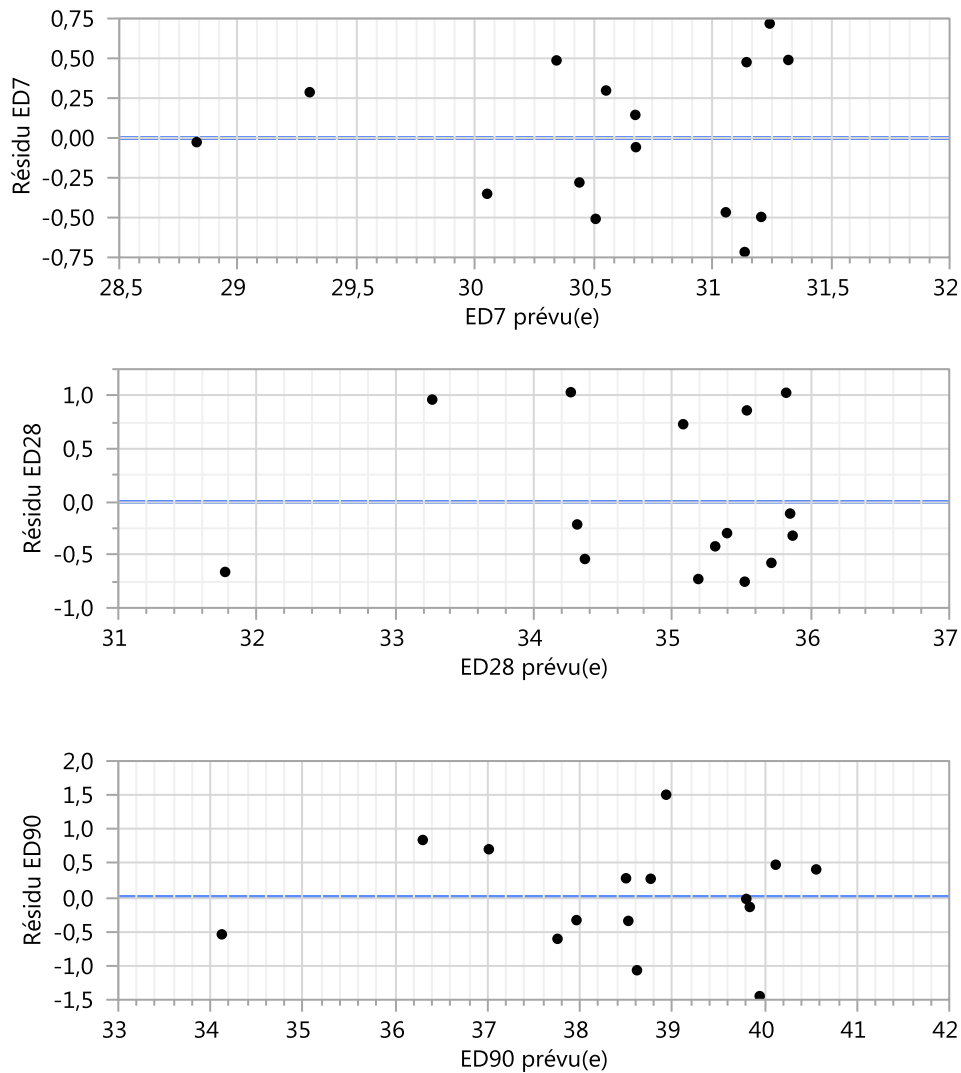
À partir de ces résultats, on remarque que les modèles dérivés ont des coefficients de corrélation bons ( $R^2$  entre 0,72 et 0,83) pour toutes les réponses. On peut également remarquer que les probabilités (P-value), sont acceptables ( $<0,05$ ). Des valeurs entre 0,56 et 0,95 de RMSE ont été obtenues, cela montre de bonnes performances de prédiction des modèles obtenus.

La **figure III.14** présente les valeurs expérimentales (observées) en fonction des valeurs prévues obtenues à partir des modèles de module d'élasticité à 7,28 et 90. À partir de cette figure, on peut voir que presque tous les mélanges sont distribués à l'intérieur des limites des courbes de confiance. Cela confirme que le modèle obtenu peut reproduire les résultats expérimentaux avec une précision acceptable.

Les graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de tous les modèles sont présentés dans la **figure III.15**. Cette figure montre les résidus des modules d'élasticité  $E_{d7}$ ,  $E_{d28}$  et  $E_{d90}$  sont dispersés d'une manière aléatoire autour de l'axe horizontal et peuvent être classés comme très bons avec une erreur aléatoire, ce qui constitue une justification supplémentaire des résultats précédents.



**Figures III.14 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues du module d'élasticité



**Figures III.15 :** Graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues du module d'élasticité

### III.6. Porosité

La porosité est souvent utilisée pour caractériser la résistance à la pénétration de substances dans les bétons et mortiers. La porosité est un indicateur important de durabilité

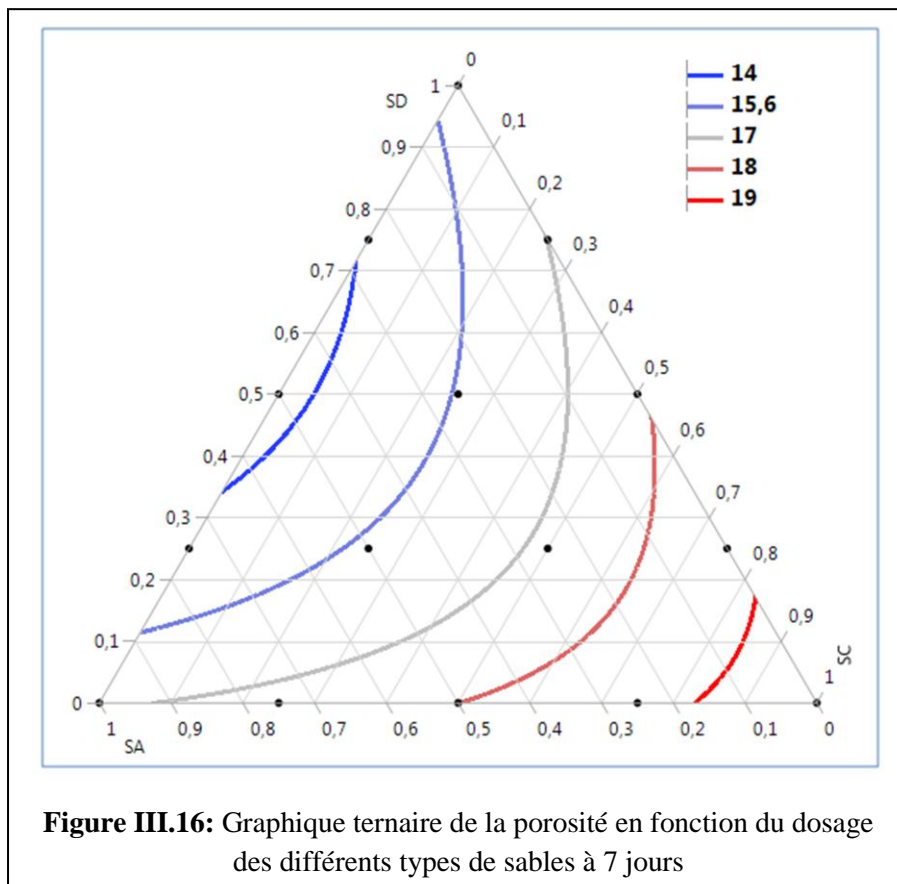
Les modèles statistiques issus du plan de mélanges pour la porosité des mortiers de réparation autoplaçant confectionnés avec les différents types de sables à 7, 28 et 90 jours sont résumés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau III.8 :** Modèles obtenus de la porosité

Modèles obtenus
<b>Porosité à 7 jours P7</b>
16.866 SA + 19.603SC + 16.192SD - 0.937 SA.SC - 11.657 SA.SD - 0.114 SC .SD
<b>Porosité à 28 jours P28</b>
14.959 SA + 15.956 SC + 15.277 SD - 4.400 SA.SC - 12.463SA. SD + 2.886 SC.SD
<b>Porosité à 90 jours P90</b>
13.118 SA + 14.023SC + 13.243 SD - 2.903 SA. SC -10.729 SA.SD + 0.660 SC.SD

A partir du modèle statistique dérivé de la porosité, il est clair que les paramètres d'étude ont une influence sur la porosité comme l'indique les coefficients de chaque paramètres et donnent des valeurs satisfaisantes.

A partir du modèle dérivé de la porosité à 7, 28 et 90 jours, on constate que la porosité est conditionnée d'abord par une l'augmentation de la teneur couplé de sable alluvionnaire et de sable des dunes. Ce qui conduits automatiquement à la diminution de la porosité ensuite l'effet combiner de la teneur de sable calcaires et de sable alluvionnaire.



**Figure III.16:** Graphique ternaire de la porosité en fonction du dosage des différents types de sables à 7 jours

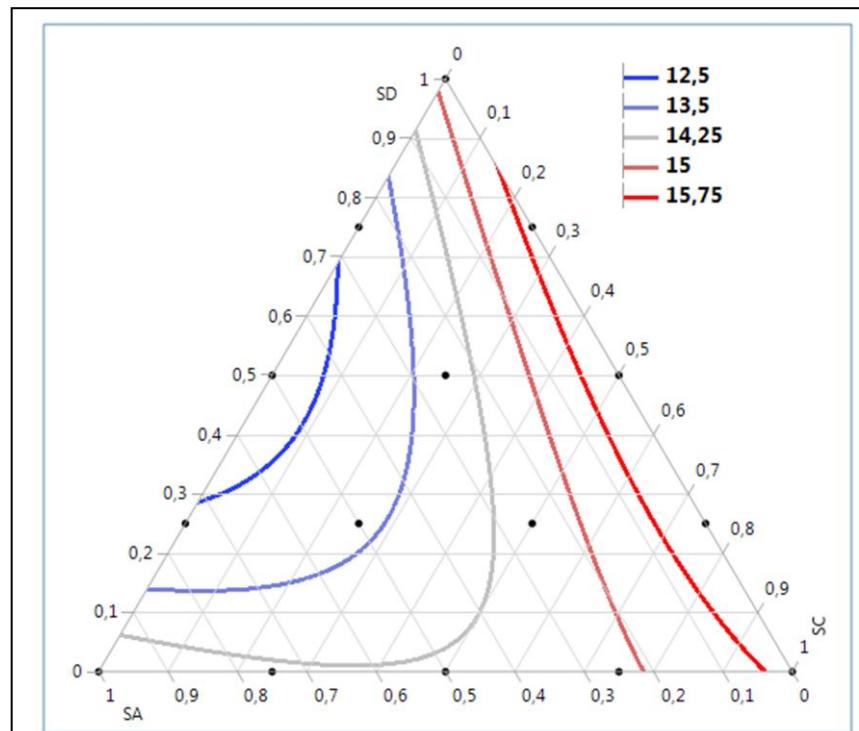


Figure 3.17: Graphique ternaire de la porosité en fonction du dosage des différents types de sables à 28 jours

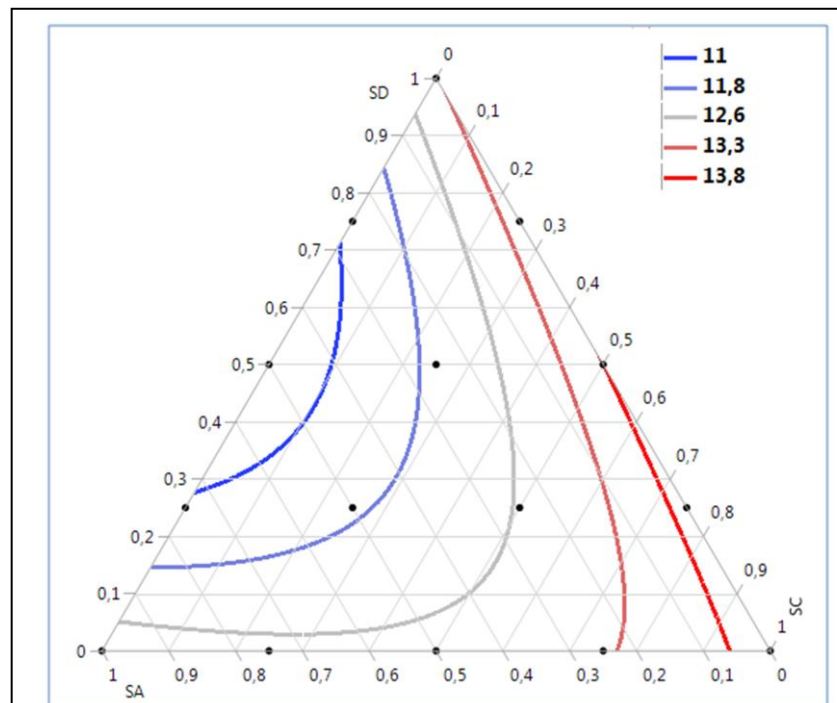


Figure III.18: Graphique ternaire de la porosité en fonction du dosage des différents types de sables à 90 jours

Les paramètres et les coefficients des modèles utilisés dans cette étude sont présentés dans le **tableau III.9**

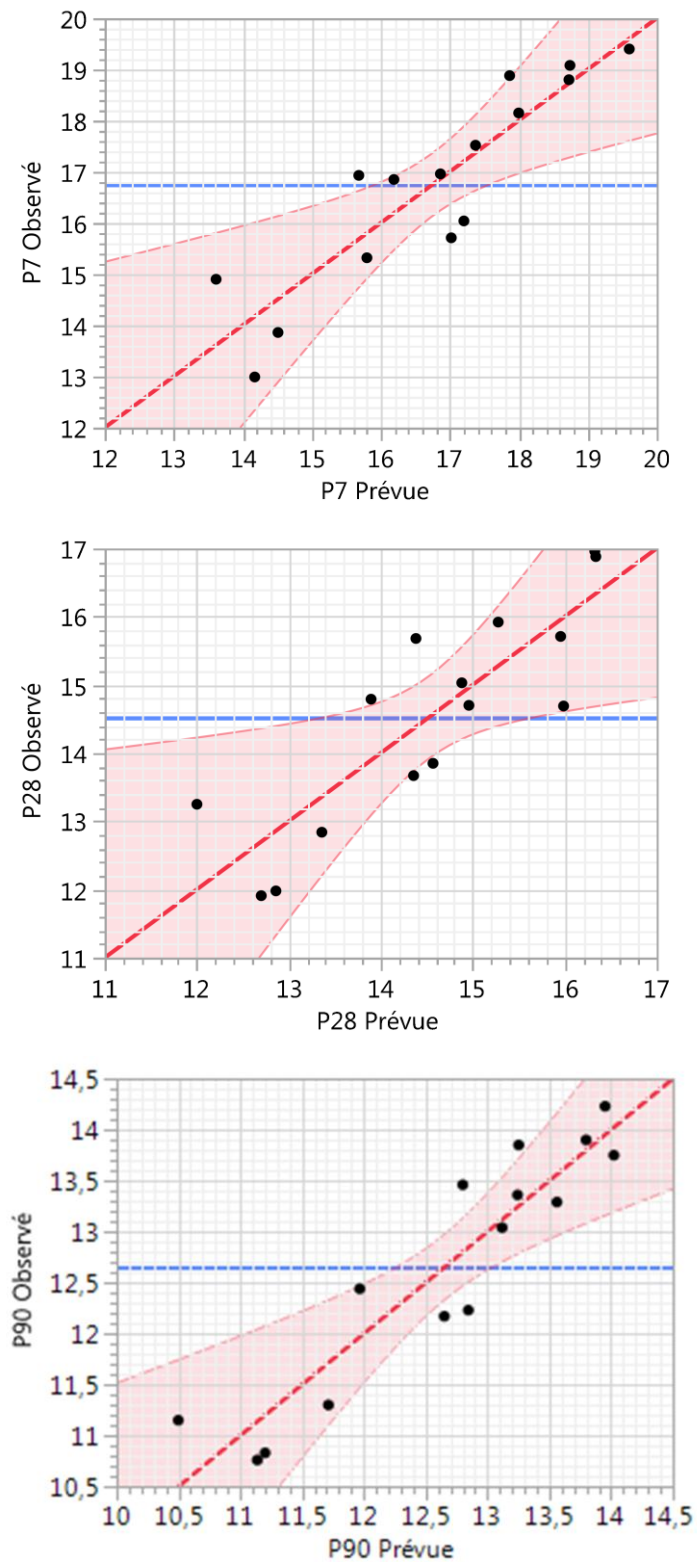
**Tableau III.9:** Paramètres des modèles des réponses étudiées (Porosité)

Coefficients des réponses des propriétés mesurées			
	P7	P28	P90
Coefficient de corrélation R <sup>2</sup>	0,812	0,728	0,861
Racine de l'erreur quadratique moyenne RMSE	1,0550	1,0351	0,5534
Moyenne de réponse	16,759	14,524	12,651
P-value	0,0043	0,0201	0,0012
Coefficients des modèles dérivés			
	P7	P28	P90
SC(Mélange)	19,603	15,956	14,023
SA(Mélange)	16,866	14,959	13,118
SD(Mélange)	16,192	15,278	13,243
SA*SD	-11,657	-12,463	-10,729
SA*SC	-0,937	-4,400	-2,903
SD*SC	-0,114	2,886	0,660

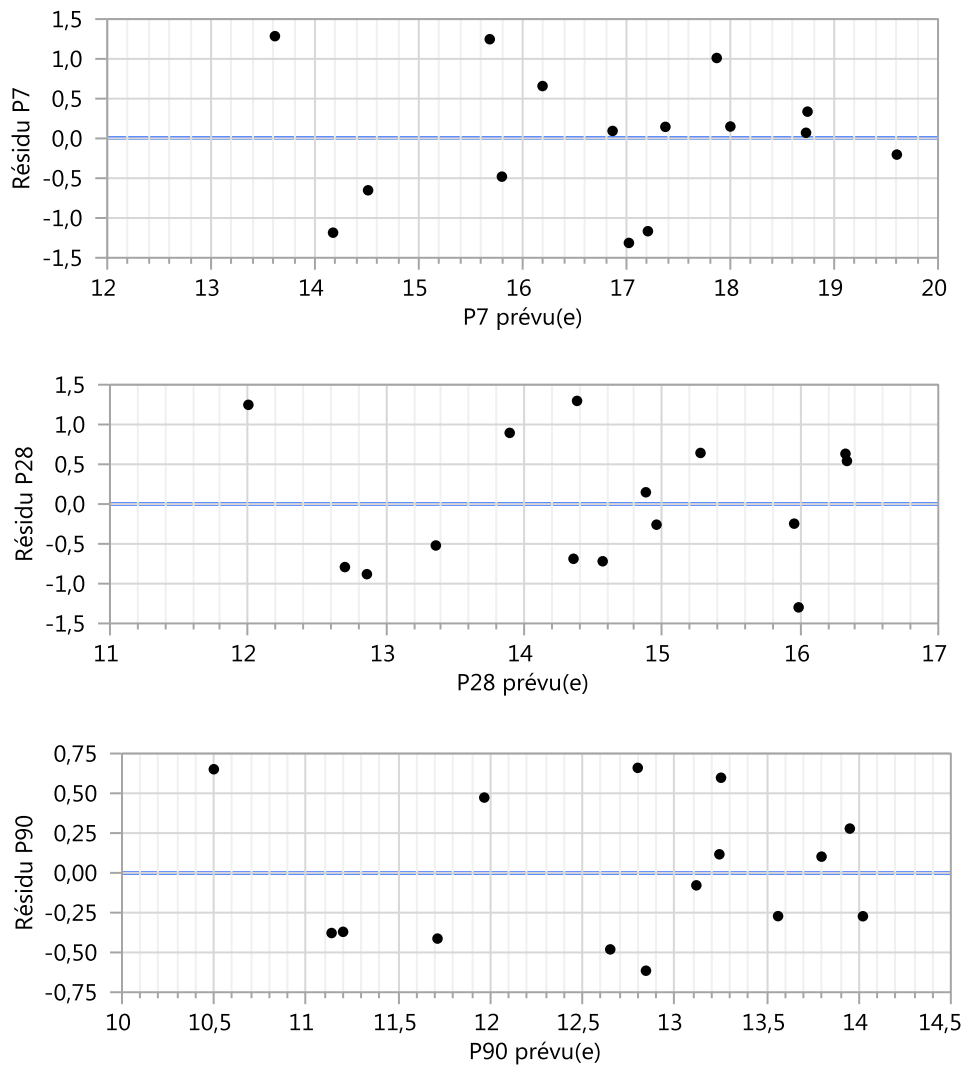
À partir de ces résultats, on observe que les modèles dérivés ont des très bons coefficients de corrélation ( $0.72 < R^2 < 0.86$ ) pour toutes les réponses. On peut également observer que les probabilités (P-value), sont significatif pour toutes les réponses ( $< 0,05$ ). Des valeurs de RMSE qui ont entre 0.55 et 1.05, ce qui présentes des bonnes performances pour la prédiction des modèles obtenus.

Les valeurs expérimentales (observés) en fonction valeurs prévues obtenus à partir des modèles de la porosité à 7,28 et 90 sont présentés dans **la figure III.19**. À partir de cette figure, on peut remarquer que la majorité des points sont distribués à l'intérieur des limites des courbes de confiance. Cela confirme que les modèles obtenus ont pu reproduire les résultats expérimentaux avec une précision acceptable.

Les graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de tous les modèles sont présentés dans **la figure III.20**. Cette figure montre les résidus des porosités P7, P28 et P90 sont soumis au hasard autour de l'axe horizontal et peuvent être classés comme très bons avec une erreur aléatoire, ce qui constitue une justification supplémentaire des résultats précédents.



**Figures III.19 :** Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévües de la porosité

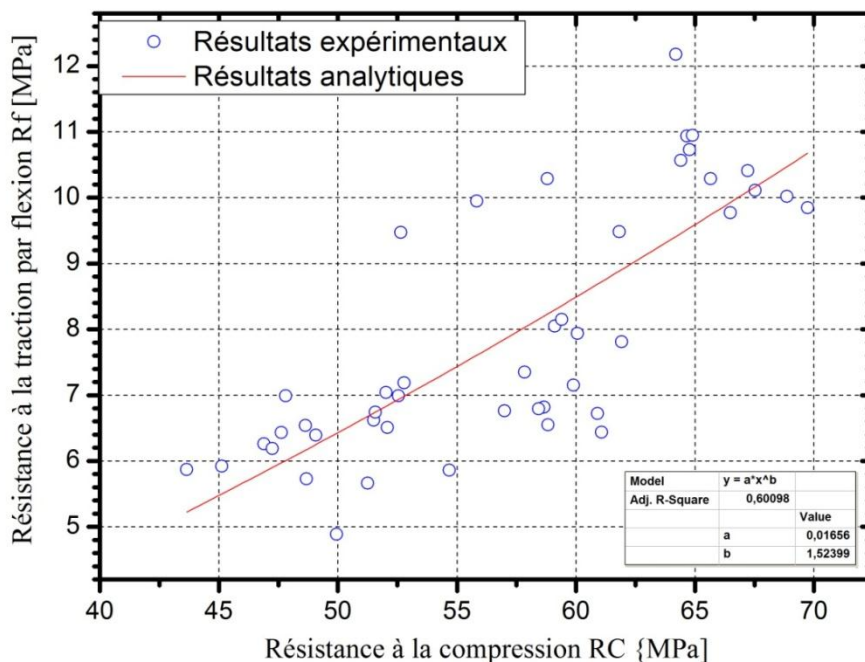


Figures III.20 : Graphiques des résidus en fonction des valeurs prévues de la porosité

### III.7. Corrélation entre les propriétés des mortiers élaborés

#### III.7.1. Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion

Les résistances mécaniques sont les propriétés les plus importantes du mortier de ciment qui décrivent sa qualité et ses performances. La mesure directe de la résistance à la traction d'un béton ou mortier n'est pas facile parce qu'elle exige l'utilisation d'un montage complexe. Cette résistance est donc généralement calculée en utilisant des mesures indirectes telles que la mesure de la résistance en flexion selon la norme EN 1015-11 au laboratoire. Plusieurs chercheurs sont en accord sur l'existence des relations entre la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression.



**Figure III.21:** Corrélation entre la résistance à la flexion et la résistance à la compression

La relation linéaire proposée par ACI 363R entre la résistance à la traction par flexion et la racine carrée de résistance à la compression prend la forme exprimée par l'équation suivante :

$$R_f = k \cdot R_c^a \quad (\text{III.2})$$

Par conséquent, dans cette étude, nous avons exploré la résistance à la flexion  $R_f$  et la résistance à la compression. La figure III.21 illustre cette relation qui est présentée par l'équation (III.2) avec un coefficient de corrélation de 0,600. L'analyse de régression montre

une bonne corrélation entre les valeurs de résistance à la traction par flexion et de résistance à la compression.

$$R_f = 0,0165.R_c^{1,524} \text{ (III.3)}$$

La forme non linéaire par la figure III.21 est similaire à celle proposés par ACI 363R

### III.7.2. Relation entre le module d'élasticité et la résistance à compression

Plusieurs chercheurs sont en accord sur l'existence des relations entre la résistance à la compression et le module d'élasticité des bétons ou des mortiers à l'état durci. Dans la pratique, on cherche souvent à trouver la relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression, pour n'avoir à estimer que l'une des deux caractéristiques. En général, on cherche à prédire le module d'élasticité à partir de la résistance à la compression ou le contraire.

Il existe des modèles empiriques tels que l'Eurocode 2, le BS 8110 et l'ACI 318R-02 permettant d'estimer le module d'élasticité en fonction de la racine carrée ou cubique de la résistance à la compression **Tableau III.10**[21]

**Tableau III.10** : Exemples de quelques modèles de prédiction du module d'élasticité[21]

Codes	Equation	Unités
ACI318-08	$E_s = 0.043\rho^{1.5}(R_c)^{0.5}$	$14800\text{kg/m}^3 \leq \rho \leq 2480$ $\text{kg/m}^3$ $R_c(\text{MPa}); E_s(\text{MPa})$
Eurocode 2	$E_s = 22(R_c/10)^{0.3}$	$R_c(\text{MPa}); E_s(\text{MPa})$
BS 8110	$E_s = 9100(R_c)^{0.33}$	$R_c(\text{MPa}); E_s(\text{MPa})$
ACI 318R-02	$E_s = 4.73(R_c)^{0.5}$	$R_c(\text{MPa}); E_s(\text{MPa})$

Dans le but de prédire un modèle mathématique reliant le module d'élasticité avec la résistance à la compression, la figure III.22 présente la relation entre la racine carrée de la résistance à la compression et le module d'élasticité à 7, 28 et à 90 jours des différents types des mortiers avec un coefficient de corrélation  $R^2$  de 0.997.

Cette relation suivent une tendance linéaire présentée par l'équation III.2 de coefficient de corrélation très proche de 1 qui est égal a  $R^2 = 0.997$ , indiquant une meilleur concordance entre les deux paramètres.

$$E=4,61R_c^{0.5} \text{ (III.4)}$$

Cette expression est similaire à celle donnée par ACI 363R

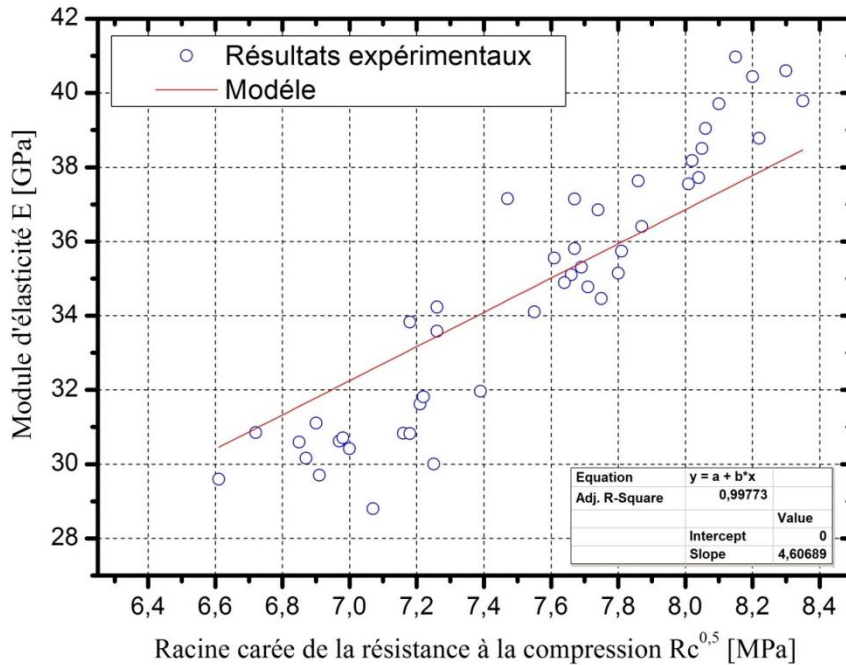


Figure III.22 : Corrélation entre le module d'élasticité et la résistance à compression

### III.7.3. Relation entre la résistance à la compression et la porosité

La porosité totale d'un échantillon de mortier est définie comme le rapport du volume des vides (Vv) sur le volume total (Vt) de l'échantillon. Cette grandeur est exprimée en pourcentage. Une distribution granulométrique adéquate assure une faible porosité du squelette granulaire, ce qui se traduit éventuellement par une bonne performance du béton ou du mortier, et par conséquent améliore la résistance à la compression. Plusieurs chercheurs ont suggéré diverses modèles mathématiques liant la résistance à la compression à la porosité du béton ou du mortier normal tel que les formules de Balshin, Hasselman, Ryshkewitch...ect. L'une des formules les plus répandues c'est la formule de Balshin. Cette formule présente une bonne justification théorique et constitue une version spécifique d'une formule plus générale dont l'expression mathématique est donnée par :

$$R_c = R_{c_0} (1-P)^a \text{ (III.5)}$$

Où a est les coefficients des modèles,  $R_{c_0}$  la résistance en compression à porosité nulle.

La figure III.23 illustre la relation entre les résistances à la compression et la porosité des différents mortiers autoplaçant à 7, 28 et 90 jours. L'application théorique du modèle de Balshin exprime la relation entre la résistance à la compression et la porosité des mortiers. Les résultats expérimentaux trouvés indiquent l'existence d'une relation non linéaire entre la résistance à la compression et la porosité l'expression proposée est III.6 Ces résultats sont en accord avec Usman et al[37]

Le coefficient de corrélation entre les valeurs des résultats expérimentaux et le modèle est faible mais acceptables  $R^2 = 0,6$

$$R_c = 101,203(1 - p)^{3,65} \text{ (III.6)}$$

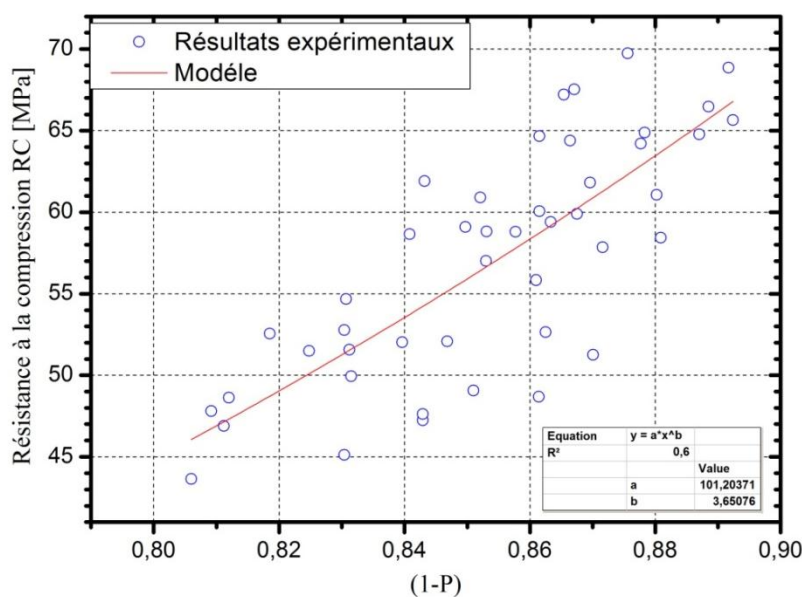


Figure III.23 :Corrélation entre la résistance à la compression et la porosité

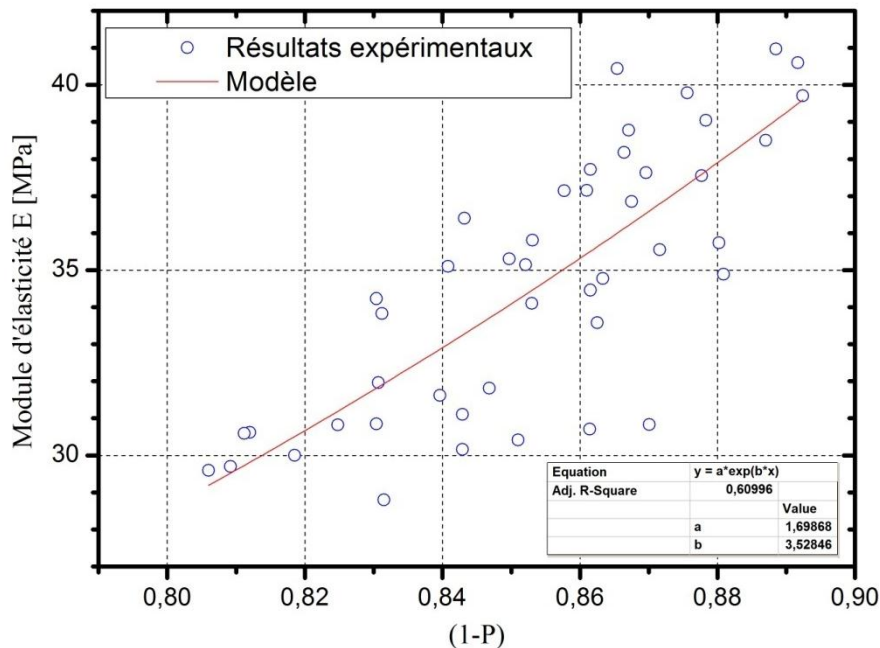
Les résultats expérimentaux confirment une relation tout à fait évidente entre la porosité et la résistance mécanique à la compression. Plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est élevée. La résistance mécanique en compression varie de 43 MPa à 70 MPa pour des porosités allant de 0,19 à 0,13.

### III.7.4. Relation entre la porosité et le module d'élasticité

La figure III.24 montre la corrélation entre le module d'élasticité et la porosité. En effet, Plus le matériau est poreux, plus le module d'élasticité est faible. Ceci est dû au fait que la densification des matériaux conduit systématiquement à la réduction de la porosité, qui à son tour se traduit par une amélioration de module d'élasticité.

Résultats établis indiquent l'existence d'une relation non linéaire entre le module d'élasticité et la porosité, l'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme exponentielle présentée par l'équation (III.7), avec un coefficient de corrélation de 0,61.

$$E = 1,7e^{3,52(1-p)} \quad (\text{III.7})$$



**Figure III.24:** Corrélation entre le module d'élasticité et la porosité

## Conclusion

Les résultats trouvés montrent de façon claire l'effet notable de combinaisons des sables sur les performances des mortiers de réparations autoplaçants élaborés; ce qui nous a permis de tirer certaines conclusions:

- L'augmentation des coefficients du modèle associés aux SA, SC et SD en fonction de l'âge conduit à l'augmentation de la résistance à la compression.
- La teneur en sable calcaire mène de manière significative à une augmentation de la résistance à la flexion.
- Une augmentation du module d'élasticité engendré par l'augmentation de taux de sable dunaire et de mélange de sable alluvionnaire - calcaire.
- L'augmentation de la teneur couplé de sable alluvionnaire et de sable des dunes conduits à la diminution de la porosité.

- Des relations entre les propriétés physico-mécaniques des mortiers élaborés ont été trouvées avec des bons coefficients de corrélations.



*Conclusion  
Générale  
et perspectives*

Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés à contribuer à la prédiction des propriétés physico mécaniques d'un mortier de réparation à base de sable alluvionnaire, sable calcaire et sable des dunes par modélisation numérique. Les résultats expérimentaux à modéliser fait l'objet d'une étude antérieure réalisée dans le cadre de projet fin de cycle à l'année universitaire 2019/2020, intitulé : Etude de l'effet du type de sable sur les performances d'un mortier de réparation. Ce projet a été proposé et dirigé par Monsieur Krobba Benharzallah, enseignant chercheur au laboratoire de matériaux et de réhabilitation de structures de l'Université de Laghouat.

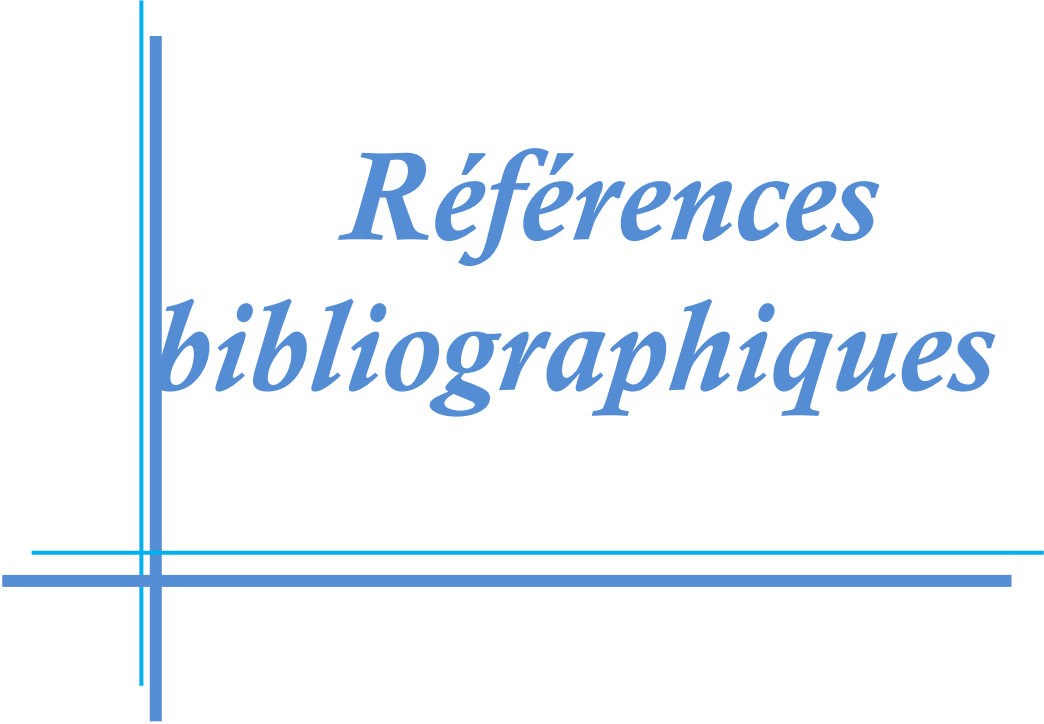
Ce travail avait comme double objectifs de promouvoir de fournir aux professionnels du secteur de construction un mortier de réparation, à faible coût, performant et remplissant l'ensemble des exigences techniques et de prédire les propriétés physico-mécaniques des mortiers de réparation autoplacants à base de trois types de sables, disponible à la région de Laghouat, en combinaison binaire et ternaire. Afin d'atteindre notre objectif, 15 mélanges de différents types de sables ont été étudiés par des modèles mathématiques de second degré qui nous s'explique aux mieux l'influence des proportions de sable sur les propriétés à l'état durci de mortiers de réparation autoplacant MRAP tel que la résistance mécanique à la flexion  $R_f$ , la résistance mécanique à la compression  $R_C$ , le module d'élasticité  $E$  et la porosité totale  $P$ . La modélisation a été réalisée par un plan de mélange basée sur les plans d'expériences par l'utilisation du logiciel de statistique JMP. Cette modélisation permet de tirer le maximum d'informations sur les réponses en faisant le minimum d'essais.

Les résultats que nous avons obtenus nous permettent de conclure que :

- L'augmentation des coefficients du modèle associés aux SA, SC et SD en fonction de l'âge conduit à l'augmentation de la résistance à la compression.
- La teneur en sable calcaire mène de manière significative à une augmentation de la résistance à la flexion.
- Une augmentation du module d'élasticité est engendrée par l'augmentation de taux de sable dunaire et de mélange de sable alluvionnaire - calcaire.

- L'augmentation de la teneur couplé de sable alluvionnaire et de sable des dunes conduits à la diminution de la porosité.
- Des relations entre les propriétés physico-mécaniques des mortiers élaborés ont été trouvées avec des bons coefficients de corrélations.

En perspectives, le travail présenté dans ce mémoire peut être complété et approfondi par d'autres études ou travaux, notamment expérimentaux traitant des indicateurs de durabilité des mortiers.



*Références  
bibliographiques*

## Référence bibliographique

- [1] Hassan, K.; Brooks, J. and Al-Alawi, L.: "Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment", *Cement and concrete composites*, **23** (2001), no. 1, pp. 93–101.
- [2] Morgan, D.R.: "Compatibility of concrete repair materials and systems", *Construction and Building Materials*, **10** (1996), no. 1, pp. 57–67.
- [3] Courard, L. and Bissonnette, B.: "Réparation des ouvrages en béton armé-Partie 1: Pathologies et diagnostic", *Techniques de l'Ingénieur. Analyse Chimique et Caractérisation*, (2016).
- [4] Pattnaik, R.: "INVESTIGATION INTO COMPATIBILITY BETWEEN REPAIR MATERIAL AND SUBSTRATE CONCRETE USING EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT METHOD", (no date), p. 168.
- [5] Nguyen, T.-H.: "Durabilité des réparations à base cimentaire: analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation", (2010).
- [6] Carbonell Muñoz, M.Á.: "Compatibility of ultra high performance concrete as repair material : bond characterization with concrete under different loading scenarios"2012.
- [7] Laurence, O.: "La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton: apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation", (no date), p. 347.
- [8] Beer, F.P. ed.: "Statics and mechanics of materials", 1st ed ed., McGraw-Hill, New York, NY, 2011.
- [9] Aïtcin, P.-C.; Neville, A. and Acker, P.: "Les différents types de retrait du béton", (no date), p. 11.
- [10] Bissonnette, B.: "Le fluage en traction: un aspect important de la problématique des réparations minces en béton", (1996).
- [11] Emmons, P.H. and Vaysburd, A.M.: "Factors affecting the durability of concrete repair: the contractor's viewpoint", *Construction and Building Materials*, **8** (1994), no. 1, pp. 5–16.
- [12] Wu, L.; Farzadnia, N.; Shi, C.; Zhang, Z. and Wang, H.: "Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review", *Construction and Building Materials*, **149** (2017), pp. 62–75.
- [13] Masse, M.B.: "ÉTUDE DU COMPORTEMENT DÉFORMATIONNEL DES BÉTONS DE RÉPARATION", (no date), p. 223.
- [14] Asad, M.; Baluch, M.H. and Al-Gadhib, A.H.: "Drying shrinkage stresses in concrete patch repair systems", *Magazine of Concrete Research*, **49** (1997), no. 181, pp. 283–293.
- [15] Bazant, Z.P. and Wittmann, F.H.: "Creep and shrinkage in concrete structures", (1982).
- [16] Cusson, D.: "Durability of repair materials", (no date), p. 8.
- [17] Bissonnette, B. and Pigeon, M.: "Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes", *Cement and Concrete Research*, **25** (1995), no. 5, pp. 1075–1085.
- [18] Garbacz, A.; Górká, M. and Courard, L.: "Effect of concrete surface treatment on adhesion in repair systems", *Magazine of Concrete Research*, (2005), no. 1, p. 12.
- [19] Bakhsh, K.N.: "Evaluation of Bond Strength between Overlay and Substrate in Concrete Repairs", (no date), p. 71.

## Référence bibliographique

- [20] Courard, L.; Garbacz, A.; Piotrowski, T. and Sustercic, J.: "Surface properties of concrete and criteria for adhesion of repair systems", (no date), p. 14.
- [21] Krobbba B: "la formulation et performance d'un mortier de réparation à base de sable dunaire"2020.
- [22] GADRI, K.: "Etude Expérimentale Sur La Compatibilité Déformationnelle Des Réparations En Béton De Sable", (2018).
- [23] Khaled, B.: "Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires", (2015).
- [24] Celia, D.: "Etude comparative de l'utilisation du sable de dune en substitution du sable de rivière : cas des mortiers normalisés", (no date), p. 129.
- [25] YAHIAOUI, K. and SADKI, M.: "PROPRIÉTÉS DE MORTIER AUTOPLAÇANT À BASE DE DIFFÉRENTS TYPES DE SABLES", (2017).
- [26] MAZA, M.: "Analyse des propriétés physiques et mécaniques du mortier à base de sable mixte (sable de dune et sable concassé)", (2016).
- [27] Lakhdari, M.; Zaidi, A.; Bouhicha, M. and Krobbba, B.: "Formulation of Mortar Based on Mixture of Dune Sand and Alluvial Sand", (no date).
- [28] Benabed, B.; Azzouz, L.; Kadri, E.; Belaidi, S.E. and Soualhi, H.: "Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes", (2012), p. 12.
- [29] Hocine, D.T.; Salim, G.; Hadji, T. and Ahmed, A.: "Effet de la nature de sable et la température de mûrissement sur les propriétés d'un mortier autoplaçant", (no date), p. 14.
- [30] BELKHIRI, H. and DERRAGUI, A.: "Contribution à l'étude des comportements mécaniques de mortier à base de sable de dune et fines siliceuses", (2016).
- [31] Lakhdari, M.F.; Zaidi, A.; Bouhicha, M. and Krobbba, B.: "Sulfate Resistance of Cementitious Mortar Based on Dune and Alluvial Sands in Hot Region", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, **45** (2021), no. 2, pp. 697–706.
- [32] Grassl, P.; Wong, H.S. and Buenfeld, N.R.: "Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar", arXiv:0811.0019 [cond-mat], (2008).
- [33] Beddar, A.E. and Nadji, A.E.: "Effet des caractéristiques des granulats fins sur propriétés du mortier Auto-plaçant", (2020).
- [34] BOUKHELKHAL, A.: "COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE ET DURABILITE EN CLIMAT CHAUD DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS A BASE D'AJOUTS BINAIRES ET TERNAIRES", (2019), p. 271.
- [35] shraddhu.s: "Compressive and Tensile Strength of Concrete: Relation | Concrete Technology", (no date), p. 12.
- [36] Chen, X.; Wu, S. and Zhou, J.: "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar", Construction and Building Materials, **40** (2013), pp. 869–874.

## Référence bibliographique

- [37] Usman, J.; Mohd Sam, A.R. and Radin Sumadi, S.: "Strength and Porosity of Cement Mortar Blended with Metakaolin", *Advanced Materials Research*, **838–841** (2013), pp. 142–147.
- [38] Bu, J.; Tian, Z.; Zheng, S. and Tang, Z.: "Effect of sand content on strength and pore structure of cement mortar", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, **32** (2017), no. 2, pp. 382–390.
- [39] Goupy, J. and Creighton, L.: "Introduction aux plans d'expériences", Dunod, Paris, 2006.
- [40] Bouziani, T.; Bédérina, M.; Makhloufi, Z. and Hadjoudja, M.: "Mixture design approach to evaluate fresh properties of SCC made with various sands", *Journal of Building Materials and Structures*, **1** (2014), no. 1, pp. 1–9.
- [41] Nécira, B.; Belkacem, M. and Abadou, Y.: "Statistical analysis of high performance self-compacting mortar containing ternary sand mixtures", *Materials Today: Proceedings*, **45** (2021), pp. 5166–5171.
- [42] Benabed, B.; Kadri, E.-H.; Azzouz, L. and Kenai, S.: "Properties of self-compacting mortar made with various types of sand", *Cement and Concrete Composites*, **34** (2012), no. 10, pp. 1167–1173.
- [43] MERDJANI FATIMA ZOHRA and BOUAKKAZ TALHA YACINE: "Etude de l'effet du type de sable sur les performances d'un mortier de réparation", (2020), p. 75.